



**HAL**  
open science

# Évaluation optoélectronique de l'équilibre sagittal pelvi-rachidien : modèle non invasif de déséquilibre antérieur

Charles Latrobe

► **To cite this version:**

Charles Latrobe. Évaluation optoélectronique de l'équilibre sagittal pelvi-rachidien : modèle non invasif de déséquilibre antérieur. Médecine humaine et pathologie. 2017. dumas-01551841

**HAL Id: dumas-01551841**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01551841>**

Submitted on 30 Jun 2017

**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.

FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE ROUEN

ANNEE 2017

**THESE POUR LE  
DOCTORAT EN MEDECINE**

(Diplôme d'Etat)

Par

**LATROBE Charles**

Né le 1 mars 1986 à Versailles

PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 15 JUIN 2017

**EVALUATION OPTOELECTRONIQUE DE L'EQUILIBRE  
SAGITTAL PELVI-RACHIDIEN  
Modèle non invasif de déséquilibre antérieur**

**PRESIDENT DU JURY**

Professeur Franck Dujardin

**DIRECTEUR DE THESE**

Docteur Mourad Ould-Slimane

**MEMBRES DU JURY**

Professeur Philippe Hardy

Professeur Joël Lechevallier

Dr Olivier Courage



FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE ROUEN

ANNEE 2017

**THESE POUR LE  
DOCTORAT EN MEDECINE**

(Diplôme d'Etat)

Par

**LATROBE Charles**

Né le 1 mars 1986 à Versailles

PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 15 JUIN 2017

**EVALUATION OPTOELECTRONIQUE DE L'EQUILIBRE  
SAGITTAL PELVI-RACHIDIEN  
Modèle non invasif de déséquilibre antérieur**

**PRESIDENT DU JURY**

Professeur Franck Dujardin

**DIRECTEUR DE THESE**

Docteur Mourad Ould-Slimane

**MEMBRES DU JURY**

Professeur Philippe Hardy

Professeur Joël Lechevallier

Dr Olivier Courage

**ANNEE UNIVERSITAIRE 2016 - 2017**  
**U.F.R. DE MEDECINE ET DE-PHARMACIE DE ROUEN**

-----

DOYEN : **Professeur Pierre FREGER**

ASSESEURS : **Professeur Michel GUERBET**  
**Professeur Benoit VEBER**  
**Professeur Pascal JOLY**  
**Professeur Stéphane MARRET**

<b>I - MEDECINE</b>
---------------------

**PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS**

Mr Frédéric <b>ANSELME</b>	HCN	Cardiologie
Mme Isabelle <b>AUQUIT AUCKBUR</b>	HCN	Chirurgie plastique
Mr Fabrice <b>BAUER</b>	HCN	Cardiologie
Mme Soumeya <b>BEKRI</b>	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Ygal <b>BENHAMOU</b>	HCN	Médecine interne
Mr Jacques <b>BENICHOU</b>	HCN	Bio statistiques et informatique médicale
Mme Bouchra <b>LAMIA</b>	Havre	Pneumologie
Mr Olivier <b>BOYER</b>	UFR	Immunologie
Mr François <b>CARON</b>	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Philippe <b>CHASSAGNE</b> ( <i>détachement</i> )	HCN	Médecine interne (gériatrie) – Détachement
Mr Vincent <b>COMPERE</b>	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mr Jean-Nicolas <b>CORNU</b>	HCN	Urologie

Mr Antoine <b>CUVELIER</b>	HB	Pneumologie
Mr Pierre <b>CZERNICHOW</b> ( <i>surnombre</i> )	HCH	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Nicolas <b>DACHER</b>	HCN	Radiologie et imagerie médicale
Mr Stéfan <b>DARMONI</b> communication	HCN	Informatique médicale et techniques de
Mr Pierre <b>DECHELOTTE</b>	HCN	Nutrition
Mr Stéphane <b>DERREY</b>	HCN	Neurochirurgie
Mr Frédéric <b>DI FIORE</b>	CB	Cancérologie
Mr Fabien <b>DOGUET</b>	HCN	Chirurgie Cardio Vasculaire
Mr Jean <b>DOUCET</b>	SJ	Thérapeutique - Médecine interne et gériatrie
Mr Bernard <b>DUBRAY</b>	CB	Radiothérapie
Mr Philippe <b>DUCROTTE</b>	HCN	Hépto-gastro-entérologie
Mr Frank <b>DUJARDIN</b>	HCN	Chirurgie orthopédique - Traumatologique
Mr Fabrice <b>DUPARC</b> traumatologique	HCN	Anatomie - Chirurgie orthopédique et
Mr Eric <b>DURAND</b>	HCN	Cardiologie
Mr Bertrand <b>DUREUIL</b>	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mme Hélène <b>ELTCHANINOFF</b>	HCN	Cardiologie
Mr Thierry <b>FREBOURG</b>	UFR	Génétique
Mr Pierre <b>FREGER</b>	HCN	Anatomie - Neurochirurgie
Mr Jean François <b>GEHANNO</b>	HCN	Médecine et santé au travail
Mr Emmanuel <b>GERARDIN</b>	HCN	Imagerie médicale
Mme Priscille <b>GERARDIN</b>	HCN	Pédopsychiatrie
Mr Michel <b>GODIN</b> ( <i>surnombre</i> )	HB	Néphrologie
M. Guillaume <b>GOURCEROL</b>	HCN	Physiologie
Mr Dominique <b>GUERROT</b>	HCN	Néphrologie
Mr Olivier <b>GULLIN</b>	HCN	Psychiatrie Adultes
Mr Didier <b>HANNEQUIN</b>	HCN	Neurologie
Mr Fabrice <b>JARDIN</b>	CB	Hématologie
Mr Luc-Marie <b>JOLY</b>	HCN	Médecine d'urgence
Mr Pascal <b>JOLY</b>	HCN	Dermato - Vénérologie

Mme Annie <b>LAQUERRIERE</b>	HCN	Anatomie et cytologie pathologiques
Mr Vincent <b>LAUDENBACH</b>	HCN	Anesthésie et réanimation chirurgicale
Mr Joël <b>LECHEVALLIER</b>	HCN	Chirurgie infantile
Mr Hervé <b>LEFEBVRE</b>	HB	Endocrinologie et maladies métaboliques
Mr Thierry <b>LEQUERRE</b>	HB	Rhumatologie
Mme Anne-Marie <b>LEROI</b>	HCN	Physiologie
Mr Hervé <b>LEVESQUE</b>	HB	Médecine interne
Mme Agnès <b>LIARD-ZMUDA</b>	HCN	Chirurgie Infantile
Mr Pierre Yves <b>LITZLER</b>	HCN	Chirurgie cardiaque
Mr Bertrand <b>MACE</b>	HCN	Histologie, embryologie, cytogénétique
M. David <b>MALTETE</b>	HCN	Neurologie
Mr Christophe <b>MARGUET</b>	HCN	Pédiatrie
Mme Isabelle <b>MARIE</b>	HB	Médecine interne
Mr Jean-Paul <b>MARIE</b>	HCN	Oto-rhino-laryngologie
Mr Loïc <b>MARPEAU</b>	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Stéphane <b>MARRET</b>	HCN	Pédiatrie
Mme Véronique <b>MERLE</b>	HCN	Epidémiologie
Mr Pierre <b>MICHEL</b>	HCN	Hépto-gastro-entérologie
M. Benoit <b>MISSET</b>	HCN	Réanimation Médicale
Mr Jean-François <b>MUIR</b> ( <i>surnombre</i> )	HB	Pneumologie
Mr Marc <b>MURAINÉ</b>	HCN	Ophtalmologie
Mr Philippe <b>MUSETTE</b>	HCN	Dermatologie - Vénérologie
Mr Christophe <b>PEILLON</b>	HCN	Chirurgie générale
Mr Christian <b>PFISTER</b>	HCN	Urologie
Mr Jean-Christophe <b>PLANTIER</b>	HCN	Bactériologie - Virologie
Mr Didier <b>PLISSONNIER</b>	HCN	Chirurgie vasculaire
Mr Gaëtan <b>PREVOST</b>	HCN	Endocrinologie
Mr Bernard <b>PROUST</b>	HCN	Médecine légale
Mr Jean-Christophe <b>RICHARD</b> ( <i>détachement</i> )	HCN	Réanimation médicale - Médecine d'urgence
Mr Vincent <b>RICHARD</b>	UFR	Pharmacologie

Mme Nathalie <b>RIVES</b>	HCN	Biologie du développement et de la reproduction
Mr Horace <b>ROMAN</b>	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Jean-Christophe <b>SABOURIN</b>	HCN	Anatomie - Pathologie
Mr Guillaume <b>SAVOYE</b>	HCN	Hépatogastrologie
Mme Céline <b>SAVOYE-COLLET</b>	HCN	Imagerie médicale
Mme Pascale <b>SCHNEIDER</b>	HCN	Pédiatrie
Mr Michel <b>SCOTTE</b>	HCN	Chirurgie digestive
Mme Fabienne <b>TAMION</b>	HCN	Thérapeutique
Mr Luc <b>THIBERVILLE</b>	HCN	Pneumologie
Mr Christian <b>THUILLEZ</b> ( <i>surnombre</i> )	HB	Pharmacologie
Mr Hervé <b>TILLY</b>	CB	Hématologie et transfusion
M. Gilles <b>TOURNEL</b>	HCN	Médecine Légale
Mr Olivier <b>TROST</b>	HCN	Chirurgie Maxillo-Faciale
Mr Jean-Jacques <b>TUECH</b>	HCN	Chirurgie digestive
Mr Jean-Pierre <b>VANNIER</b> ( <i>surnombre</i> )	HCN	Pédiatrie génétique
Mr Benoît <b>VEBER</b>	HCN	Anesthésiologie - Réanimation chirurgicale
Mr Pierre <b>VERA</b>	CB	Biophysique et traitement de l'image
Mr Eric <b>VERIN</b>	HB	Service Santé Réadaptation
Mr Eric <b>VERSPYCK</b>	HCN	Gynécologie obstétrique
Mr Olivier <b>VITTECOQ</b>	HB	Rhumatologie
Mr Jacques <b>WEBER</b>	HCN	Physiologie

### **MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS**

Mme Noëlle <b>BARBIER-FREBOURG</b>	HCN	Bactériologie – Virologie
Mme Carole <b>BRASSE LAGNEL</b>	HCN	Biochimie
Mme Valérie <b>BRIDOUX HUYBRECHTS</b>	HCN	Chirurgie Vasculaire
Mr Gérard <b>BUCHONNET</b>	HCN	Hématologie
Mme Mireille <b>CASTANET</b>	HCN	Pédiatrie

Mme Nathalie <b>CHASTAN</b>	HCN	Neurophysiologie
Mme Sophie <b>CLAEYSSENS</b>	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Moïse <b>COEFFIER</b>	HCN	Nutrition
Mr Manuel <b>ETIENNE</b>	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Serge <b>JACQUOT</b>	UFR	Immunologie
Mr Joël <b>LADNER</b>	HCN	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Baptiste <b>LATOUCHE</b>	UFR	Biologie cellulaire
Mr Thomas <b>MOUREZ</b>	HCN	Virologie
Mme Muriel <b>QUILLARD</b>	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mme Laëtitia <b>ROLLIN</b>	HCN	Médecine du Travail
Mr Mathieu <b>SALAUN</b>	HCN	Pneumologie
Mme Pascale <b>SAUGIER-VEBER</b>	HCN	Génétique
Mme Anne-Claire <b>TOBENAS-DUJARDIN</b>	HCN	Anatomie
Mr David <b>WALLON</b>	HCN	Neurologie

**PROFESSEUR AGREGÉ OU CERTIFIÉ**

Mme Dominique <b>LANIEZ</b>	UFR	Anglais – retraite 01/10/2016
Mr Thierry <b>WABLE</b>	UFR	Communication

## II - PHARMACIE

### PROFESSEURS

Mr Thierry <b>BESSON</b>	Chimie Thérapeutique
Mr Jean-Jacques <b>BONNET</b>	Pharmacologie
Mr Roland <b>CAPRON</b> (PU-PH)	Biophysique
Mr Jean <b>COSTENTIN</b> (Professeur émérite)	Pharmacologie
Mme Isabelle <b>DUBUS</b>	Biochimie
Mr Loïc <b>FAVENNEC</b> (PU-PH)	Parasitologie
Mr Jean Pierre <b>GOULLE</b> (Professeur émérite)	Toxicologie
Mr Michel <b>GUERBET</b>	Toxicologie
Mme Isabelle <b>LEROUX - NICOLLET</b>	Physiologie
Mme Christelle <b>MONTEIL</b>	Toxicologie
Mme Martine <b>PESTEL-CARON</b> (PU-PH)	Microbiologie
Mme Elisabeth <b>SEGUIN</b>	Pharmacognosie
Mr Rémi <b>VARIN</b> (PU-PH)	Pharmacie clinique
Mr Jean-Marie <b>VAUGEOIS</b>	Pharmacologie
Mr Philippe <b>VERITE</b>	Chimie analytique

### MAITRES DE CONFERENCES

Mme Cécile <b>BARBOT</b>	Chimie Générale et Minérale
Mr Jérémy <b>BELLIEN</b> (MCU-PH)	Pharmacologie
Mr Frédéric <b>BOUNOURE</b>	Pharmacie Galénique
Mr Abdeslam <b>CHAGRAOUI</b>	Physiologie
Mme Camille <b>CHARBONNIER (LE CLEZIO)</b>	Statistiques

Mme Elizabeth <b>CHOSSON</b>	Botanique
Mme Marie Catherine <b>CONCE-CHEMTOB</b> économie de la santé	Législation pharmaceutique et
Mme Cécile <b>CORBIERE</b>	Biochimie
Mr Eric <b>DITTMAR</b>	Biophysique
Mme Nathalie <b>DOURMAP</b>	Pharmacologie
Mme Isabelle <b>DUBUC</b>	Pharmacologie
Mme Dominique <b>DUTERTE- BOUCHER</b>	Pharmacologie
Mr Abdelhakim <b>ELOMRI</b>	Pharmacognosie
Mr François <b>ESTOUR</b>	Chimie Organique
Mr Gilles <b>GARGALA</b> (MCU-PH)	Parasitologie
Mme Nejla EL <b>GHARBI-HAMZA</b>	Chimie analytique
Mme Marie-Laure <b>GROULT</b>	Botanique
Mr Hervé <b>HUE</b>	Biophysique et mathématiques
Mme Laetitia <b>LE GOFF</b>	Parasitologie – Immunologie
Mme Hong <b>LU</b>	Biologie
Mme Marine <b>MALLETER</b>	Toxicologie
Mme Sabine <b>MENAGER</b>	Chimie organique
Mme Tiphaine <b>ROGEZ-FLORENT</b>	Chimie analytique
Mr Mohamed <b>SKIBA</b>	Pharmacie galénique
Mme Malika <b>SKIBA</b>	Pharmacie galénique
Mme Christine <b>THARASSE</b>	Chimie thérapeutique
Mr Frédéric <b>ZIEGLER</b>	Biochimie

### **PROFESSEURS ASSOCIES**

Mme Cécile <b>GUERARD-DETUNCQ</b>	Pharmacie officinale
Mr Jean-François <b>HOUIVET</b>	Pharmacie officinale

### **PROFESSEUR CERTIFIE**

Mme Mathilde <b>GUERIN</b>	Anglais
----------------------------	---------

**ASSISTANT HOSPITALO-UNIVERSITAIRE**

Mme Sandrine **DAHYOT**

Bactériologie

**ATTACHES TEMPORAIRES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE**

Mr Souleymane **ABDOUL-AZIZE**

Biochimie

Mme Hanane **GASMI**

Galénique

Mme Caroline **LAUGEL**

Chimie organique

Mr Romy **RAZAKANDRAINIBE**

Parasitologie

## LISTE DES RESPONSABLES DES DISCIPLINES PHARMACEUTIQUES

Mme Cécile <b>BARBOT</b>	Chimie Générale et minérale
Mr Thierry <b>BESSON</b>	Chimie thérapeutique
Mr Roland <b>CAPRON</b>	Biophysique
Mme Marie-Catherine <b>CONCE-CHEMTOB</b>	Législation et économie de la santé
Mme Elisabeth <b>CHOSSON</b>	Botanique
Mr Jean-Jacques <b>BONNET</b>	Pharmacodynamie
Mme Isabelle <b>DUBUS</b>	Biochimie
Mr Loïc <b>FAVENNEC</b>	Parasitologie
Mr Michel <b>GUERBET</b>	Toxicologie
Mr François <b>ESTOUR</b>	Chimie organique
Mme Isabelle <b>LEROUX-NICOLLET</b>	Physiologie
Mme Martine <b>PESTEL-CARON</b>	Microbiologie
Mme Elisabeth <b>SEGUIN</b>	Pharmacognosie
Mr Mohamed <b>SKIBA</b>	Pharmacie galénique
Mr Rémi <b>VARIN</b>	Pharmacie clinique
Mr Philippe <b>VERITE</b>	Chimie analytique

### **III – MEDECINE GENERALE**

#### **PROFESSEUR**

Mr Jean-Loup **HERMIL** UFR Médecine générale

#### **PROFESSEURS ASSOCIES A MI-TEMPS**

Mr Emmanuel **LEFEBVRE** UFR Médecine Générale

Mme Elisabeth **MAUVIARD** UFR Médecine générale

Mr Philippe **NGUYEN THANH** UFR Médecine générale

#### **MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE A MI-TEMPS**

Mr Pascal **BOULET** UFR Médecine générale

Mr Emmanuel **HAZARD** UFR Médecine Générale

Mme Lucile **PELLERIN** UFR Médecine générale

Mme Yveline **SEVRIN** UFR Médecine générale

Mme Marie Thérèse **THUEUX** UFR Médecine générale

## ENSEIGNANTS MONO-APPARTENANTS

### PROFESSEURS

Mr Serguei <b>FETISSOV</b> (med)	Physiologie (ADEN)
Mr Paul <b>MULDER</b> (phar)	Sciences du Médicament
Mme Su <b>RUAN</b> (med)	Génie Informatique

### MAITRES DE CONFERENCES

Mr Sahil <b>ADRIOUCH</b> (med) (Unité Inserm 905)	Biochimie et biologie moléculaire
Mme Gaëlle <b>BOUGEARD-DENOYELLE</b> (med) moléculaire (UMR 1079)	Biochimie et biologie
Mme Carine <b>CLEREN</b> (med)	Neurosciences (Néovasc)
M. Sylvain <b>FRAINEAU</b> (phar)	Physiologie (Inserm U 1096)
Mme Pascaline <b>GAILDRAT</b> (med) 1079)	Génétique moléculaire humaine (UMR
Mr Nicolas <b>GUEROUT</b> (med)	Chirurgie Expérimentale
Mme Rachel <b>LETELLIER</b> (med)	Physiologie
Mme Christine <b>RONDANINO</b> (med)	Physiologie de la reproduction
Mr Antoine <b>OUVRARD-PASCAUD</b> (med)	Physiologie (Unité Inserm 1076)
Mr Frédéric <b>PASQUET</b>	Sciences du langage, orthophonie
Mme Isabelle <b>TOURNIER</b> (med)	Biochimie (UMR 1079)

### **CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS : Mme Véronique DELAFONTAINE**

*HCN - Hôpital Charles Nicolle*

*HB - Hôpital de BOIS GUILLAUME*

*CB - Centre Henri Becquerel*

*CHS - Centre Hospitalier Spécialisé du Rouvray*

*CRMPR - Centre Régional de Médecine Physique et de Réadaptation*

*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.*

# REMERCIEMENTS

## AUX MEMBRES DU JURY

### **A Monsieur le Professeur Franck DUJARDIN**

Vous me faites l'honneur de présider le jury de cette thèse. Je vous remercie de m'avoir permis d'accéder à cette année « médaille d'or » si exceptionnelle et tellement enrichissante. A ce titre, je vous suis particulièrement reconnaissant. Mon investissement maximal au sein du service, sera digne de l'espoir, des espoirs que vous placez en moi.

### **A Monsieur le Professeur Joël LECHEVALLIER**

Votre présence parmi les membres de ce jury est pour moi source d'une grande satisfaction. Je garde un excellent souvenir de mon stage d'internat dans votre service. Merci pour la grande confiance dont vous faites preuve à mon égard. Soyez assuré de ma grande motivation à contribuer au bon fonctionnement de votre service, et à pérenniser une filière enfant-adulte de qualité.

### **A Monsieur le Professeur Philippe HARDY**

Votre présence ici est pour moi un très grand honneur. Je suis conscient de la chance inouïe que j'ai d'avoir intégré votre équipe l'an dernier. C'est pour moi une très grande fierté. J'y ai passé mon meilleur semestre d'internat. Je n'oublierai jamais votre soutien, et vos démarches plus qu'élégantes, face à la réponse négative de la commission inter CHU... Vous avez agi comme un père pour moi ! Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon plus grand respect.

### **A Monsieur le Docteur Olivier COURAGE**

Votre présence au sein de ce jury est pour moi une très grande fierté. J'ai la chance inestimable d'être votre fellow pour encore 5 mois ! Cette année de « médaille d'or » est pour moi incroyablement enrichissante et tellement épanouissante. Vous m'apprenez chaque jour énormément, aussi bien « orthopédiquement » qu'humainement.

Merci pour votre pédagogie inégalable, pour votre bonne humeur quotidienne, votre beau sourire et votre joie de vivre ! Vous êtes pour moi bien plus qu'un simple virtuose de la chirurgie !!! Merci pour ce que vous êtes ! Veuillez recevoir l'expression de ma profonde gratitude et de mon respect.

### **A Monsieur le Docteur Mourad OULD-SLIMANE**

Mon Cher Slim, tout d'abord un immense merci pour tout ce que tu as fait pour moi ! Tu m'as toujours fait confiance et je t'en suis très reconnaissant. Opérer ou travailler avec toi riment avec plaisir. Ta pédagogie, ton savoir, ta précision opératoire, ta grande humilité, ton attention, ton amour des internes et ta sagesse, font de toi le chef modèle que je souhaite un jour devenir. Merci pour ces belles années d'internat à tes côtés, et pour notre collaboration scientifique plutôt fructueuse à mon goût...

## **A MA FAMILLE**

### **A Grand-Père et Grand-Mère**

Votre absence ce jour et pour moi un très grand regret ! J'aurais été tellement fier et heureux d'être enfin diplômé sous vos yeux... Je suis très fier de vous et de votre santé stupéfiante (de CHEVAL) !

### **A Bon-Papinou et Belle-Bichette**

Merci pour cette magnifique période passée à vos côtés durant ma première année de Médecine. C'était l'hôtel 5 étoiles chaque jour.

Déjà un an que tu nous as quitté ma Belle-Bichette ; et toi Bon-Papinou tu viens tout juste de t'envoler pour la rejoindre ... Vous me manquez si fort ! J'aurais tellement aimé que vous soyez présent pour voir se concrétiser cette belle aventure commencée à vos côtés !

### **A mes Parents Chéris**

Merci pour ce que vous êtes et pour ce que vous avez fait de moi !

C'est grâce à vous et rien qu'à vous qu'aujourd'hui j'ai accompli mon rêve d'enfant !

Vous avez toujours cru en moi et en ce Grand Jour, même dans les pires moments de doute, et de découragement ! J'espère vous rendre fier !

Maman encore désolé pour ces années laborieuses, chaotiques et infernales de primaire que je t'ai fait subir. Je me rappelle encore des devoirs, des problèmes, des conjugaisons et des leçons interminables, toujours source de conflit. Tu es resté patiente durant toute ces années plus que douloureuses. Je ne t'oublierai jamais ! Merci de ne pas avoir écouté cette ☠️□□□□!! démoniaque d'institutrice de □□ □ qui t'incitait chaque jour à me déscolariser dès le CP ! Je t'aime !

Papa tu as su instiller avec élégance, magie et parcimonie ton grand Amour pour la médecine au sein de notre fratrie, comme en atteste nos métiers respectifs... En effet avec une fille orthophoniste, l'autre ergothérapeute, une sage-femme, un fils podologue, une probable future dentiste, et un orthopédiste, on peut dire que tu as fait un sacré coup de Maître ! Je t'aime et suis très fier de toi !

### **A mes Sœurs, à mon Frère**

C'était juste incroyable de grandir avec vous ! J'ai tellement de chance d'avoir une si belle et grande fratrie. Merci pour ces magnifiques moments passés à vos côtés. Merci de m'avoir toujours supporté et encouragé pendant ces 30 années ... Pardon pour le mal que j'ai pu vous faire pendant mon enfance et adolescence... Je vous aime tellement !

### **A mes très nombreux Oncles et Tantes, Cousins et Cousines, Neveux et Nièces**

Un grand merci à **Olivier et Christine** de m'avoir soutenu sans aucun jugement durant une période douloureuse ...

A mon **Godo, mon Pit et mon Francky** ! Vous êtes les Couz' avec qui j'ai grandi et passé des moments tant merveilleux qu'inoubliables. J'espère ne jamais vous perdre !

**A ma Belle Famille qui m'a si bien accueillie et à mes futurs Beauf' ...**

### **A toi ma Lorène, ma Lolo d'amour !**

Je t'aime de tout mon cœur et suis très heureux de concrétiser notre décennie d'AMOUR par notre mariage imminent. Merci d'avoir toujours cru en moi et en mon avenir que tu dépeins toujours plus brillant...

Tu es la seule à me comprendre parfaitement, et à avoir exactement la même idée ou la même envie au même instant.

Tu es responsable en très grande partie de mes succès par ta foi en moi, et les nombreux sacrifices et moments de solitude qu'ils impliquent. Je te promets de veiller chaque jour à l'équilibre de notre couple, et de t'accorder plus de temps maintenant que ma très longue « scolarité » touche à sa fin !

**#ANAQDT !**



**A nos Futurs Enfants que j'aime déjà si fort ...**

## A MES MAITRES

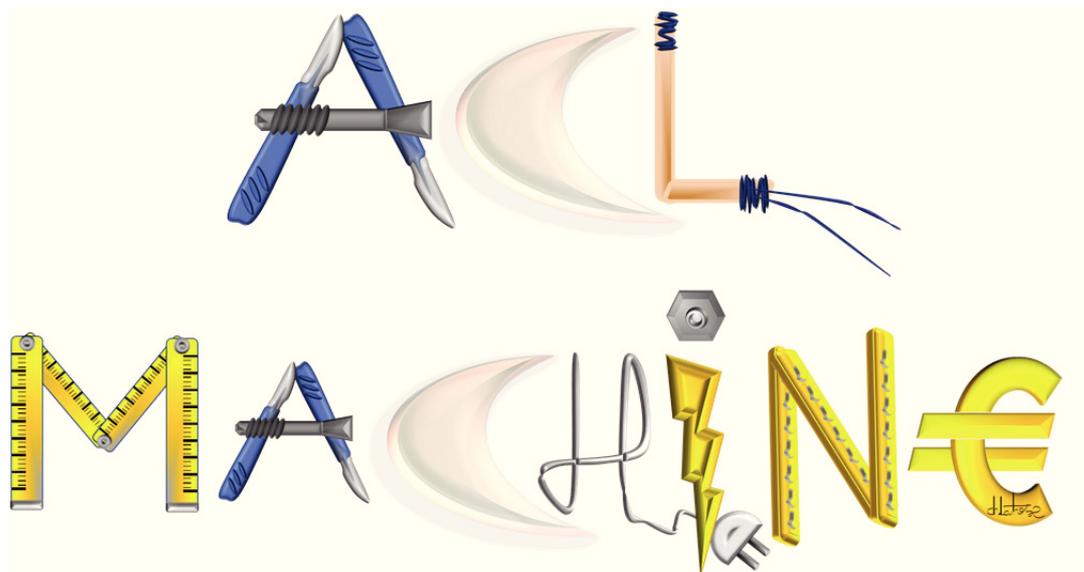
### **Au Professeur Philippe Hardy et au Docteur Olivier Courage**

Au risque d'être redondant, je souhaite encore vous remercier pour tout ce que vous m'avez appris et apporté. Travailler avec vous et vous connaître est une chance que je souhaite à chaque orthopédiste, chirurgien et médecin. Vous m'avez appris bien plus que la chirurgie et je vous en suis particulièrement reconnaissant. J'espère pouvoir un jour vous rendre fier ...

### **A Bertrand Sonnery-Cottet**

Etre ton fellow à Lyon, au centre orthopédique Santy, était pour moi un rêve de longue date que tu m'as permis de concrétiser. J'adore ta façon de travailler, ton approche diagnostique et la simplicité avec laquelle tu abordes la chirurgie et les choses de la vie ! En plus d'être un génie de la chirurgie et de l'arthroscopie, tu es un génie de la Vie ! Merci pour ta générosité débordante, ton affection et la confiance que tu as placée en moi. Merci également de tes coups de pouce dans mes périodes noires...

Tu m'as toujours tendu la main et traité comme un fils, sans jamais me juger ! Je t'en suis infiniment reconnaissant et n'oublierai jamais tout ce que tu as fait pour moi ... A très bientôt mon Pote ! Après l'« International Guest Star », le « Show-stopper » ... etc ... voici ton nouveau titre bien mérité et à l'image du semestre précédent :



### **A Thomas Bauer**

Ce semestre été magnifique !!! Merci de m'avoir appris le pied percuté, la RPTG express, et le septique ! Encore merci pour MJ Latrobe, « la vieille arrière tante HV std X2... » et encore bravo pour ce joli nouveau titre si bien mérité !

A ma « **Vallette** » qui m'a énormément appris en orthopédie ! Une QUESTION et Antoine répond... A Benjamin « **l'Orfèvre** » dit « Papa » ou « Grand Frère », merci pour ton ouvrage Trucs & Astuces de Maître Lefevre en 12 TOMES !!! A Elo **Gliter**, Reine de la Main et des Paillettes, tu m'as gentiment pris sous ton aile durant ton clinicat. A toi ma **TATA** Virginie **Guinet** toujours LÀ pour moi... A la **Roussite chronique**, **Mickael-Poor**, et **Numa** le Picard des « Up de France » qui m'ont bien aidé pendant l'internat.

Merci également à **Roberto Beccari** et **Isabelle Auquit** de m'avoir si bien formé à la chirurgie de la main !

### **A MES AMIS d'ENFANCE**

#### **A toi Romain le numéro 1 ...**

Les mots sont trop pauvres pour exprimer combien tu comptes à mes yeux !

Je suis si heureux d'être le parrain de ton si beau p'ti Malo ...

(Pitié passe ta ☹️□□□□!!de radio de scaphoïde, j'en peut plus d'attendre de voir la tronche que ça a ...)

#### **A Tom, AlexKid, Pierro et WikiFixou**

Merci pour tous ces beaux souvenirs. J'espère vous voir très bientôt ...

### **A MES AMIS du COLLEGE/ LYCEE St Ex**

#### **A toi Benjamin dit « Ifrah »**

Pourvu que tout gaz en Australie. J'espère te voir bientôt. C'est toujours un grand plaisir.

Que de beaux souvenirs du lycée, et des belles grosses conneries ... (Blink, Skate, Go, 1337, Fight Club, Durden, Mayem, Chaos *et al...*). Ça me manque presque !

#### **Aux autres zouaves de la section S ...**

Prof Sam, Stégo, PE, Gwada, U-scal-Hervé and Co.

**Et à mes Profs qui ont supportés toutes nos conneries (parfois avec le sourire, voir le fou-rire...).**

**Je pense surtout à Mme Shraaaapppppp, Mr Foi, et Mr Teel (qu'on a « victimisé »...)**

**Merci à Mr Besson d'avoir cultivé mon amour pour la physique/chimie, puis pour la science...**

### **AUX AMIS de la FAC**

**A Popol Joubitou, Alex' l'embrouille, 6-nouilles, Francis, Marc et ses Bertelades ...**

**A Guillaume et Marie-Alice.** J'vous kiff vous et vos **3 petites merveilles ...**

**A Nasser Abdel Poisson, Mansour** (Est-ce que vous auriez du beeuuuuuuuure ???)

**A Claire** qui viens de nous quitter, et à ses proches pour cette rude épreuve.

**Aux copains de Laennec : Leredu, Edy Seg, Berling, et Alex' Hardy.**

### **AUX COPAINS de l'INTERNAT**

**A Papy Gauthé sur qui je peux compter, Baby Jordy** (ex Mickael Brebis...) le meilleur co-interne, **Maître Thong** (Roi du Fist avant tout), le **Polak Véné** (Matte pas ma meuf bâtard ! Pas ma sœur, ni ma mère ...), la **Damade**, la **Cigogne**, **Caïd Rahali**, le **Pape**, **PopyTrau (la poisse) !**

**A mon Iadounet et ma Bourguizech !** C'était bon 6 mois de « chirurgie » plastique avec vous ...

**Aux plus jeunes que je ne connaît pas bien mais qui me plaise déjà bien (Antoine-Gay, Matthieu, Donatien).**

### **AUX EQUIPES SOIGNANTES et à l'ENSEMBLE DU CORPS MEDICAL**

Sans vous rien est possible évidemment ...

**A l'équipe de CHIRURGIE AMBULATOIRE** (j'adore bosser chez vous, ça swing grave !!!) et aux **COURAGETTES !**

**... Et à tous ceux que j'oublie ...**



# TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	XV
TABLES DES MATIERES .....	1
ABREVIATIONS.....	2
<b>I-INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<u>I.1. DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE .....</u>	<u>5</u>
<u>I.2. ASPECT REGLEMENTAIRE .....</u>	<u>5</u>
<u>I.3. CONCEPT D'EQUILIBRE SAGITTAL PELVI-RACHIDIEN .....</u>	<u>6</u>
<i>I.3.1. Paramètres pelviens.....</i>	<i>6</i>
<i>I.3.2. Paramètres rachidiens utilisés dans la série.....</i>	<i>8</i>
<u>I.4. DESCRIPTION DE LA MARCHE .....</u>	<u>10</u>
<i>1.4.1. Description fonctionnelle de la marche .....</i>	<i>10</i>
<i>1.4.2. Analyse tridimensionnelle de la marche.....</i>	<i>12</i>
<b>II-MATERIEL ET METHODE.....</b>	<b>15</b>
<u>II.1. PATIENTS .....</u>	<u>15</u>
<u>II.2. MODELE DE DESEQUILIBRE SAGITTAL ANTERIEUR .....</u>	<u>15</u>
<u>II.3. ETUDE RADIOGRAPHIQUE .....</u>	<u>16</u>
<u>II.4. ETUDE OPTOELECTRONIQUE .....</u>	<u>19</u>
<u>II.5. ANALYSE STATISTIQUE .....</u>	<u>25</u>
<b>III- RESULTATS.....</b>	<b>26</b>
<u>III.1. POPULATION.....</u>	<u>26</u>
<u>III.2. ANALYSE RADIOGRAPHIQUE.....</u>	<u>26</u>
<i>III.2.1 Paramètres radiographiques pelviens .....</i>	<i>26</i>
<i>III.2.2 Paramètres radiographiques rachidiens .....</i>	<i>27</i>
<i>III.2.3 Paramètres radiographiques de l'équilibre sagittal global .....</i>	<i>27</i>
<u>III.3. ANALYSE OPTOELECTRONIQUE .....</u>	<u>28</u>
<u>III.4 CORRELATIONS RADIO-OPTOELECTRONIQUES.....</u>	<u>28</u>
<b>IV-DISCUSSION.....</b>	<b>30</b>
<u>IV.1. JUSTIFICATION DU MODELE D'ETUDE .....</u>	<u>30</u>
<u>IV.2. EQUILIBRE SAGITTAL OPTOELECTRONIQUE.....</u>	<u>31</u>
<u>IV.3. PERSPECTIVES.....</u>	<u>33</u>
<u>IV.4. LIMITES.....</u>	<u>34</u>
<b>V-CONCLUSION .....</b>	<b>35</b>
<b>V-BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>36</b>
<b>VI-ANNEXES .....</b>	<b>39</b>
<b>VII-TABLES DES ILLUSTRATIONS .....</b>	<b>41</b>

## ABREVIATIONS

CT : cyphose thoracique

C7 : septième vertèbre thoracique

GSC7 : gîte sagittal de CT

IMC : indice de masse corporelle

LL : lordose lombaire

IP : incidence pelvienne

IR : infra-rouge

LL : lordose lombaire

PS : pente sacrée

S1 : première vertèbre sacrée

SA : angle spinal

SSA : angle spino-sacré

T1 : première vertèbre thoracique

T10 : dixième vertèbre thoracique

VP : version pelvienne

VT : vertèbre transitionnelle

3D : tridimensionnelle

## I-INTRODUCTION

La bipédie est une des caractéristiques physiques d'*Homo sapiens* qui le différencie de l'espèce animale. Toumaï, dont le crâne a été découvert dans le désert du Djourab, au Tchad en 2001 va définir une nouvelle espèce, nommée *Sahelanthropus tchadensis* (Fig. 1). Ce fossile âgé de 7 millions d'années est considéré par les paléanthropologues comme l'une des premières espèces de la lignée humaine [1-2]. La bipédie est une évolution récente, qui repose sur de nombreuses adaptations morphologiques, et sur une mécanique rachidienne spécifique. Ainsi la migration du trou occipital, l'apparition d'un rachis à quatre courbures, le raccourcissement et l'élargissement du bassin et la perte de la capacité préhensile du pied ont permis à l'Homme d'acquérir une posture érigée. La marche bipède s'accompagne également de l'apparition d'une rotation pelvienne autour de l'axe vertical, qui permet d'accroître la longueur du pas au prix d'une accentuation modeste de la dépense énergétique, mais avec peut-être des conséquences physiopathologiques notamment en matière de coxarthrose [3][4][5].

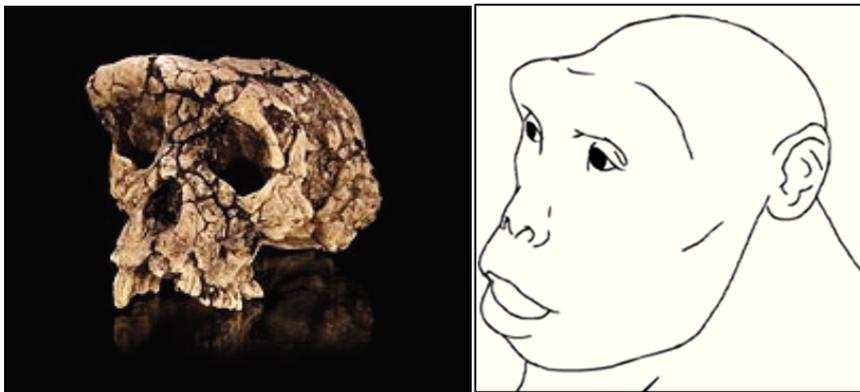


Fig. 1 : (a) Crâne de Toumaï et (b) reconstruction de Toumaï.

L'origine de cette évolution est encore incertaine et de nombreuses théories sont encore débattues. Cependant la théorie la plus communément admise reste celle de la pression de sélection du milieu sur l'évolution. Les paléanthropologues la nomment « *théorie de la savane* ». Nos ancêtres auraient appris à marcher car la forêt reculait au profit de la

savane. Ainsi les premiers hominidés ne disposaient plus d'arbre sur lesquels grimper, et étaient soumis à un environnement nouveau, au sein duquel la station debout leur permettait d'observer au-dessus des herbes hautes afin de se protéger et de mieux maîtriser leur territoire [6].

Ce nouveau mode de locomotion a permis de libérer les membres antérieurs devenus membres supérieurs, puis le développement de la « main outil » [7]. La marche à pied n'est alors plus un simple mode de locomotion mais devient le moyen par lequel l'Homme projette son action [8]. Elle accompagne ainsi l'évolution de l'espèce humaine en créant les conditions favorables au développement de ses facultés intellectuelles.

Cependant ce schéma moteur élaboré reste fragile. Les troubles musculo-squelettiques de l'appareil locomoteur provoquent chez de nombreuses personnes des situations de dépendance dans leur vie quotidienne. Ils représentent la seconde cause d'invalidité après les maladies cardio-vasculaires ; et concernent environ 40% de la population française, avec une prévalence croissante avec l'âge [9]. Il s'agit donc d'affections coûteuses pour la communauté, dont la connaissance, la prévention, et le traitement constitue un réel enjeu de santé publique.

Des intrications étroites entre rachis, pelvis et membres inférieurs sont clairement établies [10][11][12], et font parler d'équilibre sagittal pelvirachidien. Pendant de nombreuses années, la colonne vertébrale a été analysée presque exclusivement dans le plan frontal. Aujourd'hui la prise en charge des pathologies rachidiennes repose sur l'analyse radiographique de l'équilibre sagittal [13], grâce à des paramètres pelviens et rachidiens, précédemment validés dans la littérature[11][14]. La plupart des pathologies dégénératives tendent à décroître la lordose lombaire. Malgré de nombreux mécanismes de compensation [15] comme la perte de cyphose thoracique, la rétroversion pelvienne ou le flexum du secteur sous pelvien, certains patients développeront un déséquilibre sagittal antérieur.

Cependant, tous ces concepts reposent sur une analyse radiographique qui ne permet qu'une approche statique du squelette spino-pelvien. Or cette structure reste intrinsèquement dynamique. L'évolution de l'équilibre sagittal au cours de la marche est donc largement inexplorée [14].

Le système optoélectronique Vicon® a prouvé ses performances dans l'analyse 3D du mouvement et de la marche, et reste aujourd'hui le gold standard dans l'étude de la cinématique humaine [16][17][18]. Néanmoins, peu de données sont disponibles au sujet de l'équilibre sagittal global pelvi-rachidien.

## **I.1. DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE**

Les pathologies rachidiennes induisent fréquemment des troubles de la marche, d'origine multifactorielle. En effet les lombalgies, les radiculalgies, les troubles neurologiques ou encore les déformations rachidiennes, peuvent altérer le schéma de marche.

Le retentissement spécifique au déséquilibre sagittal antérieur sur la marche reste ainsi difficile à dissocier. Pour connaître son influence propre, il est paru utile d'imaginer un modèle non invasif de modification exclusive de la posture sans le pénaliser par les facteurs confondants morphologiques ou fonctionnels généralement présents en pratique clinique.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les performances du système Vicon® pour la détection d'un déséquilibre sagittal pelvi-rachidien. Secondairement les paramètres optoélectroniques les mieux corrélés aux paramètres radiographiques habituels seront recherchés.

## **I.2. ASPECT REGLEMENTAIRE**

Ce travail a reçu un soutien financier obtenu au titre des projets émergents dit « jeunes chercheurs ». Un accord d'éthique a été obtenu auprès du CPP Nord-Ouest I (voir Annexes).

L'ensemble de l'étude s'est déroulé au laboratoire de la marche INSERM du CHU de Rouen (Normandie University, UNICAEN, INSERM, COMETE, Unit 1075, 14000 Caen, France ; Department of Neurophysiology, Rouen University Hospital, F-76000 Rouen, France).

### I.3. CONCEPT D'ÉQUILIBRE SAGITTAL PELVI-RACHIDIEN

En situation physiologique, lors de la station debout, les conduits auditifs externes sont à l'aplomb du centre des têtes fémorales, le rachis est ainsi à l'équilibre autour d'une ligne verticale. Cette ligne d'équilibre est médiane dans le plan frontal, et s'étend du tragus vers l'articulation de Chopart dans le plan sagittal. Elle croise la courbure rachidienne à hauteur de la charnière dorsolombaire, passe par le centre de gravité du corps, juste en avant de la première vertèbre sacrée. De même elle passe juste en arrière de l'axe de rotation bicoxofémoral, en avant de l'axe de flexion/extension du genou, et 2 à 3 cm en avant de l'articulation tibiotarsienne comme l'expliquent Dujardin *et al* [19]. Le sujet cherche à maintenir un équilibre stable avec un travail minimal des muscles spinaux et abdominaux, des muscles fléchisseurs de hanche, du genou et de la cheville. Cet équilibre économique explique la dépense énergétique globale à peine supérieure à celle d'un sujet couché. La posture érigée est possible grâce à une étroite relation entre le bassin et les courbures rachidiennes cervicale, thoracique et lombaire. Dubousset souligne l'importance de l'intrication entre le bassin et le rachis dans le maintien de la posture, et considère le bassin comme une vertèbre unique, articulée entre le rachis et les membres inférieurs. Il parle de « vertèbre pelvienne » [20]. L'étude de cet équilibre sagittal repose sur l'analyse de paramètres sagittaux pelviens et rachidiens.

#### I.3.1. Paramètres pelviens

Les travaux de Duval-Beaupère ont permis de définir la pelvimétrie [21], permettant l'analyse morphologique et positionnelle du bassin. Ce dernier, par sa forme et sa position dans l'espace, joue un rôle clé dans l'équilibre des courbures vertébrales sus-jacentes.

**L'incidence pelvienne (IP)** correspond à l'angle mené par la droite unissant le milieu du plateau sacré au centre des têtes fémorales, et la perpendiculaire issue du milieu du plateau sacré (Fig. 2). Compte tenu de la rigidité de l'anneau pelvien, la position du plateau sacré par rapport aux têtes fémorales ne varie pas après la fin de la croissance. Par conséquent l'IP a une valeur constante pour un individu donnée, véritable « carte d'identité du bassin ».

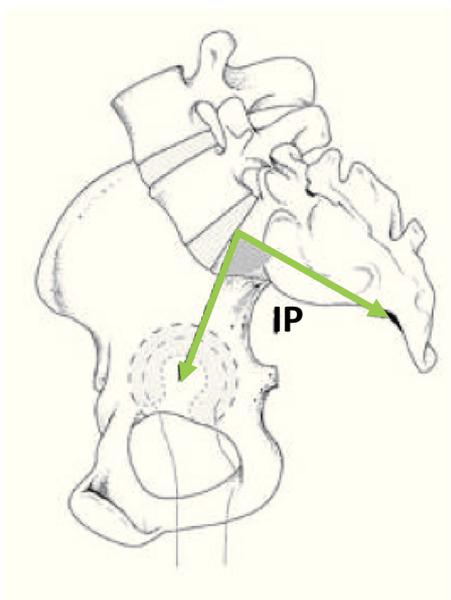


Figure 2 : Angle d'incidence pelvienne (IP)

La **version pelvienne (VP)** est l'angle mené par la verticale et la droite unissant le centre des têtes fémorales au milieu de plateau sacré (Fig. 3). Le bassin, élément mobile, va pouvoir se déplacer dans le plan sagittal, autour de l'axe bicoxofémoral. Ainsi on parle d'antéversion lorsque le bassin « bascule » en avant. La version pelvienne se réduit alors et les têtes fémorales sont déportées vers l'arrière. En rétroversion le bassin « bascule » vers l'arrière, ce qui projette les têtes fémorales vers l'avant et augmente la version pelvienne. Il s'agit d'un mécanisme potentiel de compensation lors du déséquilibre sagittal antérieur du rachis, permettant de replacer les têtes fémorales sous les conduits auditifs externes.

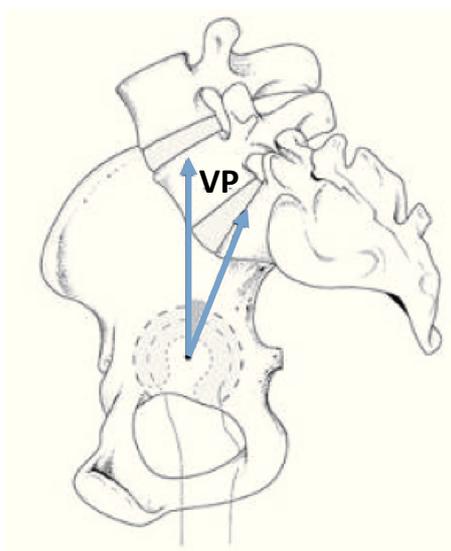


Figure 3 : Angle de version pelvienne (VP)

La **pente sacrée (PS)** correspond à la direction du plateau sacré par rapport à l'horizontale (Fig. 4). Il s'agit comme pour la version pelvienne d'un paramètre positionnel et non morphologique.

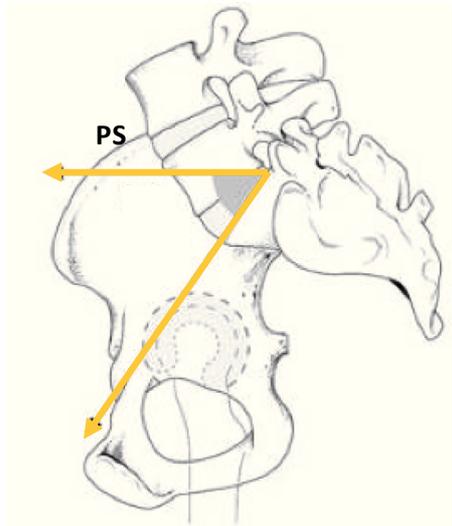


Figure 4 : Angle de pente sacrée

Ces trois paramètres pelviens sont liés par la relation :  $IP = VP + PS$ . Ainsi le paramètre morphologique du bassin est égal à la somme des deux paramètres positionnels.

Ces deux paramètres positionnels évoluent de manière inversement proportionnelle. C'est à dire que lorsque la VP augmente, la PS diminue, et réciproquement. Leur valeur se trouve limitée par l'angle d'incidence. Chez des sujets à forte incidence pelvienne, ils auront donc des valeurs absolues plus importantes. Cela revient à dire que les individus avec une faible incidence pelvienne auront des capacités d'adaptation moindre en termes de rétroversion pelvienne.

### 1.3.2. Paramètres rachidiens utilisés dans la série

D'un point de vue anatomique les courbures rachidiennes segmentaires sont organisées en lordose cervicale, cyphose thoracique et lordose lombaire. En pratique clinique elles sont mesurées sur une radiographie de profil du rachis entier, grâce à la méthode de Cobb, après avoir déterminé la vertèbre transitionnelle (point d'inflexion entre la cyphose thoracique et la lordose lombaire). Par définition la lordose lombaire est la courbure à concavité postérieure s'étendant du plateau sacré au point d'inflexion du rachis en cyphose. La cyphose thoracique est définie par la concavité antérieure

s'étendant de la première vertèbre thoracique (T1) au point d'inflexion du rachis en lordose.

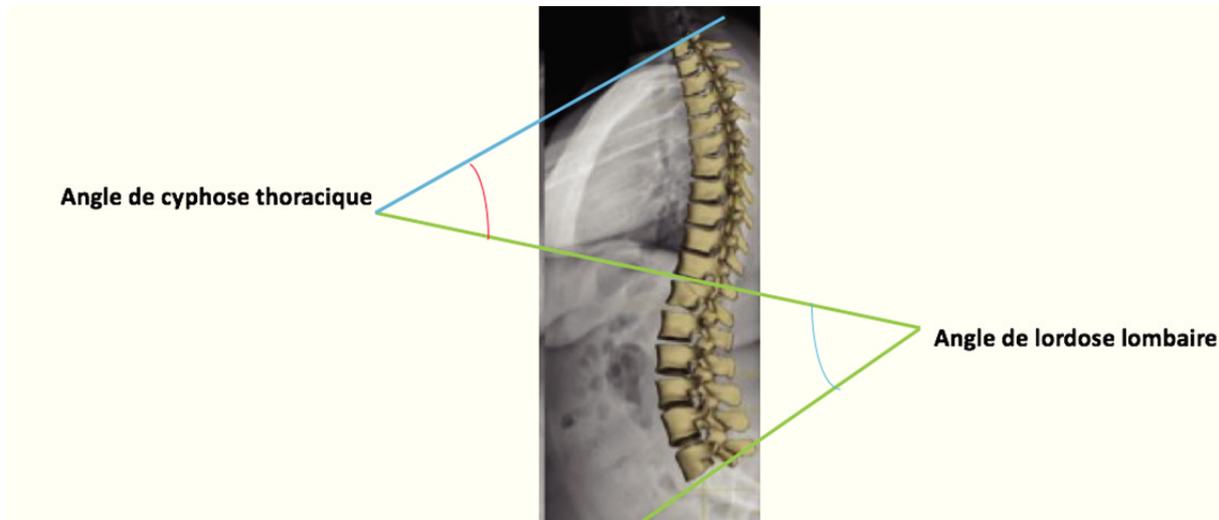


Figure 5 : Méthode de Cobb pour calculer la cyphose thoracique et la lordose lombaire

La **gîte sagittale de C7 (GSC7)** est l'angle mené par la ligne verticale de référence avec la droite unissant le centre du corps vertébral de C7 avec le milieu du plateau sacré (Fig. 6). Par convention la GSC7 est positive lorsque C7 se projette en avant du milieu du plateau sacré, négative en arrière.

L'**angle spino-sacré (SSA)** est formé par la droite unissant le centre du corps vertébral de C7 au milieu du plateau sacré, et la tangente au plateau sacré (Fig. 6).

Le **rapport  $\frac{d}{D}$**  ou  $d$  représente la distance horizontale entre l'aplomb de C7 et le coin postéro-supérieur du plateau sacré.  $D$  la distance horizontale entre l'axe vertical bi-coxo-fémoral et la verticale passant par le coin postéro-supérieur du plateau sacré [22] (Fig. 6).

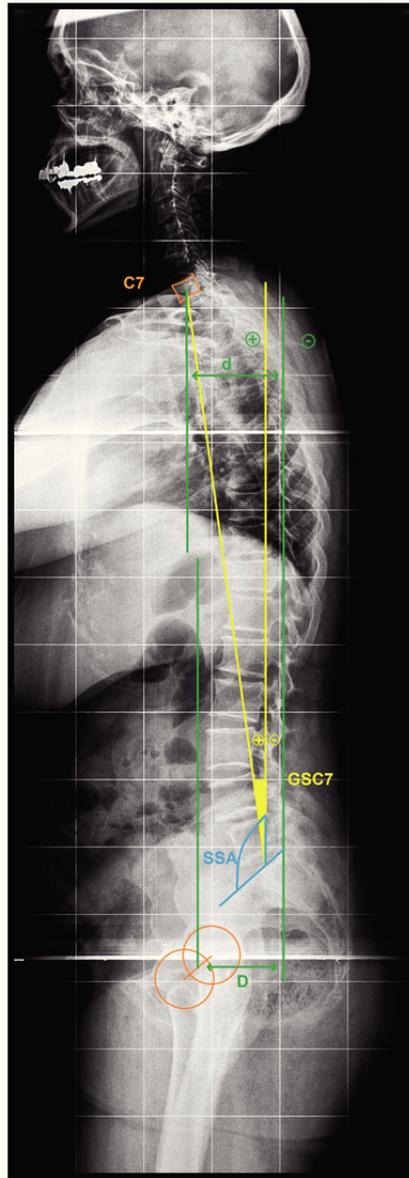


Figure 6 : Principaux paramètres d'équilibre sagittal rachidien

## I.4. DESCRIPTION DE LA MARCHÉ

### 1.4.1. Description fonctionnelle de la marche

La marche se définit sur le plan biomécanique comme un ensemble de rotations segmentaires du membre inférieur, réalisant un mouvement de translation du corps [23].

La locomotion est régie par une alternance d'appuis sur le sol et se distingue de la course par le fait qu'à chaque instant un des pieds garde contact avec le sol. Cette

alternance est appelée dans la littérature cycle de marche [24]. Comme l'expliquent Dujardin et al. [5], le déroulement du cycle de marche suit un schéma type, découpé en évènements élémentaires. Il est habituel de segmenter ce cycle en pourcentage de son déroulement complet (Fig. 7).

Par convention un cycle débute lorsque le talon droit entre en contact avec le sol. Chez un individu sain, entre 0 et 15% du cycle, les deux pieds sont en contact avec le sol. C'est la phase du « double appui » ou « double contact ». Le pied gauche quitte progressivement le sol jusqu'au décollement de l'hallux. Entre 15 et 50% du cycle, le pied droit seulement reste en contact avec le sol. C'est la phase unipodale pour le membre inférieur droit et la phase oscillante pour le membre controlatéral. Enfin le talon gauche entre en contact avec le sol, permettant le déroulement des évènements symétriques jusqu'à 100%, lorsque le talon droit reprend appui.

Par définition le « pas » se définit par l'intervalle entre le contact d'un talon au sol et le contact du talon controlatéral. L'enjambée représente la longueur parcourue lors d'un cycle complet, associant un pas droit et un pas gauche. D'après Whittle [25] la vitesse de marche s'étend de 0,9 à 1,5 m/s chez la femme, contre 1 à 1,6 m/s chez l'homme. Dans une série menée au laboratoire de la marche de Rouen parmi 86 adultes français, de 20 à 75 ans, Dujardin et al. retrouvaient une vitesse de marche de 0,70 à 1,50 m/s [26] [27].

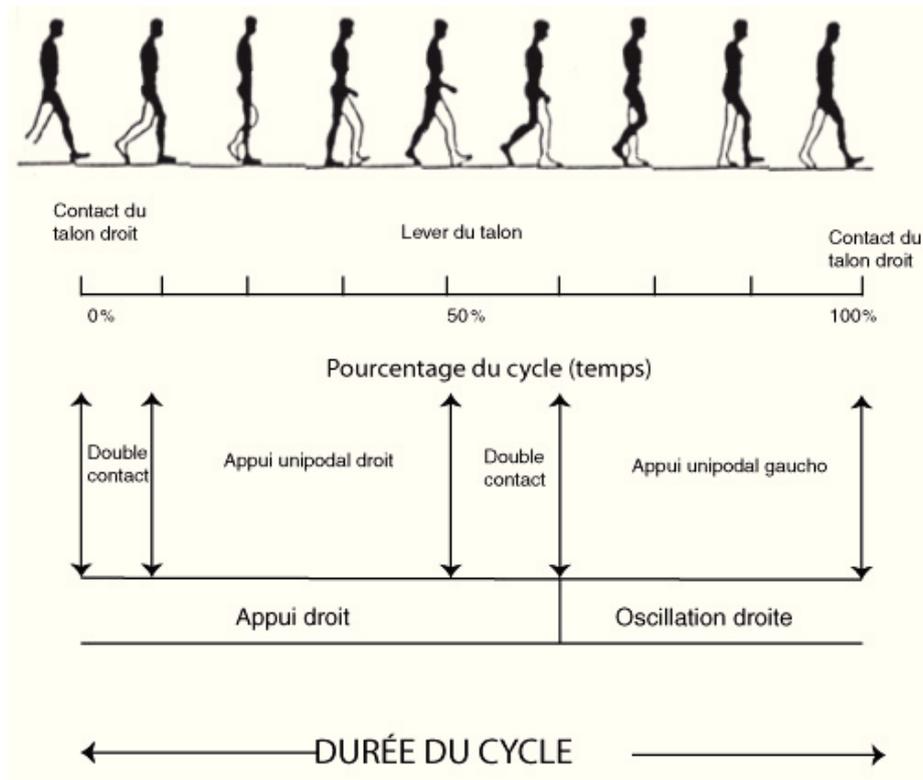


Figure 7 : Cycle de marche et phases élémentaires

#### 1.4.2. Analyse tridimensionnelle de la marche

Cette analyse est rendue possible au moyen de système optoélectronique. Leur mode de fonctionnement repose sur le principe de stéréophotogrammétrie (méthode de stéréovision). C'est à dire que la position spatiale d'un objet va être déterminé par la mise en correspondance de deux images planes.

En pratique le système est composé d'un ensemble de caméras infra-rouges reliées entre elles et à un ordinateur dédié. Les caméras envoient un rayon lumineux infra-rouge. Les sujets à analyser sont équipés de marqueurs rétro-réfléchissants capables de renvoyer les rayons incidents dans leur direction initiale. Ce rayon passe par le centre de la focale de l'objectif et excite un ensemble de pixels disposés sur la matrice de capteurs de la caméra. Cet ensemble de pixels se matérialise en une tache lumineuse dont on calcule le barycentre. Connaissant l'emplacement de la focale et les coordonnées de la position du barycentre de la tache lumineuse sur la matrice de la caméra, on calcule les coordonnées de la droite de projection du marqueur. Ainsi, les informations des droites de projection issues d'au moins deux caméras permettent grâce à un algorithme de mise

en correspondance de calculer les coordonnées tridimensionnelles d'un marqueur au cours du temps (Fig. 8). En conditions optimales la précision de localisation des mires dans l'espace est de l'ordre du millimètre. Grâce aux coordonnées spatiales d'au moins trois marqueurs placés sur un segment de membre, il devient possible d'analyser les 6 composantes élémentaires (trois translations et trois rotations) du déplacement dans l'espace de ce segment au cours du temps. La comparaison des déplacements de deux segments adjacents permet de calculer l'amplitude de l'articulation qui les joint.

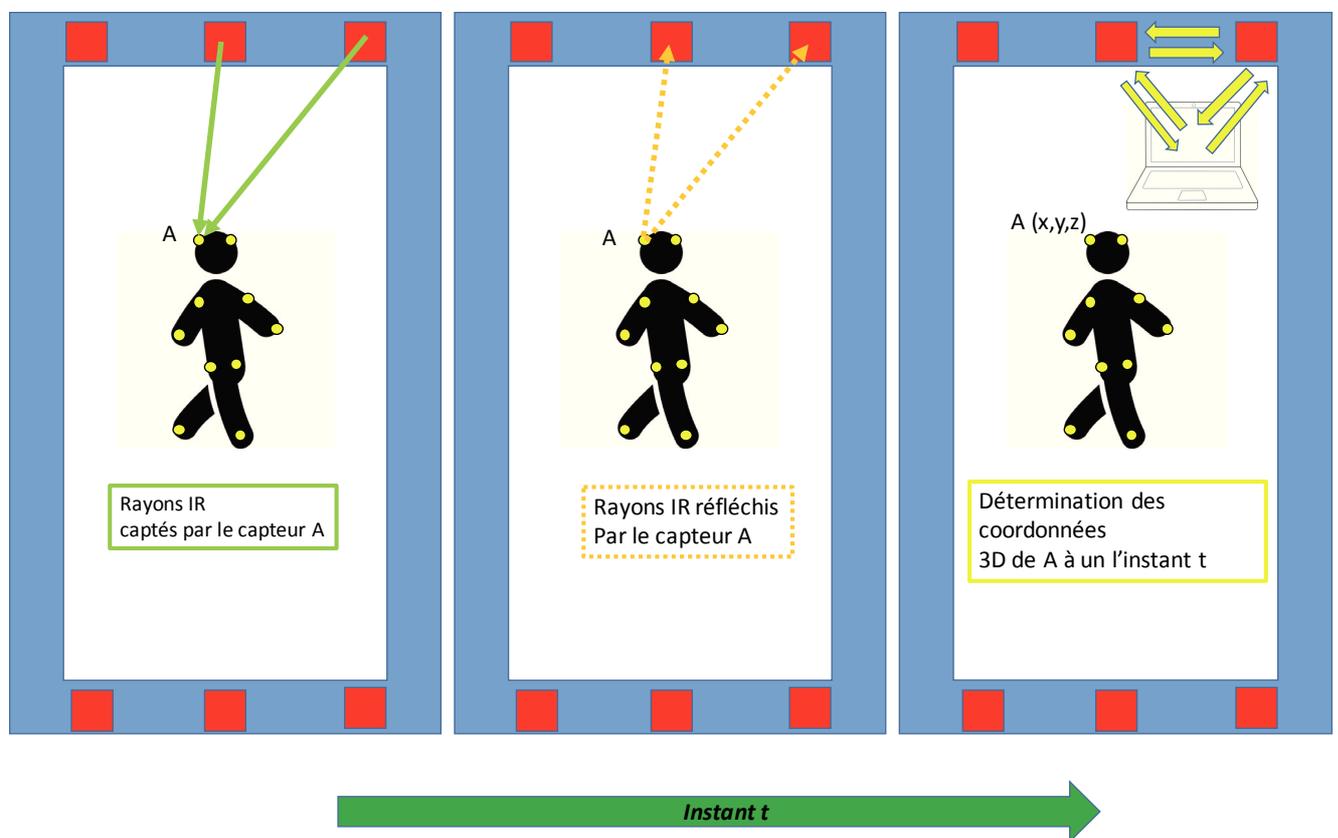


Figure 8 : Schéma illustrant un système optoélectronique doté de 6 caméras IR (carrés rouges), et son fonctionnement. A gauche les rayons IR issues de 2 caméras sont captés par le marqueur A (point jaune). Au milieu les rayons IR sont redirigés dans leur direction initiale vers leur caméra d'origine. A droite les caméras communiquent entre elles et avec l'ordinateur pour déterminer les coordonnées 3D du point A à l'instant t.

La position des caméras dans l'espace doit être connue pour que l'algorithme puisse fonctionner. Une phase de calibrage est nécessaire avant toute acquisition. Le calibrage renseigne le système sur les positions relatives de chaque caméra et permet de définir un repère commun (repère laboratoire).

Après calcul des coordonnées tridimensionnelles de chaque marqueur, le système procède à une modélisation 3D du sujet (Fig. 9). L'exploitation de ce modèle 3D permet d'apprécier une multitude de paramètres (version pelvienne, centre de gravité, longueur du pas, vitesse de marche ...).

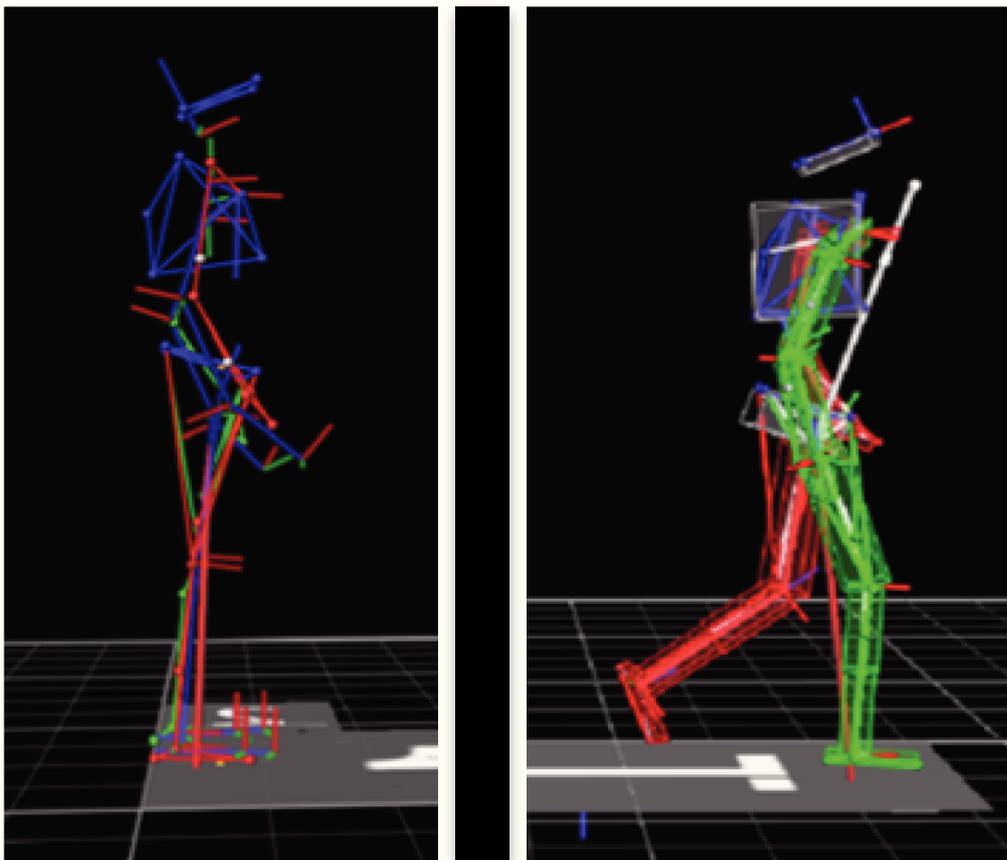


Figure 9 : Exemple de modélisation 3D d'un sujet au laboratoire de la marche. Cette reconstruction a été obtenue sur le logiciel Nexus® ; application du système optoélectronique Vicon®.

## **II-MATERIEL ET METHODE**

### **II.1. PATIENTS**

Vingt-quatre volontaires masculins, asymptomatiques sur le plan rachidien ont été inclus.

Des explications claires sur les risques d'exposition aux radiations ionisantes étaient délivrées, puis le consentement libre et éclairé de chaque patient était recueilli.

Les femmes étaient exclues de l'étude par soucis de radioprotection. En effet la protection des ovaires par vêtement de plomb aurait masqué en partie le squelette spino-pelvien.

Les volontaires avec un  $IMC > 30 \text{ kg/m}^2$ ; ou souffrant de troubles neurologiques, vestibulaires, rhumatologiques ou orthopédiques susceptible d'affecter l'équilibre ou la marche étaient exclu du protocole.

Les données démographiques étaient récoltées pour chaque participant (âge, poids, taille, IMC)

### **II.2. MODELE DE DESEQUILIBRE SAGITTAL ANTERIEUR**

Le principe est de créer un modèle non-invasif de déséquilibre sagittal antérieur immédiatement réversible.

Un corset thoracolombaire en plâtre était moulé sur un volontaire en position de cyphose lombaire forcée pour induire un déséquilibre sagittal antérieur. Puis l'orthoprothésiste réalisait un corset amovible en résine thermoformée à partir de ce « moule ».

Des fenêtres réalisées en regard des épines iliaques antéro-supérieures, du sacrum et de la dixième vertèbre thoracique (T10), rendaient ces repères osseux accessibles (Fig. 10 a & b).

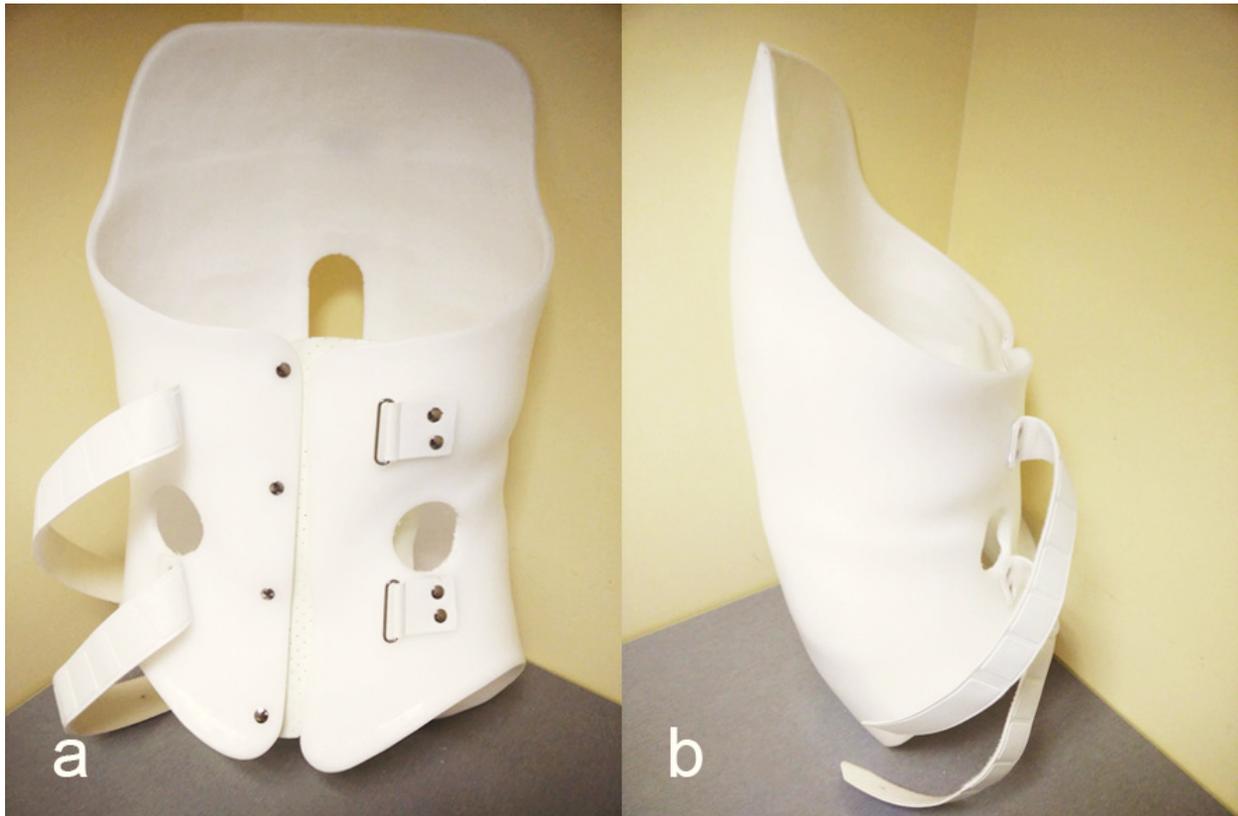


Figure 10. Corset thoraco-lombaire amovible moulé en position cyphosante de face (a) et de profil (b). Des fenêtres en regard des épines iliaques antéro-supérieures et des épineuses permettent la mise en place des mires sur ces reliefs osseux.

### II.3. ETUDE RADIOGRAPHIQUE

Chaque volontaire passait deux radiographies télérachis de profil selon le protocole de notre établissement. Il était demandé aux sujets de se tenir debout avec les genoux tendus, les mains sur les clavicules et le regard à l'horizontal (Fig. 11).

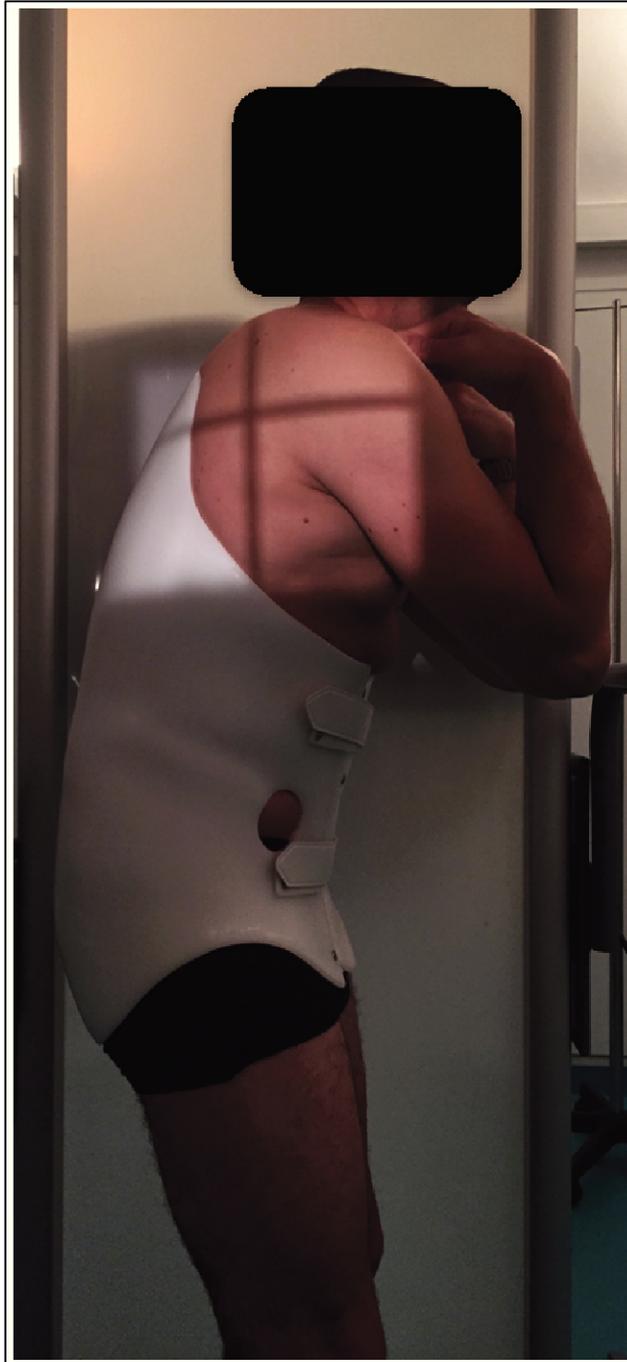


Figure 11 : Position lors du télérachis de profil réalisé avec le corset

Le champ de vue radiologique devait contenir le rachis dans son intégralité et s'étendre des méats acoustiques externes, aux tiers proximaux des fémurs. Un premier cliché était réalisé en présence du corset, le deuxième sans (Fig. 12).

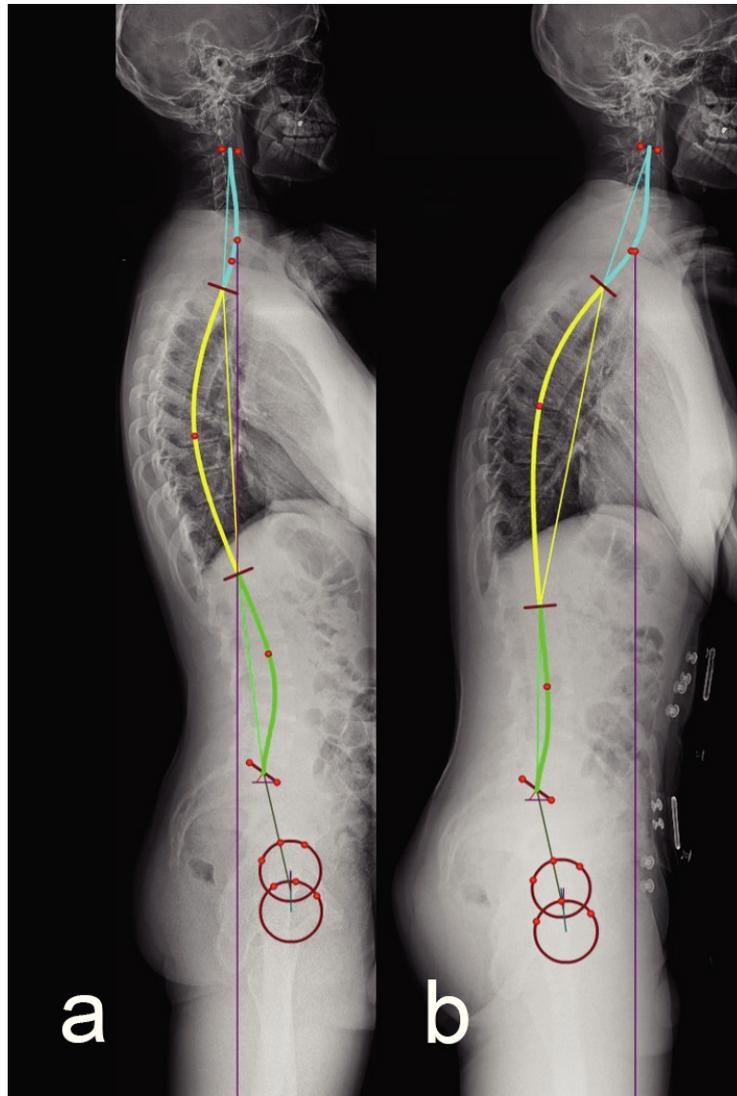


Figure 12 : Télérachis de profil réalisé sans (a) et avec corset (b).

Les clichés radiographiques étaient ensuite importés dans le logiciel Keops® (SMAIO, Lyon, France), qui est la mise à jour du logiciel Optispine® (Paris, France), précédemment validé dans la littérature pour mesurer les paramètres pelvi-rachidiens de l'équilibre sagittal [28].

Les paramètres rachidiens étaient mesurés après avoir défini la vertèbre transitionnelle (VT), correspondant au point d'inflexion entre la cyphose et la lordose. La cyphose thoracique (CT) était mesurée du plateau supérieur de T1 au plateau inférieur de VT, et la lordose lombaire (LL) du plateau supérieur de VT au plateau supérieur de S1, par la méthode de Cobb [29] (Fig. 21).

Les paramètres pelviens tel que l'incidence pelvienne (IP), la version pelvienne (VP) et la pente sacrée (PS) étaient mesurés automatiquement par Keops®.

Enfin l'équilibre sagittal était évalué par trois paramètres validés dans la littérature :

- l'**angle spino-sacré (SSA)**, défini par la droite reliant le centre du corps vertébral de C7 au milieu du plateau de S1, et la tangente au plateau sacré.
- le **rapport  $\frac{d}{D}$**  ou d représente la distance horizontale entre l'aplomb de C7 et le coin postéro-supérieur du plateau sacré. D la distance horizontale entre l'axe vertical bi-coxo-fémoral et la vertical passant par le coin postéro-supérieur du plateau sacré [22].
- la **gîte sagittal de C7 (GSC7)**, angle formé par la droite joignant le centre du corps vertébral de C7 au milieu du plateau sacré, avec la ligne verticale de référence. Sa valeur est positive quand C7 se projette en avant du milieu du plateau sacré, négative en arrière.

#### II.4. ETUDE OPTOELECTRONIQUE

Le laboratoire de la marche du CHU de Rouen est une salle rectangulaire de 12.1 mètres de long sur 6.8 mètres de large.

Il est équipé d'une plateforme de marche de 10 mètres de long sur 3 mètres de large, et d'un système optoélectronique Vicon® (VICON Motion Systems Ltd., Oxford, United Kingdom) composé par 6 caméras infra-rouges (IR).

Les caméras sont reliées entre elles par un boîtier (MX Giganet), connecté à un ordinateur via un câble Gigabit Ethernet pour le transfert des données.

Pour permettre l'analyse optoélectronique du corps entier, chaque sujet était équipé de 38 mire réfléchissantes de 25 mm de diamètre, disposées selon le « *Conventional Gait Model* ».

Cette disposition porte le nom « *Plug-In Gait Sacr* » dans le logiciel Nexus® (Biometrics Ltd. UK) (Fig. 22).

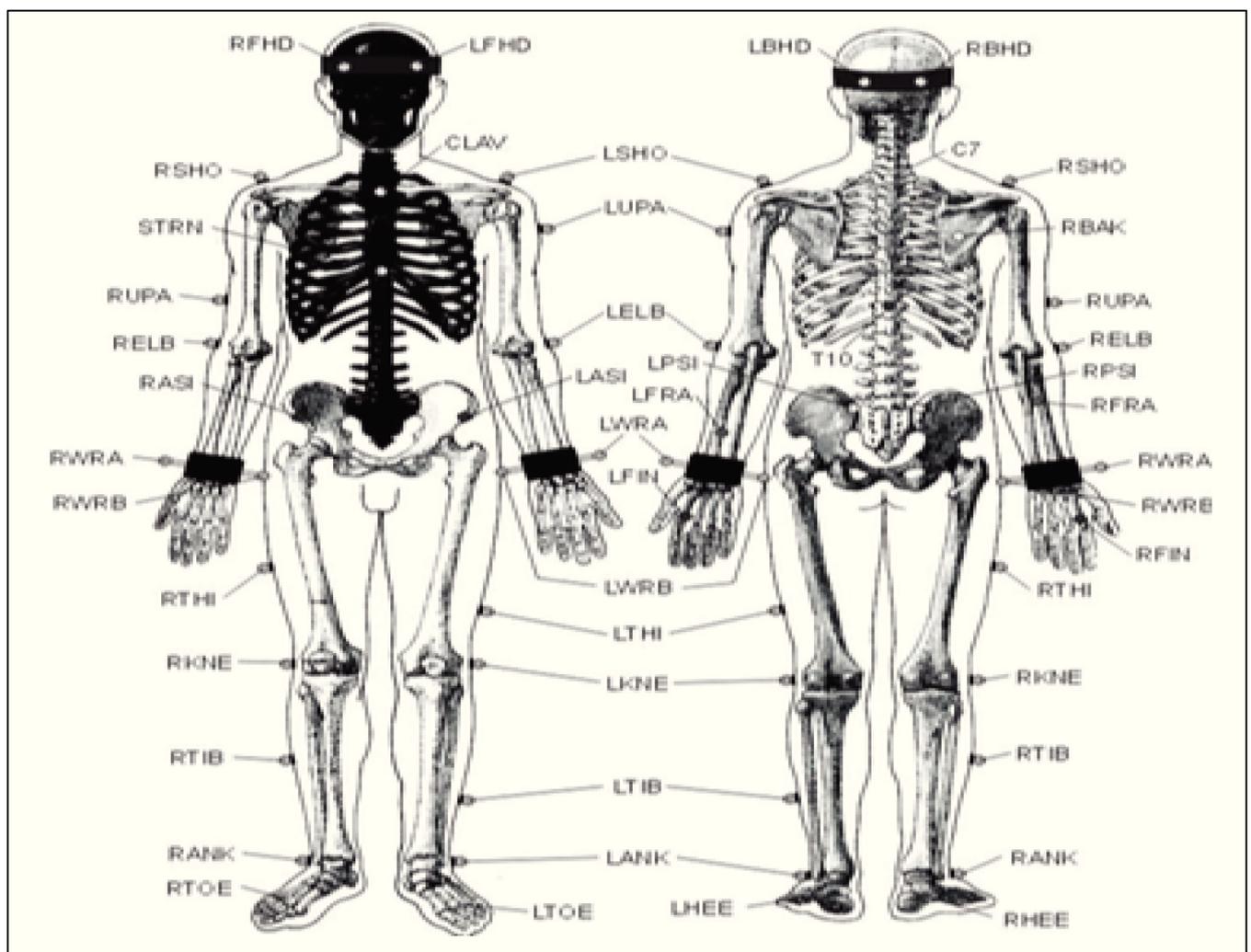


Figure 13 : disposition des mires selon le modèle « *Plug-In Gait Sacr* »

La répartition des mires, fixées à l'aide d'adhésif double face hypoallergénique, était la suivante :

- **4** mires sur la **tête**
- **5** mires sur le **tronc**
- **7** mires par **membre supérieur**
- **3** mires au **bassin**
- **6** mires par **membre inférieur**

Les données anthropométriques nécessaires à la modélisation 3D étaient ensuite recueillies (poids, taille, IMC, longueur des membres inférieurs, largeur des poignets et chevilles...) et compilées dans Nexus®.

Une procédure standardisée permettait de calibrer le système Vicon®, afin de synchroniser les 6 caméras IR, et de définir l'espace 3D d'analyse ainsi que l'ordonnée à l'origine.

Enfin les sujets se tenaient debout, immobile, en position de « T », avec les bras à 90° d'abduction, les coudes en extension et les avant-bras en pronation (Fig. 23).

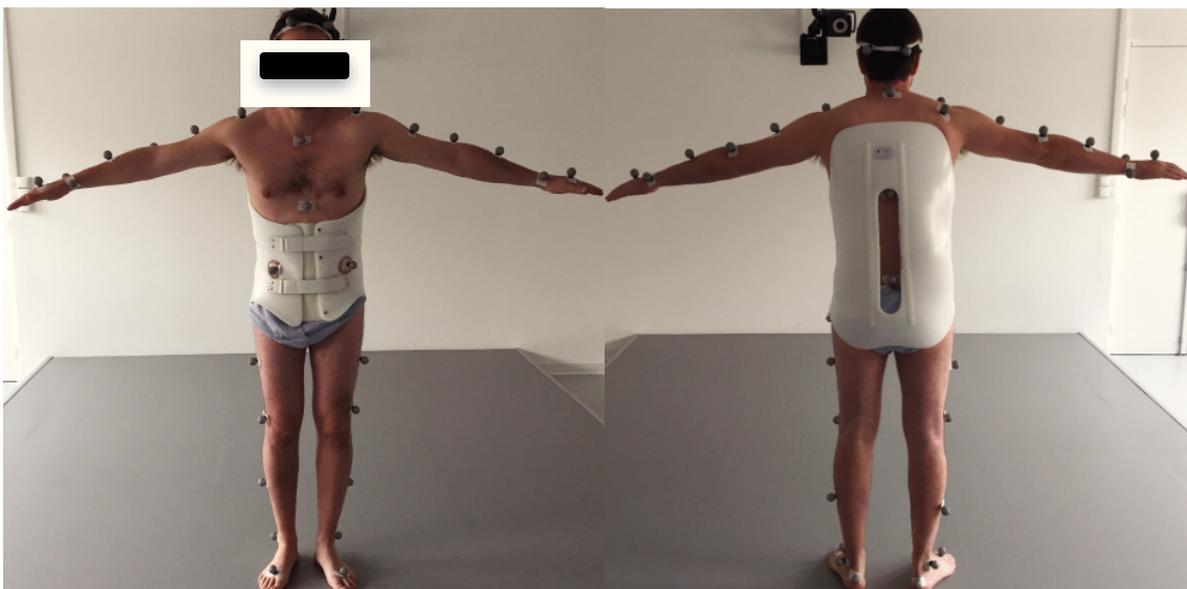
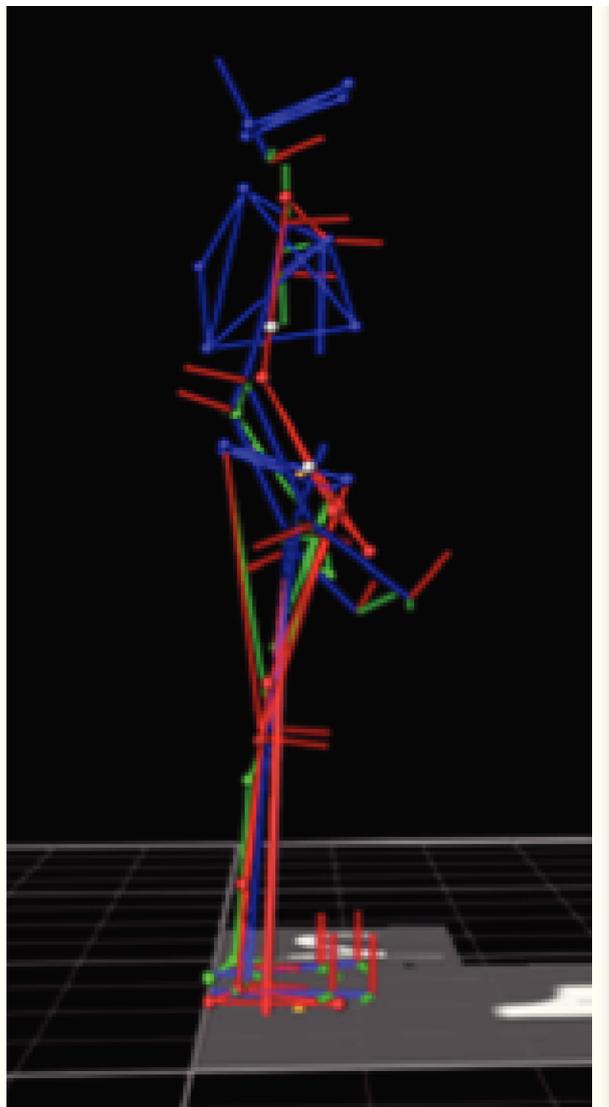


Figure 14 : Sujet immobile en position de « T », équipé du corset cyphosant et des 38 mires. On note que des fenestrations rendent visibles les mires des épines iliaques antéro-supérieur, de T1 et du sacrum.

L'étape suivante consistait à la modélisation 3D du sujet, permise par l'application Nexus® (Fig. 24).



**Figure 15 : Modélisation 3D du sujet sous Nexus®**

Chaque mire était labélisée manuellement sur le modèle 3D à partir d'une liste auto-incrémentée. Cette étape autorisait le calcul des centres articulaires de chaque segment du corps, pour réaliser ensuite des enregistrements dynamiques (Fig. 25).

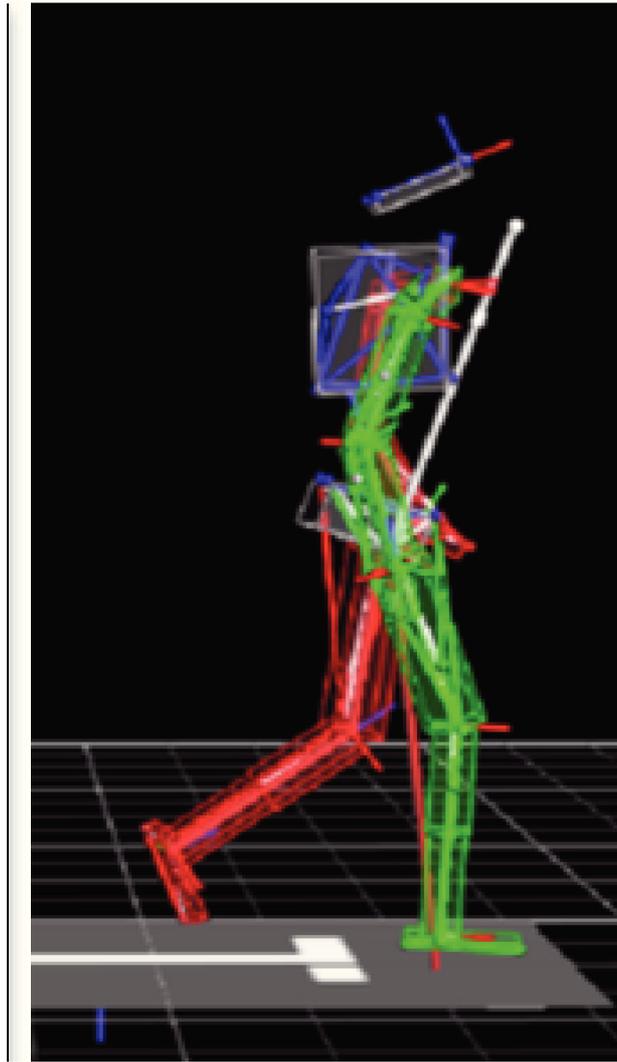


Figure 16 : Modélisation 3D et détermination des centres articulaires

Puis l'ensemble des données étaient exportées vers le logiciel Polygon® (Biometrics Ltd. UK) pour évaluer l'équilibre sagittal. Il s'agit d'une application permettant de réaliser des mesures automatiques à partir du modèle 3D réalisé sous Nexus®. Ainsi une infinité de paramètres cinétiques et cinématiques couramment utilisés dans l'analyse de la marche sont automatiquement calculés.

L'équilibre sagittal global n'ayant jamais fait l'objet d'analyse préalable par le système Vicon®, 3 paramètres optoélectroniques ont été choisis arbitrairement pour l'apprécier le plus précisément possible (Fig. 26) :

-**Angle Spinal (SA)** : calculé automatiquement par l'application Polygon®. Il résulte de la modélisation de l'angle sagittal thoracique référencé au plan pelvien.

-**C7 – T10 – S1** : angle entre les segments C7-T10 et T10-S1. Chaque segment étant défini par deux marqueurs.

-**|C7'S1'|** : distance au sol de la projection verticale du vecteur  $\overrightarrow{C7S1}$ . Autrement dit, |C7'S1'| est la norme de  $\overrightarrow{C7S1}$ .

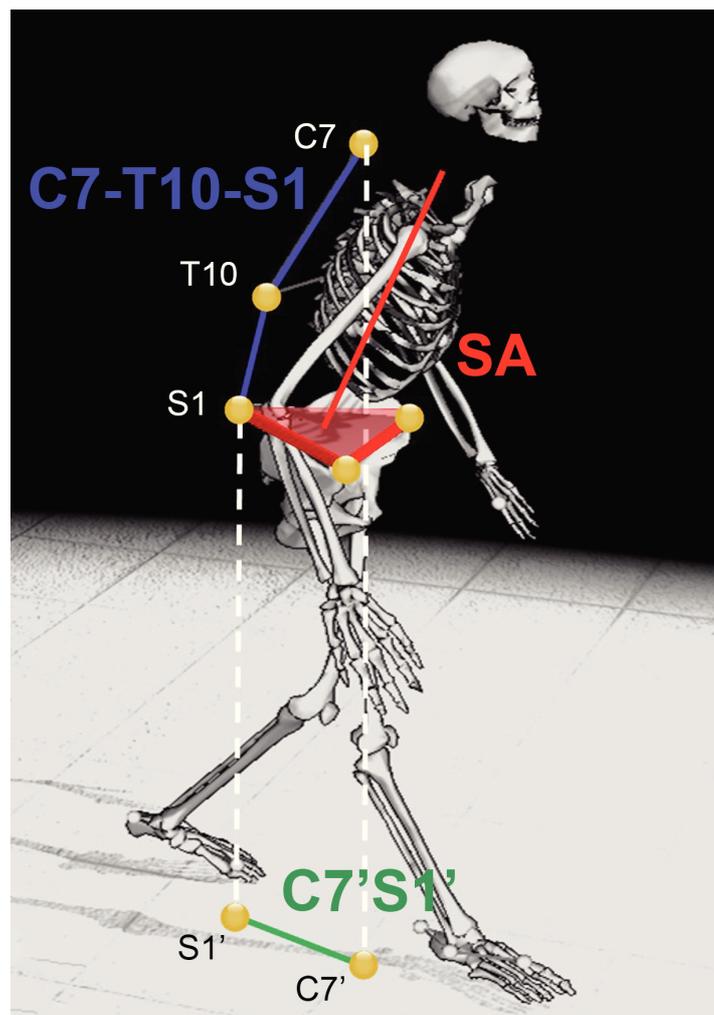


Figure 17 : Représentation des 3 paramètres optoélectroniques sur une modélisation 3D réalisée avec le logiciel Polygon®.

Les paramètres radiographiques pelviens (IP, VP, PS) et rachidiens (CT, LL, GSC7, SSA, d/D), ainsi que les paramètres optoélectroniques, étaient calculés pour chaque sujet dans les situations avec et sans corset.

## II.5. ANALYSE STATISTIQUE

L'analyse statistique était réalisée avec le logiciel Prism® 6.0 (GraphPad, San Diego, California).

Les moyennes et les déviations standards étaient utilisées pour décrire les paramètres quantitatifs.

L'analyse statistique était conduite en trois étapes :

- Une première analyse descriptive des paramètres radiographiques et optoélectroniques était réalisée. Chaque paramètre était évalué en situation avec et sans corset.
- Une analyse comparative avec le test des rangs signés de Wilcoxon, recherchait l'existence de différence dans les paramètres radiographiques et optoélectroniques induites par le port du corset.
- Enfin, un test de corrélation de Spearman comparait les variations des paramètres radiographiques, avec les variations des paramètres optoélectroniques.

Le seuil de significativité retenu était une valeur de p inférieure à 0.05.

## III- RESULTATS

### III.1. POPULATION

Vingt-quatre volontaires sains et asymptomatiques sur le plan rachidien ont été inclus dans cette étude. L'âge moyen était de  $28.3 \pm 3.9$  ans (Tableau 1).

L'IMC moyen était de  $24.7 \pm 1.3$  kg/m<sup>2</sup>.

Aucun évènement indésirable lié à la marche ou au port du corset n'est survenu.

<b>Données épidémiologiques</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>
<b>Nombre de volontaire (N)</b>	24	
<b>Age (années)</b>	28.3	3.9
<b>Taille (cm)</b>	175	4
<b>Poids (kg)</b>	75	5
<b>IMC (kg/m<sup>2</sup>)</b>	24.7	1.3

Tableau 1 : Données épidémiologiques de la population

### III.2. ANALYSE RADIOGRAPHIQUE

Quarante-huit télérachis de profil ont été analysés avec le logiciel Keops® (24 radiographies avec corset et 24 radiographies sans corset).

Le tableau 2 expose les paramètres spino-pelviens avec leurs moyennes et écart types.

#### III.2.1 Paramètres radiographiques pelviens

La moyenne de l'incidence pelvienne (IP) était de  $64.4^\circ \pm 17.8$  et n'était pas modifiée par le port du corset. La version pelvienne, ainsi que la pente sacrée n'étaient pas modifiées de façon significative par la présence du corset ( $p=0.84$  et  $0.79$  respectivement).

### III.2.2 Paramètres radiographiques rachidiens

La lordose lombaire se trouvait significativement diminuée en présence du corset, passant de 66.3° à 48.8° en moyenne.

La cyphose thoracique n'était pas modifiée de manière significative par le port du corset (p=0.18).

### III.2.3 Paramètres radiographiques de l'équilibre sagittal global

L'équilibre global sagittal se trouvait significativement modifié en présence du corset.

Ainsi la gîte sagittale de C7 (GSC7) et le rapport d/D augmentaient en moyenne de 15°± 7.4 (p<0.001) et 359% (p<0.001) respectivement.

L'angle spino-sacré (SSA) diminuait significativement de 16.8° ± 8° (p<0.001).

Paramètres pelvi-rachidiens	Moyenne sans corset (ET)	Moyenne sans corset (ET)	Différence des moyennes	p
IP (°)	64.4 (16.8)	64.6 (17.4)	0.2 (2.8)	NS
VP (°)	17.7 (8.9)	17.6 (8.5)	-0.1 (3.4)	NS
PS (°)	46.7 (10.1)	47 (11)	0.3 (5)	NS
CT (°)	44.2 (10.6)	48.9 (10.8)	4.7 (10.0)	NS
LL (°)	66.3 (11.8)	48.8 (16.2)	-17.5 (12.4)	<0.001
GSC7 (°)	1.9 (1.4)	16.9 (6.7)	15 (7.4)	<0.001
SSA (°)	136.9 (10.5)	120.1 (12.8)	-16.8 (8)	<0.001
d/D (%)	28 (61.8)	388 (195.2)	360 (160)	<0.001

Tableau 2 : Variations des paramètres radiographiques pelvi-rachidiens

### III.3. ANALYSE OPTOELECTRONIQUE

Les trois paramètres optoélectroniques choisis de manière arbitraire, étaient significativement modifiés en présence du corset (Tableau 3).

L'angle Spinal (SA) augmentait de  $15^{\circ} \pm 5.6$  ( $p < 0.001$ ), et la distance C7'S1' de  $126.3\text{mm} \pm 51.9$  ( $p < 0.001$ ).

L'angle C7 –  $\widehat{T10}$  – S1 diminuait en moyenne de  $9.8^{\circ} \pm 3$  ( $p < 0.001$ ).

Paramètres pelvi-rachidiens	Moyenne sans corset	Moyenne avec corset	Différence des moyennes	p
C7-T10-S1 (°)	167.6 (8.4)	157.8 (8.6)	-9.8 (3.0)	<0.001
SA (°)	4.5 (13.5)	19.8 (14.9)	15.3 (5.6)	<0.001
C7'S1' (mm)	36.4 (26.2)	162.7(52.7)	126.3 (51.9)	<0.001

Tableau 3 : Variations des paramètres optoélectroniques pelvi-rachidiens

### III.4 CORRELATIONS RADIO-OPTOELECTRONIQUES

Afin de rechercher une relation entre les paramètres radiographiques et les trois paramètres optoélectroniques choisis arbitrairement pour analyser l'équilibre sagittal, une corrélation de Spearman confrontait les variations de ces paramètres (Tableau 4).

Seule les variations du paramètre optoélectronique C7'S1' étaient significativement corrélées aux variations du paramètre radiographique GSC7 ( $\rho = 0.636$  ;  $p < 0.05$ ).

Les variations des paramètres optoélectroniques C7 –  $\widehat{T10}$  – S1 et SSA n'étaient pas corrélées aux variations des paramètres radiographiques.

Spearman (p = 0.05)	$\Delta$ SSA	$\Delta$ d/D	$\Delta$ C7'S1'	$\Delta$ C7-T10-S1	$\Delta$ SA
$\Delta$ GSC7	-0,636	0,72	<b>0,636</b>	NS	NS
$\Delta$ SSA		NS	NS	NS	NS
$\Delta$ d/D			0,580	NS	NS
$\Delta$ C7'S1'				NS	NS
$\Delta$ C7-T10-S1					0,154

Tableau 4 : Corrélation entre les variations des paramètres radiographiques et les variations des paramètres optoélectroniques

## IV-DISCUSSION

L'analyse de l'équilibre sagittal pelvi-rachidien est la clé de voute du diagnostic et de la prise en charge thérapeutique de la plupart des affections rachidiennes. Actuellement, elle repose exclusivement sur des critères radiographiques obtenus sur des clichés type télérachis de profil [30]. Par conséquent, elle n'évalue que l'aspect statique de l'axe spino-pelvien à un instant T. Or cette représentation statique ponctuelle n'est probablement qu'un reflet incomplet du rachis qui est une structure intrinsèquement dynamique.

A partir de cette hypothèse, il est paru pertinent de tester les capacités de technologies optoélectroniques pour l'analyse dynamique du rachis.

### IV.1. JUSTIFICATION DU MODELE D'ETUDE

De nombreuses publications ont étudiées le cycle de la marche avec le système Vicon® et ont permis de mettre en évidence des facteurs de risque de chute [18-20].

Le déséquilibre sagittal antérieur est décrit comme une évolution naturelle inhérente aux affections rachidiennes, quelque soient leurs étiologies. Les répercussions des troubles posturaux du rachis sur la marche méritent d'être évalués, mais les outils dédiés restent à valider. Le déséquilibre sagittal antérieur pelvi-rachidien est à ce titre un sujet d'intérêt.

Le choix d'étudier des sujets sains repose sur la nécessité d'exclure des facteurs confondants pouvant modifier la marche pour leur propre compte. Les lombalgies ou les radiculalgies fréquemment associées aux pathologies rachidiennes en sont le témoin. Le choix du corset cyphosant est lié à sa capacité à créer la déformation souhaitée de façon réversible et donc non invasive. La confirmation et la quantification du déséquilibre induit ont été confirmées par une analyse radiographique (Tableau 2).

La modification exclusive et réversible de l'équilibre sagittal spino-pelvien, a permis une observation intra-individuelle, puisque chaque sujet devenait son propre témoin.

Aucun problème technique n'a été rencontré en utilisant le corset, et grâce aux fenêtres la position des marqueurs n'était pas modifiée par son retrait. L'absence de douleurs et

le caractère immédiatement réversible de la cyphose conduisent à considérer la méthode comme efficace et non invasive.

## IV.2. EQUILIBRE SAGITTAL OPTOELECTRONIQUE

Les modifications significatives de la GSC7 mise en évidence par l'étude radiographique ont confirmé la capacité du corset cyphosant à induire un déséquilibre sagittal antérieur. Dans notre série la GSC7 moyenne en présence du corset ( $16.9^\circ \pm 6.7$ ) devenait supérieure à la moyenne plus deux déviations standards rapportée par Mac Thiong sur une cohorte de 709 sujets asymptomatiques sur le plan rachidien ( $0.1^\circ \pm 1.9$ ) [34].

Parmi les trois paramètres optoélectroniques sélectionnés pour l'analyse dynamique du secteur spino-pelvien,  $C7 - \widehat{T10} - S1$  et SA reflètent la courbure sagittale rachidienne globale, tandis que  $C7'S1'$  reflète la gîte sagittale de C7.

Des variations significatives induites par le corset ont été mises en évidence pour ces trois paramètres optoélectroniques, et les variations de  $C7'S1'$  étaient hautement corrélées aux variations radiographiques de la GSC7. Ces résultats incitent à réaliser d'autres études en utilisant ces trois paramètres.

L'analyse optoélectronique de l'équilibre sagittal global n'a pas encore été rapportée dans la littérature, et l'utilisation du système Vicon® au travers de ces trois paramètres optoélectroniques paraît adapté à l'évaluation dynamique de l'équilibre spino-pelvien.

L'étude dynamique des paramètres segmentaires impliqués dans les mécanismes de compensation du déséquilibre sagittal antérieur, telle l'hypo-cyphose thoracique, l'hyper-lordose lombaire ou la rétroversion pelvienne [35], se révèle accessible avec cet outil, et constitue un nouveau champs de recherche. De même le système Vicon® permet l'analyse du secteur sous-pelvien, et pourrait évaluer l'influence d'un flexum des genoux ou des hanches sur la marche. Toutefois la version pelvienne optoélectronique ne s'est pas significativement modifiée dans cette étude. Ce phénomène était pourtant attendu. Il peut s'agir d'un manque de puissance statistique de l'effectif mais peut-être aussi d'un écueil de la méthode. Effectivement les mires sont fixées sur des repères cutanés qui ne suivent peut-être pas fidèlement les mouvements du bassin osseux.

Par ailleurs, le port du corset pendant la marche a induit des variations significatives des paramètres optoélectroniques C7 – T10 – S1, SA et C7'S1' (Tableau 4). Cependant les oscillations de ses paramètres durant la marche, était moins amples en présence du corset, ce qui reflète probablement la raideur thoraco-lombaire induite par ce dernier (Fig. 27).

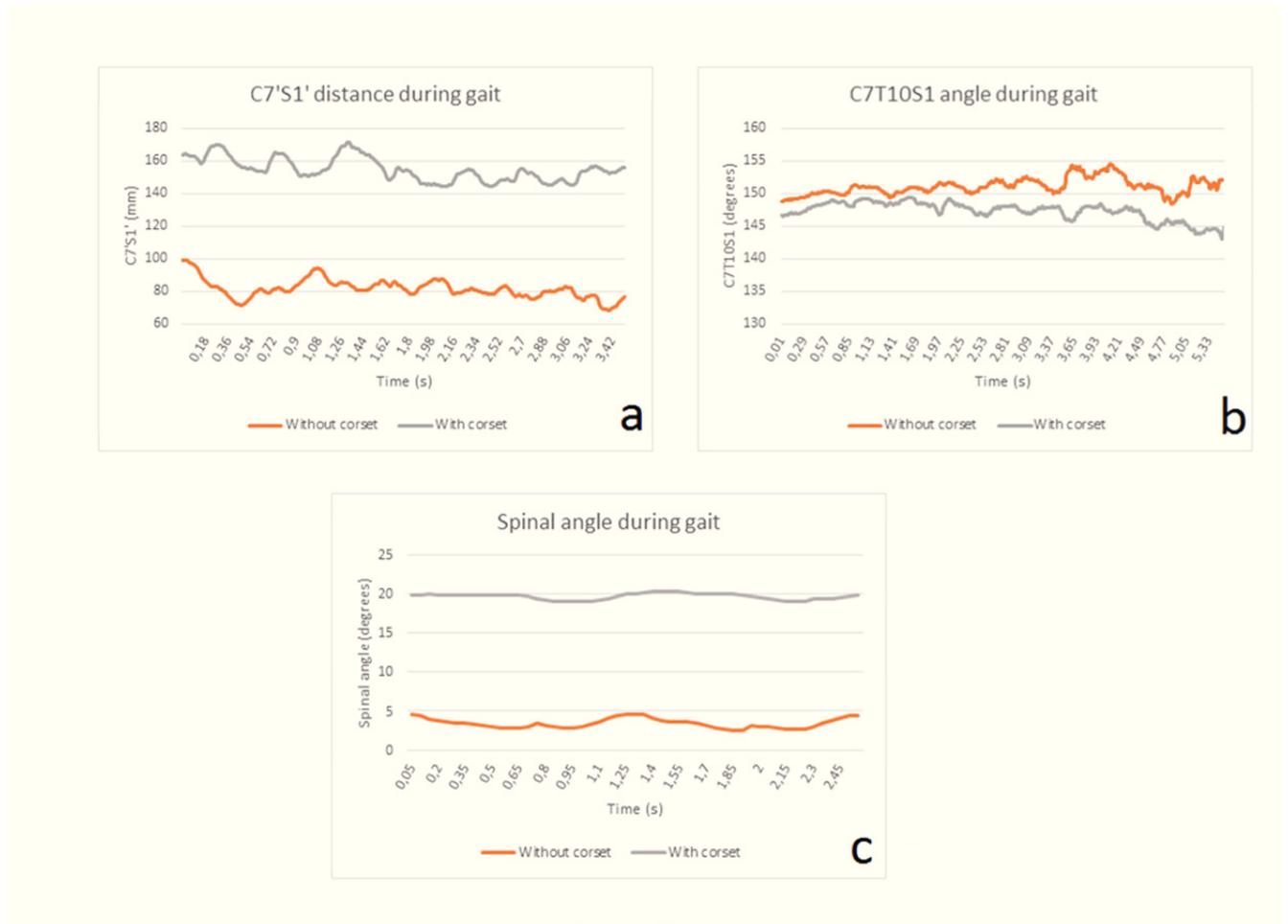


Figure 18 : Oscillation des 3 paramètres optoélectroniques au cours de la marche. (a): distance C7'S1'; (b): angle C7-T10-S1; et (c): Angle spinal.

### IV.3. PERSPECTIVES

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer les capacités du système Vicon® à détecter un déséquilibre sagittal global pelvirachidien. L'analyse segmentaire des paramètres optoélectroniques pelviens et rachidiens et leurs interactions sur l'équilibre sagittal global nécessite une cohorte plus importante.

L'influence du déséquilibre sagittal antérieur sur les paramètres cinétiques et cinématiques de la marche pourrait également être évaluée afin d'identifier des facteurs de risques de chute [23–25]. Une analyse du freinage actif du centre de gravité en seconde partie de phase oscillante, en présence et en l'absence de corset cyphosant pourrait en ce sens être informative. En effet, dans une population de parkinsoniens, Chastan et al.[39] montrent que les patients conservant un freinage actif du centre de gravité durant la phase oscillante de la marche, présentent moins de troubles posturaux et de troubles de la marche que les autres.

Les trois paramètres optoélectroniques étudiés dans cette série, et plus particulièrement C7'S1', permettent d'analyser les troubles de l'équilibre sagittal et leur retentissement sur la marche.

Les données radiographiques issues des clichés sans corset, sont comparables aux valeurs physiologiques retrouvées dans des larges cohortes de sujets asymptomatiques [40]. Ceci est rendu possible par l'inclusion de volontaires asymptomatiques sur le plan rachidien.

Une cohorte de plus grand effectif, permettrait de déterminer les valeurs seuils des 3 paramètres optoélectroniques.

A l'extrême, l'évaluation clinique, la planification thérapeutique et le suivi des pathologies rachidiennes, pourraient être confiés à une analyse optoélectronique. Ainsi une analyse quantifiée posturale dynamique serait disponible sans exposition aux radiations ionisantes. Des notions complémentaires aux données radiographiques permettraient alors d'affiner les planifications thérapeutiques. De même, l'impact des arthrodèses rachidiennes sur la cinématique de la marche ouvre un champ d'applications considérable.

#### IV.4. LIMITES

Le faible nombre de volontaires inclus dans ce travail ne permet pas d'extrapoler les résultats au niveau de la démonstration. Toutefois chaque sujet était enregistré pour plusieurs passages sur la piste de marche afin d'obtenir une moyenne plus représentative et d'enrichir le recueil de données.

Il est probable que le corset limite certains mouvements du tronc impliqués dans le déroulement physiologique de la marche ; et qu'il perturbe ainsi son analyse dynamique [41]. Cependant l'amplitude des mouvements du tronc est très certainement diminuée dans la plupart des pathologies rachidiennes souvent douloureuses et ou ankylosantes.

Par soucis de radioprotection, les volontaires inclus étaient tous des hommes. A priori un tel choix n'induit pas de biais de sélection, puisque comme l'ont démontré Mac Thiong et Roussouly [33], il n'existe pas de différence pour les paramètres radiographiques étudiés entre les sexes.

Pour s'affranchir des processus dégénératifs liés à l'âge, seul des volontaires très jeunes ont été inclus dans l'étude, comme en atteste la moyenne d'âge ( $28.3 \pm 3.9$  ans). La population étudiée n'est donc pas représentative de la population générale.

Néanmoins cette étude préliminaire a permis de valider le modèle expérimental de déséquilibre sagittal antérieur. En effet le corset permet d'induire un déséquilibre antérieur réversible, détectable par une méthode optoélectronique non invasive.

## V-CONCLUSION

Le corset amovible permet d'entraîner un déséquilibre sagittal antérieur réversible et quantifiable radiologiquement. L'analyse d'une telle déformation est possible avec le système Vicon®, en particulier grâce au paramètre optoélectronique C7'S1', dont les variations sont hautement corrélées aux variations du paramètre radiographique GSC7.

**Conflit d'intérêt :** Aucun.

## V-BIBLIOGRAPHIE

- [1] Alain Beauvilain, 'Toumaï : l'aventure humaine, Paris, La Table Ronde, 2003, 239 p',.
- [2] Ann Gibbons, 'The first human : the race to discover our earliest ancestors, New York, Doubleday, 2006, 306 p', .
- [3] 'Dujardin F., Polle G., Lhermette M., Tourny C. Analyse de la marche et coxarthrose primitive de hanche Rev. Chir. Orthop. 2005 ; 91 (suppl2) : 2S190-2S191'.
- [4] E. Watelain, F. Dujardin, F. Babier, D. Dubois, and P. Allard, 'Pelvic and lower limb compensatory actions of subjects in an early stage of hip osteoarthritis', *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 82, no. 12, pp. 1705–1711, Dec. 2001.
- [5] F. Dujardin, T. Aucouturier, G. Bocquet, F. Duparc, J. Weber, and J. M. Thomine, '[Kinematics of the healthy and arthritic hip joint during walking. A study of 136 subjects]', *Rev. Chir. Orthopédique Réparatrice Appar. Mot.*, vol. 84, no. 8, pp. 689–699, Nov. 1998.
- [6] C. O. Lovejoy, 'The natural history of human gait and posture. Part 1. Spine and pelvis', *Gait Posture*, vol. 21, no. 1, pp. 95–112, Jan. 2005.
- [7] C. O. Lovejoy, 'The natural history of human gait and posture', *Gait Posture*, vol. 21, no. 1, pp. 113–124, Jan. 2005.
- [8] E. M. Laassel, P. Loslever, and J. C. Angue, 'Patterns of relations between lower limb angle excursions during normal gait', *J. Biomed. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 313–320, Jul. 1992.
- [9] J. A. Buckwalter *et al.*, 'Soft-tissue aging and musculoskeletal function', *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 75, no. 10, pp. 1533–1548, Oct. 1993.
- [10] J.-Y. Lazennec, A. Brusson, and M.-A. Rousseau, 'Hip–spine relations and sagittal balance clinical consequences', *Eur. Spine J.*, vol. 20, no. S5, pp. 686–698, Sep. 2011.
- [11] G. Duval-Beaupère, C. Schmidt, and P. Cosson, 'A Barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position', *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 451–462, 1992.
- [12] J. Legaye, G. Duval-Beaupère, J. Hecquet, and C. Marty, 'Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves', *Eur. Spine J.*, vol. 7, no. 2, pp. 99–103, 1998.
- [13] J.-C. Le Huec, A. Faundez, D. Dominguez, P. Hoffmeyer, and S. Aunoble, 'Evidence showing the relationship between sagittal balance and clinical outcomes in surgical treatment of degenerative spinal diseases: a literature review', *Int. Orthop.*, vol. 39, no. 1, pp. 87–95, Jan. 2015.
- [14] A. L. Simon, B. Ilharreborde, P. Souchet, and K. R. Kaufman, 'Dynamic balance assessment during gait in spinal pathologies – A literature review', *Orthop. Traumatol. Surg. Res.*, vol. 101, no. 2, pp. 235–246, Apr. 2015.
- [15] C. Barrey, P. Roussouly, J.-C. Le Huec, G. D'Acunzi, and G. Perrin, 'Compensatory mechanisms contributing to keep the sagittal balance of the spine', *Eur. Spine J. Off. Publ. Eur. Spine Soc. Eur. Spinal Deform. Soc. Eur. Sect. Cerv. Spine Res. Soc.*, vol. 22 Suppl 6, pp. S834-841, Nov. 2013.
- [16] J. H. Lin, Y. L. Chou, M. S. Ju, and Y. T. Sung, '[Application and evaluation of the VICON system in gait analysis]', *Gaoxiong Yi Xue Ke Xue Za Zhi*, vol. 6, no. 1, pp. 6–11, Jan. 1990.
- [17] B. Westhoff, M. A. Hirsch, H. Hefter, A. Wild, and R. Krauspe, '[How reliable are data from 3d-gait analysis]', *Sportverletz. Sportschaden Organ Ges. Für Orthop.-Traumatol. Sportmed.*, vol. 18, no. 2, pp. 76–79, Jun. 2004.
- [18] H. Tsushima, M. E. Morris, and J. McGinley, 'Test-retest reliability and inter-tester reliability of kinematic data from a three-dimensional gait analysis system', *J. Jpn. Phys. Ther. Assoc. Rigaku Ryōhō*, vol. 6, no. 1, pp. 9–17, 2003.

- [19] Franck Dujardin : Professeur des Universités, praticien hospitalier, chirurgie orthopédique, Jacques Weber : Professeur des Universités, praticien hospitalier, physiologie, chef du service de neurophysiologie, and Groupe de recherche sur le handicap de l'appareil locomoteur (GRHAL) France., 'Anatomie et physiologie de la marche, des positions assise et debout'.
- [20] J. Dubousset, '[CD instrumentation in pelvic tilt]', *Orthop.*, vol. 19, no. 5, pp. 300–308, Sep. 1990.
- [21] G. Duval-Beaupère, C. Schmidt, and P. Cosson, 'A Barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position', *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 451–462, 1992.
- [22] C. Barrey, J. Jund, G. Perrin, and P. Roussouly, 'Spinopelvic alignment of patients with degenerative spondylolisthesis', *Neurosurgery*, vol. 61, no. 5, p. 981–986; discussion 986, Nov. 2007.
- [23] F. Dujardin, O. Selva, O. Mejjad, D. Pasero, J. L. Piraux, and J. M. Thomine, '[Intra and interindividual variations of pelvic mobility in normal adult walk]', *Rev. Chir. Orthopédique Réparatrice Appar. Mot.*, vol. 81, no. 7, pp. 592–600, 1995.
- [24] M. Nissan and M. W. Whittle, 'Initiation of gait in normal subjects: a preliminary study', *J. Biomed. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 165–171, Mar. 1990.
- [25] 'Whittle M. Gait analysis, an introduction. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1991', .
- [26] 'Dujardin F., Roussignol X., Mejjad O., Weber J., Thomine J.M. Interindividual variations of the hip motion in normal gait *Gait Posture* 1997 ; 5 : 246-250'.
- [27] 'Dujardin F. Étude de la marche au laboratoire. Implications et perspectives cliniques Cahier d'enseignement de la SOFCOT n°62 . Conférences d'enseignement Paris: Expansion Scientifique Publications (1997). 281-298'.
- [28] L. Rillardon *et al.*, '[Validation of a tool to measure pelvic and spinal parameters of sagittal balance]', *Rev. Chir. Orthopédique Réparatrice Appar. Mot.*, vol. 89, no. 3, pp. 218–227, May 2003.
- [29] Cobb JR., 'Outline for the study of scoliosis. The American Academy of Orthopedic Surgeons Instructional Course Lectures. Vol. 5. ', Ann Arbor, MI.
- [30] J. C. Le Huec, R. Saddiki, J. Franke, J. Rigal, and S. Aunoble, 'Equilibrium of the human body and the gravity line: the basics', *Eur. Spine J. Off. Publ. Eur. Spine Soc. Eur. Spinal Deform. Soc. Eur. Sect. Cerv. Spine Res. Soc.*, vol. 20 Suppl 5, pp. 558–563, Sep. 2011.
- [31] R. L. Wright, D. M. Peters, P. D. Robinson, A. J. Sitch, T. N. Watt, and M. A. Hollands, 'Differences in axial segment reorientation during standing turns predict multiple falls in older adults', *Gait Posture*, vol. 36, no. 3, pp. 541–545, Jul. 2012.
- [32] G. J. Chapman and M. A. Hollands, 'Evidence for a link between changes to gaze behaviour and risk of falling in older adults during adaptive locomotion', *Gait Posture*, vol. 24, no. 3, pp. 288–294, Nov. 2006.
- [33] J. Liang, C. C. Abbott, M. Skubic, and J. Keller, 'Investigation of gait features for stability and risk identification in elders', *Conf. Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Conf.*, vol. 2009, pp. 6139–6142, 2009.
- [34] J.-M. Mac-Thiong, P. Roussouly, É. Berthonnaud, and P. Guigui, 'Sagittal parameters of global spinal balance: normative values from a prospective cohort of seven hundred nine Caucasian asymptomatic adults', *Spine*, vol. 35, no. 22, pp. E1193–E1198, 2010.
- [35] C. Barrey, P. Roussouly, J.-C. Le Huec, G. D'Acunzi, and G. Perrin, 'Compensatory mechanisms contributing to keep the sagittal balance of the spine', *Eur. Spine J.*, vol. 22, no. S6, pp. 834–841, Nov. 2013.
- [36] M. Sinaki, R. H. Brey, C. A. Hughes, D. R. Larson, and K. R. Kaufman, 'Balance disorder and increased risk of falls in osteoporosis and kyphosis: significance of kyphotic

- posture and muscle strength', *Osteoporos. Int.*, vol. 16, no. 8, pp. 1004–1010, Aug. 2005.
- [37] S. Imagama *et al.*, 'Influence of spinal sagittal alignment, body balance, muscle strength, and physical ability on falling of middle-aged and elderly males', *Eur. Spine J.*, vol. 22, no. 6, pp. 1346–1353, Jun. 2013.
- [38] C. W. L. Almeida, C. H. M. Castro, P. G. Pedreira, R. E. Heymann, and V. L. Szejnfeld, 'Percentage height of center of mass is associated with the risk of falls among elderly women: A case-control study', *Gait Posture*, vol. 34, no. 2, pp. 208–212, Jun. 2011.
- [39] N. Chastan *et al.*, 'Gait and balance disorders in Parkinson's disease: impaired active braking of the fall of centre of gravity', *Mov. Disord. Off. J. Mov. Disord. Soc.*, vol. 24, no. 2, pp. 188–195, Jan. 2009.
- [40] P. Roussouly, S. Gollogly, E. Berthonnaud, and J. Dimnet, 'Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position', *Spine*, vol. 30, no. 3, pp. 346–353, Feb. 2005.
- [41] C. P. Hurt, N. Rosenblatt, J. R. Crenshaw, and M. D. Grabiner, 'Variation in trunk kinematics influences variation in step width during treadmill walking by older and younger adults', *Gait Posture*, vol. 31, no. 4, pp. 461–464, Apr. 2010.
- [42] J.-M. Mac-Thiong, P. Roussouly, é. Berthonnaud, and P. Guigui, 'Age- and sex-related variations in sagittal sacropelvic morphology and balance in asymptomatic adults', *Eur. Spine J.*, vol. 20, no. S5, pp. 572–577, Sep. 2011.