

Université de Montréal

Morphologie tridimensionnelle du bassin scoliothique

par

Camila Santucci Ribeiro

Département de Kinésiologie

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'activité physique

Octobre, 2013

© Camila Santucci Ribeiro, 2013

Résumé

La scoliose idiopathique de l'adolescence (SIA) est une déformation tridimensionnelle de la colonne vertébrale et de la cage thoracique dont la cause est inconnue. Il semble que la ceinture pelvienne soit impliquée dans la pathogénie de la SIA, car des différences géométriques des os coxaux ont été observées. Notamment, une rotation du bassin ou une inclinaison latérale dans le sens de la courbe scoliotique ont été mises en évidence en plus des distorsions osseuses. Il est difficile de dissocier la rotation du bassin de son asymétrie, car la majorité des études porte sur des données radiologiques bidimensionnelles. Une analyse tridimensionnelle de la morphologie du bassin de patientes ayant une SIA, mais n'ayant pas reçu de traitement par corset ou chirurgie permettrait d'identifier le rôle du bassin dans la progression de la scoliose.

Dix-sept jeunes filles atteintes de la SIA ont participé à cette étude pour lesquelles des radiographies bi-planaires en station debout étaient disponibles au moment du diagnostic par un chirurgien orthopédiste pédiatrique et à l'instant de la prescription d'un corset. Des radiographies postéro-antérieures et latérales avaient été prises au moyen du système EOS®. Douze repères anatomiques du bassin ont été identifiés sur les paires de radiographies, alors que quatre repères ont été identifiés sur la radiographie postéro-antérieure uniquement. Ces quatre derniers n'étaient pas identifiables sur la radiographie latérale à cause de la superposition des repères droits et gauches. La reconstruction tridimensionnelle du bassin a été réalisée à partir de deux clichés radiographiques des 12 premiers repères osseux. Au total, neuf paramètres tridimensionnels ont été calculés afin de quantifier l'asymétrie et la distorsion du bassin entre les deux temps donnés. Des paramètres bidimensionnels ont également été mesurés sur les quatre derniers repères osseux afin de documenter des déformations du bassin pertinentes à la pratique clinique, telle que la rotation axiale de celui-ci. Dans le but d'évaluer une possible asymétrie entre les os coxaux du bassin, les paramètres tridimensionnels du bassin gauche ont été comparés à ceux du côté droit à chaque temps, au moyen d'un test-*t* pour échantillon apparié. La morphologie pelvienne a été également évaluée par l'analyse multivariée (MANOVA) à mesures répétées à deux conditions (côté*temps). En conséquence, nous avons constaté une croissance osseuse statistiquement significative du bassin dans

l'intervalle de temps entre le diagnostic de la scoliose et le port du corset ($p=0,033$). Une asymétrie significative entre les côtés gauche et droit du bassin ($p=0,013$) a également été constatée. En ce qui concerne les paramètres bidimensionnels, nous avons constaté une augmentation de la version pelvienne ($p=0,024$) au cours de la croissance des jeunes filles. Finalement, le bassin n'a pas présenté de distorsion, puisqu'une valeur de p de 0,763 a été observée.

En conclusion, la croissance des jeunes filles atteintes de la scoliose idiopathique de l'adolescence est accompagnée d'une asymétrie morphologique entre les deux os coxaux du bassin. Cette asymétrie constatée au moment du diagnostic de la scoliose des filles a évolué jusqu'à l'instant où le port du corset a été prescrit. Quant aux paramètres bidimensionnels, nous pouvons conclure que la rotation du bassin vers l'arrière a augmenté au cours de la croissance des jeunes filles, produisant ainsi une rétroversion pelvienne dans le plan sagittal. La distorsion tridimensionnelle du bassin n'a toutefois pas été observée au cours de la croissance des jeunes filles.

Mots-clés : Scoliose idiopathique de l'adolescence, bassin, morphologie tridimensionnelle, asymétrie, rotation, distorsion.

Abstract

Adolescent idiopathic scoliosis (AIS) is a three-dimensional deformation of the spine and rib cage of unknown cause. It seems that the pelvis is involved in the pathogenesis of the AIS because geometric differences in the hip bones were observed. A pelvic rotation or a lateral tilt in the direction of the scoliotic curve was observed in addition to bone distortions. It is difficult to separate the pelvic rotation from its asymmetry since most studies are based on bi-dimensional radiologic data. A three-dimensional analysis of the pelvis morphology in patients with AIS, but no brace treatment nor surgery could better define the role of pelvis in the progression of the scoliosis.

Seventeen young girls with AIS have participated in this study. Standing bi-planer radiographs were available at the time of diagnosis by a pediatric orthopedic surgeon and at the moment of the brace prescription. Postero-anterior and lateral X-rays were taken using the EOS® system. Twelve anatomical landmarks of the pelvis were identified on the radiograph pairs and four landmarks were identified on the postero-anterior radiography only. These were not identified on the lateral radiograph due to the superposition of the right and left landmarks. The three-dimensional reconstruction of the pelvis was performed using two radiographs of the first 12 bony landmarks. A total of nine three-dimensional parameters were calculated to quantify the asymmetry of the pelvis distortion between the two given times. Bi-dimensional parameters were also measured on the last four bony landmarks in order to document the pelvic deformations relevant to the clinical practice such as the rotation. With the objective of evaluating a possible asymmetry between the hip bones of the pelvis, the three-dimension parameters of the left pelvis were compared to those of the right side in each time using a paired sample t-test. The pelvic morphology was also evaluated using a multivariate analysis (MANOVA) with repeated measures on two conditions (side*time). A statistically significant bone growth of the pelvis in the time interval between the diagnosis of the scoliosis and the brace prescription ($p=0.033$) was observed in consequence. A significant asymmetry between the left and right sides of the pelvis ($p=0.013$) without distortion was also observed. Regarding the bi-dimensional parameters, we found an increase in pelvic release ($p=0.024$) during the

growth of the girls. Finally, the pelvis did not show a distortion because a p value of 0.763 was observed.

In conclusion, the growth of young girls with adolescent idiopathic scoliosis is related to a morphological asymmetry between the two hipbones of the pelvis. This asymmetry observed at the moment of the scoliosis diagnosis has evolved until the moment of the brace prescription. As for the bi-dimensional parameters, we can conclude that the rotation of the pelvis to the back increased during the growth of the girls, producing a pelvic retroversion in the sagittal plan. The three-dimensional distortion of the pelvis, however, has not been observed during the young girls growth.

Keywords : Adolescent idiopathic scoliosis, pelvis, three-dimensional morphology, asymmetry, rotation, distortion.

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Table des matières.....	v
Liste de tableaux.....	vii
Liste de figures.....	ix
Liste des annexes.....	xi
Liste des sigles et abréviations.....	xii
Remerciements.....	xv
Chapitre 1 : Introduction.....	1
1.1 Incidence et causes de la scoliose	2
1.2 Évaluation de la scoliose et traitement.....	4
1.3 Facteurs biomécaniques associés à la progression de la scoliose	11
Chapitre 2 : Revue de littérature.....	17
2.1 Anatomie du bassin.....	17
2.2 Paramètres du bassin pour l'étude de sujets sains	23
2.3 Bassin scoliotique	27
2.3.1 Mesures radiographiques bidimensionnelles	28
2.3.2 Mesures 3D sur des spécimens cadavériques	29
2.3.3 Mesures 3D du bassin de patients scoliotiques.....	32
2.4 Relation entre le bassin et la scoliose	36
2.5 Problématique du bassin	38
2.5.1 Rotation pelvienne	38
2.5.2 Asymétrie du côté gauche versus le côté droit.....	41
2.5.3 Croissance du bassin et sa distorsion.....	43
2.6 Systèmes de reconstruction tridimensionnelle.....	45
2.6.1 Stéréoradiographie	45
2.6.2 Système EOS®	48
2.7 Objectifs spécifiques.....	51
Chapitre 3 : Méthode.....	52

3.1 Sélection de sujets.....	52
3.2 Protocole expérimental	52
3.2.1 Repères anatomiques sur le bassin.....	56
3.2.2 Identification des repères sur les radiographies	57
3.2.3 Technique de reconstruction tridimensionnelle.....	58
3.3 Paramètres mesurés sur le bassin.....	64
3.3.1 Paramètres 3D.....	64
3.3.2 Paramètres 2D.....	65
3.4 Analyses statistiques	67
Chapitre 4 : Résultats	68
4.1 Paramètres pelviens tridimensionnels.....	68
4.2 Paramètres 2D.....	70
4.3 Distorsion du bassin.....	71
Chapitre 5 : Discussion.....	73
5.1 Asymétrie pelvienne : côté gauche versus côté droit.....	73
5.2 Rotation pelvienne	76
5.3 Croissance du bassin et sa distorsion	78
5.4 Limites de l'étude	79
5.4 Perspectives.....	80
Chapitre 6 : Conclusion.....	82
Bibliographie.....	83
Annexe A.....	i
Annexe B.....	v

Liste des tableaux

Tableau I. Points anatomiques pelviens cités dans la littérature pour représenter la morphologie du bassin.	19
Tableau II. Les paramètres sagittaux pelviens chez les sujets sains. Les paramètres anatomiques sont représentés par l'épaisseur pelvienne (EP) et l'incidence pelvienne (IP). Les paramètres positionnels sont représentés par la pente sacrée (SS), version pelvienne (VP) et le porte-à-faux (PAF).	26
Tableau III. Présentation des paramètres du bassin calculés en 3D et leurs moyens de mesure chez les individus ayant divers types de scoliose idiopathique de l'adolescence. Les paramètres sagittaux pelviens sont représentés par VP : version pelvienne; SS : pente sacrée; IP : incidence pelvienne et PAF : porte-à-faux. Les types de scoliose sont représentés par T : thoracique; TL : thoraco-lombaire et L : lombaire.....	35
Tableau IV. Caractéristiques du type de courbures des scolioses étudiées et la vertèbre correspondant à l'apex de la courbe (T : thoracique, TL : thoracolombaire, L : lombaire) lors de la radiographie initiale (T1) et de la dernière radiographie (T2) avant le traitement orthopédique par corset ainsi que le côté de la scoliose (D : droite, G : gauche).	54
Tableau V. L'âge et l'angle de Cobb des dix-sept filles lors du diagnostic de la SIA (T1) et avant le traitement orthopédique par corset (T2); les numéros des sujets ne correspondent pas à ceux du Tableau IV.....	55
Tableau VI. Moyenne et écart type des paramètres 3D mesurés sur les côtés gauche (G) et droit (D) du bassin au moment du diagnostic de la scoliose (T1). L'astérisque indique un test t significatif ($p < 0,05$).....	68
Tableau VII. Moyenne et écart type des paramètres 3D mesurés sur les côtés gauche (G) et droit (D) du bassin avant le traitement orthopédique par corset (T2). L'astérisque indique un test t significatif ($p < 0,05$).....	69
Tableau VIII. Paramètres 3D pour les conditions « Temps » et « Côté » ainsi que leur interaction. L'astérisque indique un p value significatif ($p < 0,05$).....	70
Tableau IX. Moyenne et écart type des paramètres 2D mesurés sur le bassin de 17 jeunes filles scoliotiques au moment du diagnostic de la scoliose (T1) et avant le traitement orthopédique par corset (T2). L'astérisque indique un test t significatif ($p < 0,05$). Le	

paramètre PS-acétabulum correspond à une longueur horizontale (horiz.) mesurée sur les côtés gauche (G) et droit (D) du bassin; † indique que l'obliquité des tubérosités ischiatiques a été mesurée sur le bassin de 16 jeunes filles. 71

Tableau X. Moyenne et écart-type de la norme de la différence des côtés du bassin de chaque paramètre 3D. Test multivarié de chaque paramètre 3D par rapport à la norme de la différence des côtés du bassin à un facteur inter-sujet tel que celui représenté par les instants (T1 et T2); l'astérisque indique un p value significatif ($p < 0,05$). 72

Liste des figures

- Figure 1.** Illustration de la méthode de calcul de l'angle de Cobb et de la vertèbre apicale. Cet angle mesure le degré de sévérité de la courbure scoliothique..... 2
- Figure 2.** Classification de King (King et al., 1983): King type 1 = double courbure à lombaire prédominante; King type 2 = double courbure; King type 3 = courbure unique thoracique droite; King type 4 = courbure unique thoraco-lombaire; King type 5 = double courbure thoracique..... 5
- Figure 3.** Représentation d'une patiente en position debout installée à l'intérieure du système d'imagerie médicale EOS®..... 8
- Figure 4.** Illustration d'un corset rigide : corset de Boston..... 9
- Figure 5.** Corset souple SpineCor qui vise à corriger la scoliose de façon dynamique..... 10
- Figure 6.** A) posture normale et celle d'une SIA, illustrant une asymétrie des épaules et des omoplates; B) même comparaison, mais avec le tronc fléchi pour mettre en évidence la gibbosité..... 12
- Figure 7.** Vue antérieure des pièces osseuses qui composent le bassin..... 18
- Figure 8.** Illustration des principaux points anatomiques utilisés dans le présent mémoire. PS : promontoire sacré; ESCI : extrémité supérieure de la crête iliaque; EIPS : épine iliaque postéro-supérieure; AC : acétabulum; CTF : centre de la tête fémorale; SP : symphyse pubienne; TI : tubérosité ischiatique..... 23
- Figure 9.** A) représentation des paramètres positionnels pelviens; B) représentation des paramètres anatomiques pelviens..... 24
- Figure 10.** Représentation de la façon dont se produit l'asymétrie pelvienne : les ailes iliaques tournent à droite tandis que les symphyses pubiennes tournent à gauche..... 31
- Figure 11.** Illustration d'une vue de droite du bassin avec des mesures représentée par la distance de la première vertèbre sacrée (S1) à l'extrémité supérieure (ESCI) et latérale des crêtes iliaques (ELCI) et aussi aux épines iliaques postéro-antérieures (EIPS) et antéro-supérieures (EIAS)..... 33
- Figure 12.** Vue horizontale représentant un mécanisme compensatoire de rotation des structures anatomiques dans une scoliose thoracique droite ayant comme apex T8. La

flèche rouge indique la rotation axiale du bassin qui suit le même sens horaire que celle de la vertèbre apex identifiée par la flèche bleue.....	40
Figure 13. Représentation de la mesure de la largeur de l'ilium selon les côtés concaves et convexes de la courbure scoliothique.	43
Figure 14. A) illustration de l'objet de calibrage portable développé et utilisé lors de la prise radiographique de la patiente. B) représentation de la méthode de stéréoradiographie. ..	47
Figure 15. Illustration de paires radiographiques : A) réalisée par le système de l'imagerie conventionnel et B) prise par EOS®.	49
Figure 16. A) schéma de l'architecture du système EOS® et B) schéma du bras qui rejoint les deux détecteurs gazeux de rayons X.	50
Figure 17. Représentation d'une patiente en position debout et les clichés radiographiques postéro-antérieur et latéral obtenus de façon simultanée par le système d'imagerie médicale EOS®.	53
Figure 18. Position des 16 repères anatomiques sur le bassin selon A) le plan frontal (vue postérieure), B) le plan sagittal (vue latérale droite) et C) le plan transverse (vue oblique). Les points rouges (1 à 12) indiquent les repères anatomiques relevés dans les deux vues radiographiques et les points bleus (13 à 16) indiquent les repères anatomiques relevés uniquement sur la radiographie postéro-antérieure.....	57
Figure 19. Sommet de l'arcade de l'acétabulum droit (8) est identifié sur la radiographie latérale (A). Une ligne horizontale permet de localiser ce repère anatomique sur la radiographie frontale (B).....	58
Figure 20. A) représentation du système EOS®, B) représentation du système caméra.....	60
Figure 21. Image de l'objet de calibrage avec ses 35 repères.....	61
Figure 22. Représentation d'un point anatomique (3D) dans le repère de référence global (x,y,z) et sa projection dans les deux clichés radiographiques (u,v). Les deux sources des rayons X sont représentées par S1 et S2.	63
Figure 23. Schémas de la reconstruction 3D du bassin. A) bassin dans le plan frontal et oblique et B) bassin dans le plan sagittal et horizontal.	64

Liste des annexes

Annexe A - Tableaux et figures des paramètres morphologiques tridimensionnels du bassin.....i

Tableau A-I. Paramètres morphologiques tridimensionnels du bassin, leurs repères anatomiques respectifs et la figure correspondante. i

Tableau A-II. Équations relatives au calcul des paramètres morphologiques tridimensionnels du bassin gauche. Les paramètres pour le côté droit sont calculés de façon similaire. ii

Figure A-1. Distances (mm) PS-acétabulum, PS-symphyse et EIPS-PS du bassin..... iii

Figure A-2. Distances (mm) EIPS-acétabulum, EIPS-symphyse et acétabulum-symphyse du bassin. Angles du triangle du bassin EIPS (α), acétabulum (β) et symphyse (γ) en degrés. iv

Annexe B - Tableaux et figures des paramètres d'orientation bidimensionnels du bassin.....v

Tableau B-I. Paramètres d'orientation bidimensionnels du bassin, leurs repères anatomiques respectifs et la figure correspondante. v

Tableau B-II. Équations relatives au calcul des paramètres d'orientation bidimensionnels du bassin..... vi

Figure B-1. Vue de droite de la distance (mm) PS-acétabulum horizontale du bassin dans le plan sagittal. vii

Figure B-2. Vue horizontale du bassin. Orientation des acétabulums (θ) et orientation des EIPS (θ') par rapport à l'axe médio-latéral en degrés. viii

Figure B-3. Vue postérieure du bassin. Obliquités en degrés des crêtes (θ), des acétabulums (θ') et tubérosités ischiatiques (θ'') par rapport à l'axe médio-latéral..... ix

Figure B-4. Vue de droite du bassin. Angle en degrés de l'incidence pelvienne (γ), pente sacrée (α) et version pelvienne (β). x

Liste des sigles et abréviations

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
mm	Millimètre
°	Degré
±	Plus ou moins
%	Pourcentage
©	Copyright
®	Enregistré
AC	Acétabulum
CNSC	Contour non stéréo-correspondant
CTF	Centre de la tête fémorale
D	Droit
DLT	Direct Linear Transformation
EIAS	Épine iliaque antéro-supérieure
EIPS	Épine iliaque postéro-supérieure
ELCI	Extrémité latérale de la crête iliaque
EP	Épaisseur pelvienne
ESCI	Extrémité supérieure de la crête iliaque
F	Femme
G	Gauche
H	Homme
Horiz.	Horizontal
IP	Incidence pelvienne
L	Lombaire
LAT	Latéral
NSCP	Non stéréo-correspondant
PA	Postéro-antérieure
PAF	Porte-à-faux
PS	Promontoire sacré

PSC	Point stéréo-correspondant
S1	Première vertèbre sacrée
SIA	Scoliose idiopathique de l'adolescence
SP	Symphyse pubienne
SRS	Scoliosis Research Society
SS	Pente sacrée
T1	Temps 1 (au moment du diagnostic de la scoliose)
T2	Temps 2 (avant le traitement orthopédique par corset)
T	Thoracique
TF	Tête fémorale
TI	Tubérosité ischiatique
TL	Thoracolombaire
VP	Version pelvienne

*À mon père, ma mère, mon mari et ceux qui ont
toujours cru en mon potentiel et m'ont soutenue.*

Remerciements

De prime abord, je tiens à remercier très sincèrement mon directeur de recherche, Paul Allard, professeur titulaire au Département de Kinésiologie à l'Université de Montréal, pour m'avoir permis de découvrir le domaine de la recherche scientifique. Je le remercie de m'avoir soutenue et orientée tout au long de la réalisation de ce mémoire. Je le remercie également de m'avoir donné la confiance et l'autonomie ainsi que fourni les suggestions nécessaires au développement de ce mémoire.

Je remercie également mon codirecteur de recherche, Mickaël Begon, professeur adjoint au Département de Kinésiologie à l'Université de Montréal de m'avoir guidée tout au long de ce projet et d'avoir cru en moi.

Je me dois de mentionner le Dr Charles-Hilaire Rivard pour l'autorisation qu'il m'a accordée de recueillir des données auprès des patientes qui ont servi de base à mon étude. Merci de votre collaboration.

Je tiens à remercier Benjamin Michaud, assistant de recherche au Laboratoire d'Ingénierie du Mouvement, pour avoir réalisé la programmation nécessaire à mon étude et pour l'aide accordée à régler les difficultés techniques liées à la programmation.

J'aimerais souligner l'incalculable aide de Sophie-Anne Scherer, ancienne assistante de recherche au Laboratoire d'Ingénierie du Mouvement, pour son soutien et sa contribution au développement de mon projet.

Enfin, j'aimerais remercier tous les étudiants du Laboratoire d'Ingénierie du Mouvement pour leur support durant mon parcours et pour l'agréable ambiance de travail à laquelle ils ont contribué.

Chapitre 1 : Introduction

La scoliose est une déformation complexe du rachis et de la cage thoracique. Son nom, dérivé du grec *skolios*, signifie tortueux. Sa première description date de Hippocrate (460-377 avant Jésus-Christ) (Adams, 1891). Elle est caractérisée par une rotation des vertèbres et des disques entraînant des courbures et des contre-courbures anormales de la colonne vertébrale (Dubousset, 1999). Il s'agit d'une déviation latérale du rachis souvent observée dans le plan frontal accompagnée d'une accentuation des courbures physiologiques de lordose lombaire et de cyphose thoracique. La déformation est spatiale : elle se produit simultanément dans les trois plans anatomiques. Cela entraîne une topographie irrégulière sur la surface du tronc, telle qu'illustrée à la Figure 1.

La sévérité de la scoliose est évaluée cliniquement par la valeur de l'angle de Cobb (Cobb, 1948) mesurée dans le plan frontal uniquement au moyen d'une radiographie postéro-antérieure¹. Cet angle, illustré à la Figure 1, est défini par l'intersection des droites tangentielles au plateau supérieur de la vertèbre limite supérieure et celle du plateau inférieur de la vertèbre limite inférieure mesuré du côté de la concavité de la courbure scoliotique. D'après Kim et al. (2010), il est important d'identifier la vertèbre nommée *apicale* ou vertèbre *sommet* sur la radiographie postéro-antérieure afin de déterminer le type de la courbure scoliotique. Cette vertèbre est celle qui détient la rotation axiale la plus importante sur la radiographie postéro-antérieure et qui présente le minimum d'inclinaison comparativement à l'horizontale. Elle se situe au sommet de la courbure entre les deux vertèbres limites et se présente comme étant la vertèbre la plus éloignée par rapport à l'axe vertical.

¹ Les radiographies postéro-antérieures comme étant le rayonnement du dos vers la face sont utilisés afin de protéger davantage les organes génitaux.

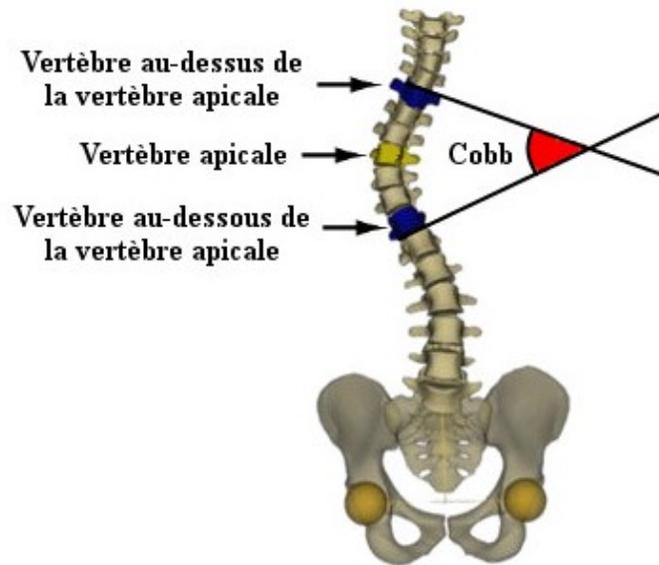


Figure 1. Illustration de la méthode de calcul de l'angle de Cobb et de la vertèbre apicale. Cet angle mesure le degré de sévérité de la courbure scoliotique. Adaptée de Delplanque et al. (2012).

1.1 Incidence et causes de la scoliose

Une scoliose est présente si l'angle de Cobb est supérieur à 10° ("A Glossary of Scoliosis Terms," 1976). Elle est classée comme étant infantile, juvénile, de l'adolescence ou de l'adulte selon l'âge où le diagnostic est confirmé. Les plus fréquentes se produisent chez l'enfant et l'adolescent. Dans 75 % des cas (Diard, Chateil, Hauger, Moinard, & Ducou-Lepointe, 2002), il s'agit d'une scoliose dite *idiopathique* de l'adolescence (SIA), c'est-à-dire d'étiologie inconnue. Elle peut entraîner des conséquences fonctionnelles, morphologiques et psychologiques (Edery, Biot, & Bernard, 2005). La manifestation et la progression de la scoliose idiopathique semblent être dues à des causes multifactorielles, comprenant entre autres, des facteurs génétiques, hormonaux, neurologiques, biomécaniques qui interagissent entre eux. Dans le présent travail de maîtrise, seules les scolioses idiopathiques de l'adolescence seront étudiées.

Des études affirment qu'il existe une tendance génétique héréditaire liée à cette maladie (Edery et al., 2011; Gorman, Julien, & Moreau, 2012; Ogilvie et al., 2006). L'objectif est

d'identifier le gène ou les gènes responsables de la scoliose. Cependant, des études ont démontré une hétérogénéité dans la localisation de gènes mutés. Par contre, cette hypothèse demeure encore controversée. De plus, le facteur génétique semble être lié au sexe puisqu'il existe une prédominance féminine (Kruse, Buchan, Gurnett, & Dobbs, 2012). Toutefois, Gorman et al. (2012) ont constaté que ce n'est pas la scoliose elle-même qui est transmise génétiquement, mais plutôt les nombreux facteurs étiologiques qui entraînent le développement de la scoliose.

Les facteurs hormonaux jouent aussi un rôle important dans l'étiopathogenèse de la scoliose idiopathique. En effet, une carence en mélatonine semble être l'une des causes de la SIA. La mélatonine est une hormone neuroendocrinienne synthétisée par la glande pinéale qui est essentielle au développement des ostéoblastes. Plusieurs groupes de chercheurs (Dubousset, Queneau, & Thillard, 1983; Machida et al., 1994) ont pu reproduire une scoliose comparable à celle retrouvée chez l'humain par l'ablation de la glande pinéale chez le poulet. De plus, Machida et al. (1993) ont constaté que le développement de la scoliose pourrait être évité par la réimplantation intramusculaire de la glande pinéale ou par l'administration de la mélatonine chez le poulet pinéalectomisé. Selon Moreau et al. (2004), cette hypothèse est controversée puisque la plupart des études n'ont rapporté aucune diminution considérable des taux de mélatonine circulant chez les patients atteints de la scoliose idiopathique de l'adolescence. À cet effet, Moreau et al. (*Ibid.*) suggèrent une anomalie dans la voie de transmission du signal de la mélatonine, qui entrainerait des conséquences similaires à une carence en mélatonine. De plus, le rôle des estrogènes dans la modulation de la signalisation de la mélatonine pourrait aussi expliquer la prédominance féminine de la scoliose idiopathique de l'adolescence (Letellier et al., 2007). Il semble alors que la signalisation de la mélatonine est nettement compromise chez les patientes atteintes de la SIA.

La scoliose idiopathique de l'adolescence est aussi associée à des déficits neurologiques, plus précisément vestibulo-moteurs, tels que suggérés par Sahlstrand, Petruson et Ortengren (1979). Les scoliotiques semblent présenter un retard de maturation ou une altération cognitive des signaux vestibulaires (Simoneau et al., 2009). Les patients atteints d'une SIA ont une capacité limitée à intégrer l'information vestibulaire comme l'information

cognitive et la perception de l'espace. Selon Stylianides, Dalleau, Begon, Rivard et Allard (2013), ces déficits sont secondaires à des facteurs biomécaniques, tels que le déplacement du centre de masse du tronc vers l'arrière favorisant une posture lordocyphotique (Gatto, Allard, Chavet, Barbier, & Labelle, 2003).

Les causes biomécaniques ou les causes musculo-squelettiques de la SIA suscitent également beaucoup d'intérêt. Des travaux de recherche sur les dissymétries morphologiques supposent que des anomalies squelettiques se produisent et occasionneraient la scoliose (Burwell et al., 1992; Goldberg, Fogarty, Moore, & Dowling, 1997; Gum, Asher, Burton, Lai, & Lambart, 2007). Il est envisageable que des changements structuraux des vertèbres puissent être l'une des causes de la déformation rachidienne (Goldberg et al., 1997). Toutefois, des changements structuraux sur la morphologie d'autres régions que la colonne vertébrale restent encore peu étudiés.

L'incidence de la scoliose chez la population adolescente varie entre 0,3 % à 16 %, selon la définition de la scoliose accordée par Edery et al. (2005). Étant donné que la Scoliosis Research Society (SRS) a établi que le principal critère de diagnostic de la scoliose idiopathique est un angle de Cobb supérieur à 10°, sa prévalence est de 2,5 % chez les adolescents (Edery et al., 2005; Kane, 1977). Elle est rare à l'enfance et à la petite enfance, néanmoins son incidence chez les écoliers de 15 ans ou moins est de 1 % à 2 %, les filles étant plus touchées que les garçons (Trobisch, Suess, & Schwab, 2010). Le ratio entre les filles et les garçons de 10 ans et plus est de 6:1. De plus, si on considère la gravité de la courbure, les filles sont plus susceptibles de développer une scoliose plus sévère. En effet, lorsque la courbure du rachis dépasse 20°, le ratio est autour de 5:1 et augmente à 10:1 lorsque celle-ci dépasse 30° (Trobisch et al., 2010). En résumé, plus la scoliose est sévère, plus les jeunes filles sont touchées par rapport aux garçons. Dans ce mémoire, seules les jeunes filles ayant la scoliose idiopathique de l'adolescence seront incluses dans l'étude.

1.2 Évaluation de la scoliose et traitement

La déformation scoliotique peut prendre plusieurs formes et la vertèbre *apicale* (ou *sommet*) peut se situer à différents niveaux vertébraux. Cela donne des lignes directrices pour

l'évaluation objective de la SIA et la planification d'interventions chirurgicales (Kim et al., 2010). De nombreuses classifications de la scoliose ont été proposées. Elles sont basées sur la localisation des courbures principales à partir des radiographies postéro-antérieures (James, 1954; King, Moe, Bradford, & Winter, 1983; Ponseti & Friedman, 1950). King et al. (1983) ont proposé une classification selon cinq types de scoliose idiopathique, telle qu'illustrée à la Figure 2, dans le but d'orienter les niveaux de fusion de la colonne vertébrale pour les traitements chirurgicaux. La principale limitation de cette classification (King et al., 1983) est qu'elle est basée sur un seul plan anatomique de la colonne vertébrale.

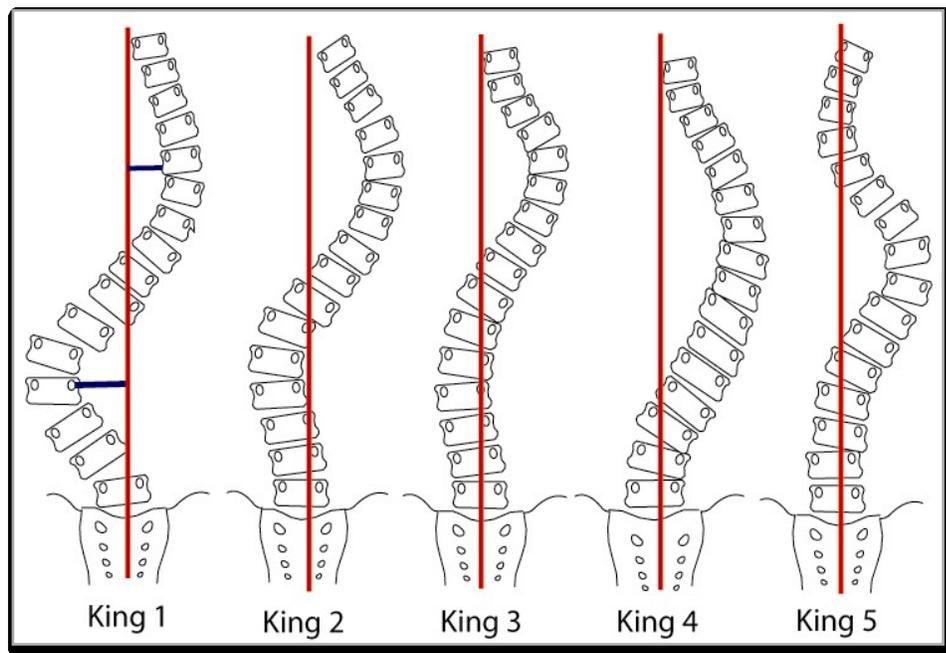


Figure 2. Classification de King (King et al., 1983): King type 1 = double courbure à lombaire prédominante; King type 2 = double courbure; King type 3 = courbure unique thoracique droite; King type 4 = courbure unique thoraco-lombaire; King type 5 = double courbure thoracique. Adaptée de www.drivanrocha.com.br.

Plus récemment, Lenke et al. (2001) ont proposé une autre classification qui tient compte non seulement de la déformation scoliotique observée dans le plan anatomique frontal, mais aussi de celle présente dans le plan sagittal. Cette classification couvre 42 types de scoliose à partir des combinaisons de trois variables, à savoir : les types de courbes, le *modificateur* de la colonne lombaire et le *modificateur* thoracique sagittal. Le modificateur de

la colonne lombaire est basé sur la relation d'une ligne verticale qui s'étend du centre du sacrum à l'apex de la région lombaire tandis que le modificateur thoracique sagittal est basé sur la mesure de la courbure sagittale de la cinquième à la douzième vertèbre thoracique (Lenke et al., 2001). De plus, la classification comprend les six types de scoliose structurale dite *permanente*, à savoir :

- type 1 : thoracique principale;
- type 2 : double thoracique;
- type 3 : double majeur;
- type 4 : triple majeur;
- type 5 : thoracolombaire/lombaire;
- type 6 : thoracolombaire/lombaire - thoracique principale.

Cette classification sert surtout à décrire des scoliose sévères et, par le fait même, à la planification chirurgicale du rachis. Le présent travail de maîtrise repose uniquement sur des sujets ayant des scoliose légères à modérées, sans recommandation chirurgicale corrective de leur déformation. La classification de King (King et al., 1983) est donc la plus appropriée. C'est pourquoi cette recherche utilisera une classification selon la localisation de la vertèbre apicale sur la courbure structurale de la scoliose. Dans ces conditions, trois types de courbures scoliotiques seront employés : la scoliose thoracique ayant une vertèbre apicale située entre T2 et T11, la scoliose thoraco-lombaire ayant comme vertèbre apicale T12 ou L1 et la scoliose lombaire ayant une vertèbre apicale localisée entre L2 et L5.

Bien que la scoliose soit définie comme étant une déformation de la colonne vertébrale caractérisée principalement dans le plan frontal, les courbures naturelles du rachis font en sorte que la scoliose est en réalité une déformation tridimensionnelle (3D). Certaines recherches ont mis en évidence la rotation axiale vertébrale de la courbure scoliotique au moyen de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) (Birchall, Hughes, Gregson, & Williamson, 2005; Birchall, Hughes, Hindle, Robinson, & Williamson, 1997). Cette technique permet une visualisation en 3D du rachis et du bassin, cependant elle est limitée par des examens habituellement réalisés en position couchée (Dubousset et al., 2005). La position couchée engendre un affaiblissement des courbures dans le plan frontal ainsi que la rotation axiale des vertèbres (Yazici et al.,

2001). De plus, des courbures scoliotiques compensatoires deviennent réductibles en décubitus. C'est le même problème avec l'emploi d'autres techniques, comme la tomodensitométrie, couramment connue comme *CT-scan*.

Ceci explique pourquoi la technique la plus populaire pour une analyse en 3D est la stéréoradiographie qui fait appel à deux clichés radiographiques perpendiculaires l'un à l'autre avec le patient debout. L'acquisition de deux clichés radiographiques peut être obtenue soit en déplaçant le patient entre la première et la seconde acquisition radiographique, soit en déplaçant l'ensemble des sources de rayons X. Koreska, Gibson et Robertson (1978) et McNeice, Koreska et Raso (1975) ont été les premiers à proposer des représentations et des analyses tridimensionnelles du rachis à partir de stéréoradiographies. Par contre, cette technique exige que le patient se déplace pour obtenir une vue de face et de profil. Cela entraîne des modifications posturales entre les deux prises d'images qui ont des conséquences sur la forme de la courbure scoliotique non obstant des erreurs de mesure.

Récemment, une nouvelle technique d'imagerie médicale a été développée. Il s'agit du système EOS®, tel qu'illustré à la Figure 3. Cette méthode de stéréoradiographie diffère de la méthode conventionnelle, car elle permet la prise radiographique simultanée du dos et du profil du patient (Dubousset et al., 2005, 2008). Par conséquent, la morphologie en 3D du bassin et de la colonne vertébrale peut être réalisée en même temps et sans déplacer le patient. Cela réduit les erreurs associées aux changements posturaux de la méthode de stéréoradiographie traditionnelle. Les prises de mesures radiographiques obtenues au moyen du système EOS® seront employées dans ce mémoire.



Figure 3. Représentation d'une patiente en position debout installée à l'intérieur du système d'imagerie médicale EOS®. Source : www.eos-imaging.com, téléchargée le 04/05/2013.

La recherche sur la scoliose porte aussi sur les formes de traitement orthopédique. La scoliose est considérée comme étant évolutive dès l'instant où elle atteint un angle de Cobb de 30° dans le plan frontal ou quand celle-ci évolue de 5° ou plus en six mois (Bernard et al., 2005). Le port du corset est normalement préconisé lorsque l'angle de Cobb de la courbure structurale est compris entre 25° et 45° . Le principe d'un corset est d'appliquer une combinaison des forces au niveau du tronc, ce qui permet une réduction maximale des déformations scoliotiques. Le corset le plus couramment utilisé en Amérique du Nord est le corset de Boston illustré à la Figure 4 (Fayssoux, Cho, & Herman, 2010; Khouri, Vialle, Mary, & Biot, 2004). Il s'agit d'un corset thoraco-lombo-pelvien modulaire à ouverture postérieure. Les modules sont préfabriqués et sa structure peut être modifiée et adaptée à chaque patient prenant en compte le type de courbure scoliotique à corriger. Le corset de Boston maintient efficacement les scoliose lombaires, thoraco-lombaires et les doubles courbures thoraciques

et lombaires (Khouri et al., 2004). Cependant, pour les scolioses de niveau plus élevé situées au-dessus de T7, des structures complémentaires sont requises.



Figure 4. Illustration d'un corset rigide : corset de Boston. Adaptée de Fayssoux et al. (2010).

À l'inverse des corsets dits *rigides*, comme celui de Boston, il existe des corsets souples, tels que le SpineCor, qui visent à corriger la déformation scoliotique de manière dynamique (Coillard, Circo, & Rivard, 2010). Le concept de ce corset souple repose sur la correction de la déformation rachidienne au moyen de bandes élastiques, comme illustré à la Figure 5. Ces bandes sont rattachées à une base pelvienne et sont disposées sur la patiente selon le type de courbures.

L'efficacité du traitement de la scoliose par le corset souple SpineCor a été rapportée par Coillard, Circo et Rivard (2009). Une réduction de l'angle de Cobb de 5° ou une stabilisation de la progression de la déformation de $\pm 5^\circ$ a été atteinte chez 88,6 % des patients ayant une SIA de degré de sévérité entre 15° et 24° . Pour les patients ayant un angle de Cobb se situant entre 25° et 40° , le taux de réussite était de 82,7 %. Ces auteurs ont conclu que les résultats du traitement par le SpineCor semblent être supérieurs lorsque ce type de corset est prescrit pour un angle de Cobb précoce. De plus, Coillard et al. (2010) ont constaté que, pour

37,3 % des patients (25 de 65 patients) qui ont utilisé le corset SpineCor, la chirurgie recommandée par un médecin orthopédiste a été reportée. Finalement, ces auteurs ont conclu que le traitement par le corset SpineCor en plus de ralentir la progression de la scoliose, retarde l'intervention chirurgicale. Le présent travail de maîtrise portera sur les seules jeunes filles scoliotiques ayant un degré de sévérité précoce dont le port du corset souple SpineCor a été prescrit à la fin de l'étude.

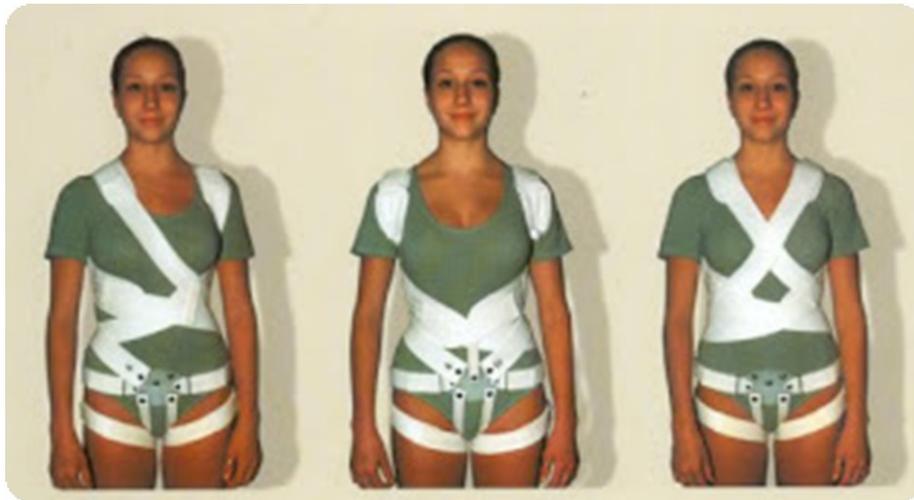


Figure 5. Corset souple SpineCor qui vise à corriger la scoliose de façon dynamique. Adaptée de www.spinecorbrace.biz/.

Le corset est utilisé afin de freiner l'évolution de la courbure scoliotique à l'adolescence dans le but principal d'avoir une déformation acceptable à la phase adulte (Khoury et al., 2004). L'amélioration de la capacité vitale et la gestion de la douleur sont également d'une grande importance. Il faut aussi considérer le type de scoliose et l'âge du patient. Toutefois, si la déformation du rachis dépasse 45°, le traitement le plus conseillé est la correction chirurgicale (Khoury et al., 2004).

Les chirurgies de la colonne vertébrale visent à corriger la déformation rachidienne dans les trois plans anatomiques. En général, cette correction est faite par la fusion d'un certain nombre de vertèbres aboutissant en un bloc de vertèbres. Cependant, il est essentiel d'attendre que la croissance du rachis soit assez avancée pour la chirurgie, puisqu'à cette

phase, la courbure scoliothique pourrait être corrigée sans risque pour la croissance résiduelle de la colonne vertébrale (Khoury et al., 2004).

L'instrumentation chirurgicale a évolué au cours des années, passant des tiges rigides d'Harrington (Harrington, 1962) à l'instrumentation segmentaire de Cotrel-Dubousset (Cotrel & Dubousset, 1984). La technique de Harrington était la plus réalisée jusqu'aux années 1980 (Khoury et al., 2004). Elle consiste en un système de tiges en métal et de crochets implantés sur la colonne vertébrale. Une force de traction sur la concavité de la courbure et une force de compression sur la convexité sont appliquées au moyen de tiges métalliques situées de part et d'autre des vertèbres à redresser. Afin de stabiliser les vertèbres, une fusion au moyen d'os spongieux était pratiquée dans la zone instrumentée (Harrington, 1962). Une immobilisation de la colonne pendant un an au moyen d'un plâtre ou d'un corset était aussi nécessaire (*Ibid.*).

La technique de Harrington a cédé sa place à la technique de Cotrel-Dubousset qui est la plus utilisée aujourd'hui. Elle corrige la déformation de face et de profil et aussi la rotation vertébrale grâce à des crochets et à une tige métallique préalablement cintrée sans avoir la nécessité d'une immobilisation postopératoire (Cotrel & Dubousset, 1984; Dubousset & Cotrel, 1991; Khoury et al., 2004). De même, cette méthode de correction de la déformation scoliothique par voie postérieure semble être supérieure à la technique de Harrington, car elle rétablit mieux les courbures de profil.

À la lumière de ce qui précède, on peut conclure que la majorité des études répertoriées portent sur les scoliothoses classées comme sévères et, parfois, modérées. Très peu d'études traitent des scoliothoses légères, inférieures à 25°, mais à risque de progresser. Il est pourtant important de savoir ce qui se passe au début de la scoliothose. Cela pourrait mener à un traitement précoce et à un meilleur pronostic. Dans la présente étude seront évaluées les scoliothoses légères et modérées au début de leur progression.

1.3 Facteurs biomécaniques associés à la progression de la scoliothose

Les études sur la morphologie corporelle et la posture chez les patientes atteintes de SIA ont souvent rapporté la scoliothose comme étant une dysmorphose (Allard, Nault, Hinse,

LeBlanc, & Labelle, 2001; LeBlanc, Labelle, Rivard, & Poitras, 1997; Nault et al., 2002; Zabjek, Leroux, Coillard, Prince, & Rivard, 2008). Autrement dit, la scoliose a été présentée dans la plupart des études comme étant une déformation structurale majeure du système musculo-squelettique, particulièrement de la colonne vertébrale. Des changements géométriques de la cage thoracique ont aussi été observés (Stokes, Dansereau, & Moreland, 1989; Zhu et al., 2011) et associés à des perturbations posturales chez les filles scoliotiques. La scoliose est souvent accompagnée d'une courbure proéminente dans la région côtière appelée *gibbosité*, telle qu'illustrée à la Figure 6. Celle-ci est une réponse de réaction à la rotation axiale vertébrale de cette maladie. Également, la déformation du rachis perturbe l'équilibre postural, la proprioception et la marche de sujets ayant la SIA. Cependant, rares sont les études (Allard et al., 2004; Beaulieu et al., 2009; Dalleau et al., 2012) qui font le lien entre les facteurs morphologiques, posturaux et d'équilibre. Dissocier ces facteurs dans chaque étude pourrait causer une perte d'informations importantes pour la compréhension du déroulement de cette maladie.

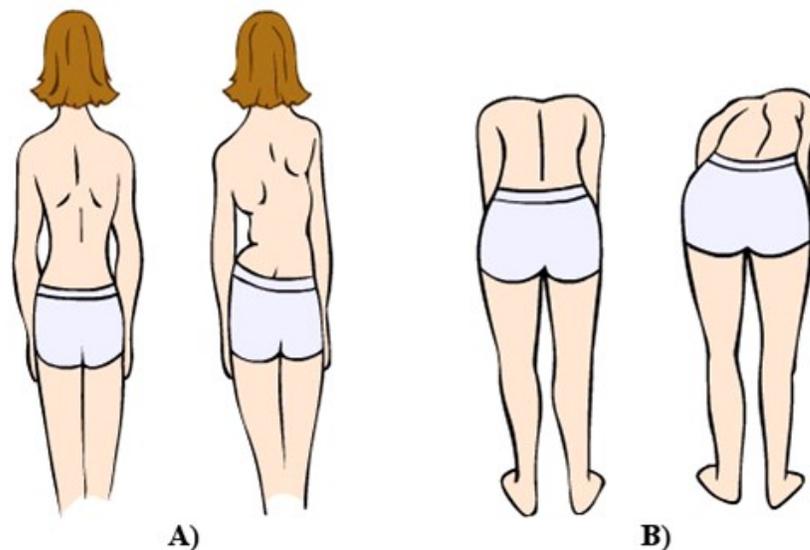


Figure 6. A) posture normale et celle d'une SIA, illustrant une asymétrie des épaules et des omoplates; B) même comparaison, mais avec le tronc fléchi pour mettre en évidence la gibbosité. Adaptée de www.centrechiropratiquebeaulieu.com/scoliose-depistage.htm.

En plus de la morphologie, l'équilibre et la locomotion sont également perturbés chez les scoliotiques (Beaulieu et al., 2009; Gauchard, Lascombes, Kuhnast, & Perrin, 2001; Sahlstrand, Örtengren, & Nachemson, 1978; Simoneau, Richer, Mercier, Allard, & Teasdale, 2006). Des troubles sensoriels et une augmentation de l'instabilité posturale chez les sujets ayant la SIA ont été constatés comme étant des conséquences de la déformation de la colonne vertébrale. Selon Bruyneel, Chavet, Bollini et Mesure (2010), l'initiation de la marche chez les sujets scoliotiques est caractérisée par une décélération du mouvement et d'une asymétrie entre les pas du côté de la convexité et du côté de la concavité. Il semble que la déformation de la colonne vertébrale modifie la relation entre les structures anatomiques, en particulier la colonne et les membres inférieurs. En résumé, la scoliose intensifie l'amplitude des oscillations posturales et entraîne un déplacement du centre de masse, qui se produit dans le sens latéral (Chen et al., 1998). Une asymétrie ou une distorsion du bassin pourraient expliquer le lien entre la déformation scoliotique et les perturbations locomotrices.

Étant donné que la scoliose évolue, des examens radiographiques et cliniques sont effectués régulièrement. L'un des grands enjeux dans le traitement de la SIA est de déterminer le risque de progression du degré de la courbure. Selon Lonstein et Carlson (1984), la progression de la déformation du rachis est fortement liée à l'amplitude de la courbe, à l'âge chronologique du patient au moment du diagnostic de la SIA ainsi qu'au signe de Risser qui reflète la maturité osseuse. De plus, Soucacos et al. (1998) ont observé que le sexe de l'enfant est également un facteur de risque. Ces auteurs ont observé que les filles présentaient une fréquence de progression plus élevée que les garçons quand les courbes progressaient entre 5° et 10°. La progression de la scoliose est le point de départ de notre étude, car nous allons investiguer la scoliose idiopathique de l'adolescence seulement chez les jeunes filles à partir du moment où le diagnostic est posé et où la scoliose est faible, mais présente.

En plus des déformations du rachis, des anomalies morphologiques du bassin ont déjà été constatées chez les filles ayant la SIA (Dalleau et al., 2012; Legaye, Duval-Beaupere, Hecquet, & Marty, 1998; Mac-Thiong, Labelle, & de Guise, 2006; Mahaudens, Thonnard, & Detrembleur, 2005; Pasha et al., 2010). Plus encore, la ceinture pelvienne semble impliquée dans l'étiologie ou dans la pathogénie de la SIA (Gum et al., 2007; Qiu et al., 2012;

Stylianides, Beaulieu, Dalleau, Rivard, & Allard, 2012). Notamment, une rotation axiale du bassin ou une inclinaison latérale dans le sens de la courbe scoliothique a été remarquée (Gum et al., 2007; Stylianides et al., 2012). Les paramètres anatomiques du bassin et sa variabilité morphologique individuelle jouent un rôle important dans la régulation des courbures sagittales de la colonne vertébrale (Legaye & Duval-Beaupere, 2005). Bien que ces auteurs affirment que les courbures sagittales (cyphose et lordose) ainsi que la géométrie du bassin évoluent avec la scoliose, cette relation n'a pas encore été faite dans une étude tridimensionnelle. Cela est le principal objectif du présent mémoire.

Deux théories sur l'étiopathogénie de la scoliose retiennent surtout notre attention (Wang et al., 2011). D'un côté, Goldberg et al. (1997) affirment que la scoliose est une manifestation d'une croissance instable soumise à un stress physiologique. De plus, ils ont constaté que les jeunes filles souffrant d'une scoliose idiopathique de l'adolescence avaient une asymétrie (gauche-droite) significative au niveau des empreintes digitales palmaires. Dans leur étude, il semble que l'asymétrie morphologique se manifeste lorsqu'il y a une faille dans le système de codage du génome humain. Cela serait dû à une erreur d'organisation des informations contenues dans le matériel génétique ou un défaut dans le génotype. La déformation de la colonne vertébrale ferait partie d'un processus impliquant tout le corps et plusieurs facteurs seraient associés au développement de la scoliose ainsi qu'à son évolution.

Un autre concept est celui de Nottingham² (Burwell et al., 1992) qui prend en considération l'association entre les structures anatomiques corporelles, en particulier la colonne vertébrale et le bassin. Selon eux, la scoliose résulte d'une interaction entre l'activité du système nerveux central (SNC), la maturation squelettique (vertèbres, disques, ligaments, cage thoracique, bassin et membres inférieurs), l'action de la gravité et les muscles. Ils suggèrent que la déformation du bassin, des membres inférieurs et de la cage thoracique serait causée par un développement anormal du système nerveux central. Cela pourrait perturber le contrôle postural pendant la marche. Il y aurait un mécanisme de couplage entre une rotation pelvienne ou *dinner plate* et une rotation compensatoire dans la direction opposée au niveau

² Le nom du concept est attribuable au fait que cette recherche a été réalisée à la faculté de médecine de l'université de Nottingham située à la ville de Nottingham au Royaume-Uni.

des disques intervertébraux et des côtes ou *flagpole*. De plus, une croissance anormale du squelette entraînerait des mécanismes neuromusculaires qui accentueraient la progression de la courbure scoliothique. Toutefois, ce concept ne s'appuie pas sur des mesures directes et prend en considération uniquement la rotation de la ceinture pelvienne et non sa géométrie. Il sera intéressant d'étudier les deux aspects dans le présent travail de maîtrise dans le cadre d'une analyse tridimensionnelle de la morphologie du bassin.

En ce qui concerne l'étude du bassin en 3D, un certain nombre d'études tridimensionnelles ont été réalisées sur des pièces anatomiques (Boulay, Tardieu, Benaim et al., 2006; Tardieu et al., 2006). D'autres analyses en 3D du bassin ont été faites à travers les systèmes de scanner ou de stéréoradiographie afin de mieux étudier les déformations du bassin (Gauvin, Dansereau, Petit, De Guise, & Labelle, 1998; Mitton et al., 2006). Les principales conclusions qui en ressortent sont la présence d'une asymétrie de la géométrie pelvienne et sa possible corrélation avec le degré de courbures vertébrales sur le plan sagittal. Toutefois, la plupart de ces études sont limitées, car elles portent sur des pièces cadavériques ou des sujets ayant une scoliose sévère. De plus, l'évolution de la scoliose au cours du temps n'a pas été évaluée. Des études bidimensionnelles (2D) portant sur la morphologie du bassin chez les sujets avec et sans scoliose ont également été réalisées. Mac-Thiong et al. (2006) ont observé une différence dans la géométrie du bassin scoliothique mesurée sur le plan frontal. Cependant, ils n'ont pas trouvé d'asymétrie morphologique au niveau du bassin dans le plan sagittal. Selon Mac-Thiong, Labelle, Charlebois, Huot et de Guise (2003), l'alignement sagittal entre la ceinture pelvienne et la colonne vertébrale semble être perturbé chez les patients atteints de la SIA.

Ainsi, la présente recherche nous amène à mieux comprendre la progression de la scoliose idiopathique de l'adolescence légère à modérée chez les jeunes filles. Pour ce faire, nous analyserons l'évolution de cette scoliose dans une étude longitudinale, c'est-à-dire en utilisant le même groupe de filles à deux temps différents.

L'objectif général de notre étude est d'identifier le rôle du bassin dans la progression de la scoliose au moyen d'une analyse tridimensionnelle de patientes ayant une SIA, mais n'ayant pas reçu de traitement par corset ou chirurgie. Plus particulièrement, cette étude a pour but de

comparer la morphologie pelvienne des jeunes filles au moment du diagnostic de la SIA ainsi qu'à la prescription d'un corset, environ un an plus tard. Plus précisément, l'étude portera sur l'asymétrie et la croissance osseuse du bassin ainsi que sur sa distorsion chez les jeunes filles scoliotiques et sera faite au moyen de radiographies bi-planaires.

Chapitre 2 : Revue de littérature

Ce chapitre se divise en sept volets. Le premier volet rappelle les notions d'anatomie du bassin et présente ses principaux repères anatomiques qui seront retenus pour le présent travail de recherche. Ensuite, une description des paramètres morphologiques du bassin couramment utilisés chez les sujets sans pathologie et scoliotiques sera présentée. La quatrième section portera sur la relation entre le bassin et la scoliose ainsi que sur l'asymétrie, la rotation axiale et la distorsion du bassin. Enfin, les avantages et les limites des méthodes de reconstruction tridimensionnelle du bassin les plus utilisées, telles que le système de stéréoradiographie conventionnelle et le système EOS® seront abordés. Ce chapitre se termine avec les objectifs spécifiques du travail de recherche.

2.1 Anatomie du bassin

Le bassin, illustré à la Figure 7, est le point d'ancrage de la colonne vertébrale et les membres inférieurs. D'après Moore, Dalley et Agur (2011), il représente un anneau osseux en forme d'entonnoir composé de quatre pièces osseuses, à savoir : les deux os coxaux, le sacrum et le coccyx. Les deux grands os coxaux gauche et droit sont chacun composé de trois os aussi illustrés à la Figure 7. Ceux-ci sont l'ilium (partie supérieure), l'ischium (partie postéro-inférieure) et le pubis (partie antéro-inférieure). Les deux os coxaux s'articulent en arrière avec le sacrum et en avant à la symphyse pubienne. Le sacrum représente le prolongement inférieur de la colonne vertébrale composé de cinq vertèbres sacrées soudées. Sous le sacrum se trouve le coccyx qui comporte de trois à cinq vertèbres soudées également.

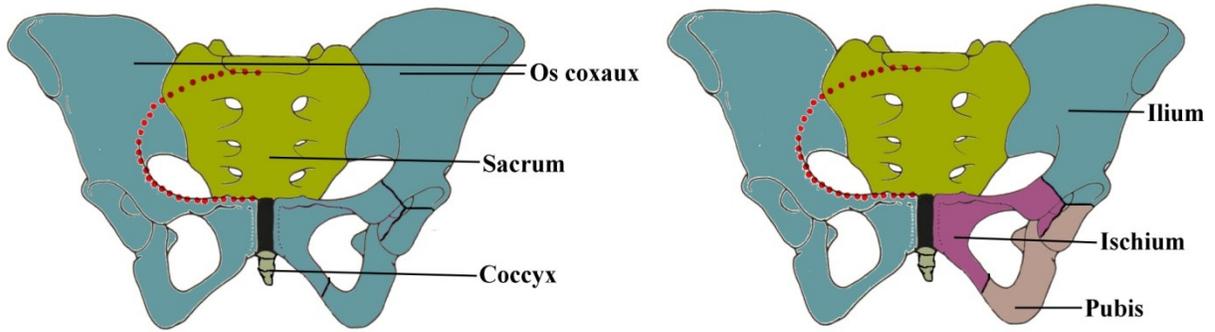


Figure 7. Vue antérieure des pièces osseuses qui composent le bassin. Adaptée de commons.wikimedia.org/wiki/File:Skeletpelvis-pubis.jpg, téléchargée le 09/05/2013.

Le Tableau I résume les points anatomiques répertoriés dans la littérature sur la surface pelvienne de pièces cadavériques ou d'individus. Leur localisation est l'étape initiale pour décrire la géométrie spatiale du bassin. Ces repères sont développés ci-après et les plus appropriés au présent projet sont illustrés à la Figure 8.

Tableau I. Points anatomiques pelviens cités dans la littérature pour représenter la morphologie du bassin.

Repères anatomiques	Description de points anatomiques	Références
<ul style="list-style-type: none"> Promontoire sacré 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie antérieure du promontoire sacré - Partie postérieure du promontoire sacré 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Delorme et al. (2003) 2. Mac-Thiong et al. (2003) 3. Humbert, De Guise, Aubert, Godbout et Skalli (2009)
<ul style="list-style-type: none"> Crête iliaque 	<ul style="list-style-type: none"> - Point supérieur de la crête iliaque - Point le plus latéral de la crête iliaque 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reynolds, Snow et Young (1982) 2. Kersnič, Igljč, Kralj-Igljč, Srakar et Antolič (1997) 3. Patriquin, Steyn et Loth (2002) 4. Patriquin, Steyn et Loth (2005) 5. Delorme et al. (2003) 6. Mitton et al. (2006)
<ul style="list-style-type: none"> Épine iliaque postéro-supérieure 	<ul style="list-style-type: none"> - Proéminence iliaque 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reynolds et al. (1982) 2. Delorme et al. (2003) 3. Patriquin et al. (2005) 4. Mitton et al. (2006) 5. Stylianides et al. (2012)
<ul style="list-style-type: none"> Acétabulum 	<ul style="list-style-type: none"> - Point supérieur de l'acétabulum - Bord supérieur de l'acétabulum - Centre de l'acétabulum 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reynolds et al. (1982) 2. Patriquin et al. (2002) 3. Mac-Thiong et al. (2003) 4. Delorme et al. (2003) 5. Humbert et al. (2009)
<ul style="list-style-type: none"> Tête fémorale 	<ul style="list-style-type: none"> - Centre des têtes fémorales - Contour des têtes fémorales 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kersnič et al. (1997) 2. Mitton et al. (2006)
<ul style="list-style-type: none"> Symphyse pubienne 	<ul style="list-style-type: none"> - Tubercule pubien - Crête pubienne 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reynolds et al. (1982) 2. Patriquin et al. (2002)
<ul style="list-style-type: none"> Tubérosité ischiatique 	<ul style="list-style-type: none"> - Proéminence ischiatique 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reynolds et al. (1982) 2. Patriquin et al. (2002) 3. Patriquin et al. (2005) 4. Mitton et al. (2006)

La plupart des points anatomiques présentés au Tableau 1 se retrouvent dans l'étude de Reynolds et al. (1982). Malgré le fait que Reynolds et al. (1982) ont réalisé leur étude à partir de cadavres, certains points anatomiques suscitent beaucoup d'intérêt pour notre travail de recherche puisqu'ils sont nettement visibles sur les images radiographiques. Le bord supérieur des crêtes iliaques et des acétabulums, les épines iliaques postéro-supérieures et en dernier la symphyse pubienne sont des points anatomiques sur lesquels cette recherche a été basée. Une autre étude d'intérêt pour notre projet de maîtrise est celle réalisée par Kersnič et al. (1997). Ces auteurs ont identifié le point supérieur et le plus latéral de la crête iliaque ainsi que le

centre de la tête fémorale. Ce dernier repère présent dans la plupart des études sert à décrire l'alignement sagittal entre la colonne vertébrale et le bassin.

Afin d'analyser les mouvements de bascule vers l'arrière et l'avant du bassin, Moes (1998) a identifié cinq points anatomiques, tels que les épines iliaques antéro-supérieures et postéro-supérieures (gauche et droite) ainsi que le bord antéro-supérieur de la symphyse pelvienne. Cet auteur a toutefois repéré les points anatomiques par la méthode de palpation chez 27 étudiants sains. Della Croce, Cappozzo et Kerrigan (1999) ont également identifié les repères anatomiques sur le bassin par la technique de palpation. Ces auteurs, en plus d'utiliser les épines iliaques antéro-supérieures et postéro-supérieures de chaque côté du bassin, ont considéré le centre des acétabulums et des têtes fémorales. L'étude réalisée par Mac-Thiong et al. (2003) suscite aussi de l'intérêt pour la présente recherche. Ces auteurs ont utilisé le promontoire sacré et la tête fémorale comme des repères anatomiques, mais ont aussi évalué l'alignement sagittal de la colonne vertébrale et du bassin sur 160 sujets ayant la scoliose idiopathique de l'adolescence. Ces deux repères anatomiques serviront à analyser la relation du bassin avec la déformation scoliotique. Afin de mesurer 12 paramètres morphologiques du bassin en 3D, Delorme et al. (2003) ont choisi 21 points anatomiques sur des radiographies postéro-antérieures et latérales de sujets scoliotiques. Sur le sacrum, il y avait 13 points anatomiques dont 7 étaient situés sur le promontoire sacré. Ce dernier repère anatomique sera l'un des plus utilisés dans ce mémoire. Dans leur étude, Mitton et al. (2006) ont repéré le point supérieur et le plus latéral de la crête iliaque, les centres de têtes fémorales, les épines iliaques postéro-supérieures ainsi que les tubérosités ischiatiques sur trois spécimens cadavériques du bassin. Ces repères ont été identifiés sur les images radiographiques afin de reconstruire un modèle anatomique du bassin en 3D au moyen de la stéréoradiographie. Ces repères anatomiques à l'exception du point le plus latéral de la crête iliaque seront aussi utilisés. De plus, cette méthode d'identification de points anatomiques sera également abordée dans la présente étude.

À cet effet, le présent travail de maîtrise est basé sur des repères anatomiques, tels que le promontoire sacré, les épines iliaques postéro-supérieures et les acétabulums qui ont déjà été employés dans plusieurs études (Delorme et al., 2003; Kersnič et al., 1997; Reynolds et al., 1982) et qui peuvent être observés dans les images radiographiques postéro-antérieure et

latérale. La plupart des points anatomiques utilisés dans ce mémoire, tels que l'extrémité la plus supérieure de la crête iliaque, les épines iliaques postéro-supérieures, l'arcade des acétabulums, la symphyse pubienne et, en dernier, les tubérosités ischiatiques sont tirés de l'étude réalisée par Reynolds et al. (1982).

Les repères anatomiques du bassin qui sont d'intérêt pour le présent travail de maîtrise sont illustrés à la Figure 8 et décrits ci-dessous dans le but de clarifier leur localisation. Le choix des repères anatomiques utilisés dans la présente recherche est attribuable à leur visibilité sur les images radiographiques ainsi qu'à leur importance dans la littérature.

- Le *promontoire sacré* (PS) est la surface supérieure du corps de la première vertèbre sacrée souvent représenté par son centre géométrique. Il représente un repère anatomique important pour plusieurs auteurs (Duval-Beaupere, Schmidt, & Cosson, 1992; Roussouly, Gollogly, Berthonnaud, & Dimnet, 2005) afin de calculer l'orientation du bassin dans le plan sagittal telle que la pente sacrée. En plus, il servira comme point anatomique principal pour quatre longueurs dans le but de documenter une distorsion pelvienne.
- *L'extrémité la plus supérieure la crête iliaque* (ESCI) correspond au point anatomique le plus haut sur le bord supérieur de la crête iliaque de chaque os coxal. Ce point anatomique sera utilisé dans un paramètre d'orientation du bassin pour documenter son inclinaison latérale au cours de la croissance des filles scoliotiques.
- Les *épines iliaques postéro-supérieures* (EIPS) sont les proéminences les plus postérieures de l'ilium. Elles serviront de point anatomique pour trois longueurs et un angle. Ces derniers permettront d'identifier une asymétrie entre les côtés du bassin. De plus, ce repère sera aussi utilisé pour déterminer la rotation du bassin.
- *L'acétabulum* (AC) est une cavité articulaire située sur la face externe du bassin. Il correspond à la jonction des trois pièces osseuses suivantes : l'ilium, l'ischium et le pubis. Sa forme en demi-sphère reçoit la tête fémorale formant ainsi l'articulation coxo-fémorale ou la hanche. La surface supérieure de l'acétabulum, plus précisément le bord extérieur de son arcade, correspond au point anatomique le plus utilisé dans la

présente étude pour décrire la géométrie du bassin ainsi que sa position dans l'espace. Ce repère sera impliqué dans quatre longueurs et trois angles.

- Les *têtes fémorales* (TF) ont la forme des deux tiers d'une sphère de 40 à 50 mm de diamètre situés sur la surface supérieure médiale de l'extrémité proximale du fémur. Les têtes fémorales servent souvent pour mesurer l'alignement sagittal entre le bassin et la colonne vertébrale afin de déterminer l'équilibre postural de l'individu (Duval-Beaupere et al., 1992; Legaye et al., 1998; Mac-Thiong et al., 2003). Ainsi, le centre des têtes fémorales (CTF) dans la présente recherche servira de point anatomique pour le paramètre d'incidence pelvienne dans le but de documenter la rotation du bassin vers l'avant (antéversion) ou vers l'arrière (rétroversion) chez les jeunes filles scoliotiques.
- La *symphyse pubienne* (SP) correspond à l'articulation qui relie les deux extrémités des os coxaux vers l'avant du bassin. Elle unit plus particulièrement le pubis gauche au pubis droit. Ce repère utilisé dans la littérature (Boulay et al., 2006; Reynolds et al., 1982) servira de point anatomique pour quatre paramètres morphologiques du bassin.
- Les *tubérosités ischiatiques* (TI) sont des proéminences osseuses localisées sur la partie antérieure de chaque ischium. Généralement, ces repères sont utiles pour certains auteurs (Mitton et al., 2006; Qiu et al., 2012) qui les utilisent pour calculer la hauteur des deux os coxaux pelviens. Toutefois, dans le présent mémoire, ils serviront des points anatomiques pour le paramètre d'obliquité des tubérosités ischiatiques. Ce paramètre repose sur la technique d'obliquité pelvienne proposée par Delorme et al. (2003). Ces repères anatomiques serviront à mesurer l'inclinaison latérale du bassin.

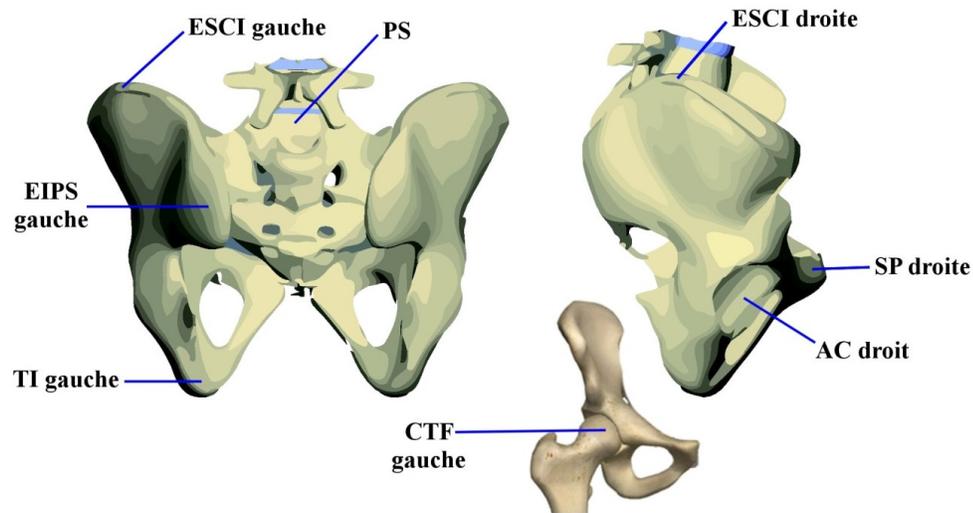


Figure 8. Illustration des principaux points anatomiques utilisés dans le présent mémoire. PS : promontoire sacré; ESCI : extrémité supérieure de la crête iliaque; EIPS : épine iliaque postéro-supérieure; AC : acétabulum; CTF : centre de la tête fémorale; SP : symphyse pubienne; TI : tubérosité ischiatique.

2.2 Paramètres du bassin pour l'étude de sujets sains

Selon plusieurs études (Legaye et al., 1998; Roussouly & Nnadi, 2010; Vrtovec et al., 2012), l'alignement sagittal du bassin dans l'espace joue un rôle très important pour l'équilibre et la stabilité posturale de l'individu. Les mesures les plus employées sont résumées à la Figure 9 et décrites ci-dessous. En effet, elles nous serviront à documenter la progression des déformations pelviennes pertinentes à la pratique clinique telles que la rotation du bassin dans l'espace.

L'épaisseur pelvienne (EP) est la distance entre le milieu de la surface supérieure du corps de la première vertèbre sacrée (S1) et l'axe bicoxo-fémoral. Cet axe est représenté à la fois par une ligne qui rejoint le centre des têtes fémorales du bassin. L'épaisseur pelvienne (Duval-Beaupere et al., 1992) correspond à la longueur tridimensionnelle PS-acétabulum. Le Porte-à-faux (PAF) est la distance horizontale entre la projection verticale du point central de la première vertèbre sacrée et l'axe bicoxo-fémoral. La valeur de ce paramètre est positive

dans le cas d'une rétroversion du bassin tandis qu'une valeur négative représente un cas d'antéversion pelvienne (Legaye et al., 1998).

La pente sacrée (SS) est l'angle formé à partir d'une tangente à la surface supérieure de la première vertèbre sacrée et l'horizontale. Ce paramètre d'orientation du bassin est de grande importance puisqu'il est étroitement lié à la lordose lombaire. De plus, une valeur élevée de pente décrit un sacrum plus à l'horizontale tandis qu'une faible valeur représente un sacrum verticalisé (Legaye et al., 1998). La version pelvienne (VP) est l'angle formé par la droite qui relie le centre du plateau de S1 au point milieu de l'axe bicoxo-fémoral et la verticale. Elle représente également un paramètre d'orientation pelvienne. Lorsque cet angle augmente, le bassin bascule vers l'arrière (rétroversion) et, lorsqu'il diminue, il correspond à une bascule vers l'avant produisant ainsi une antéversion pelvienne (Morvan, Wybier, Mathieu, Vuillemin, & Guerini, 2008). En dernier, l'incidence pelvienne (IP) représente la somme de la pente sacrée et de la version pelvienne. Elle est considérée comme étant le principal paramètre capable de décrire l'alignement sagittal entre le bassin et la colonne vertébrale.

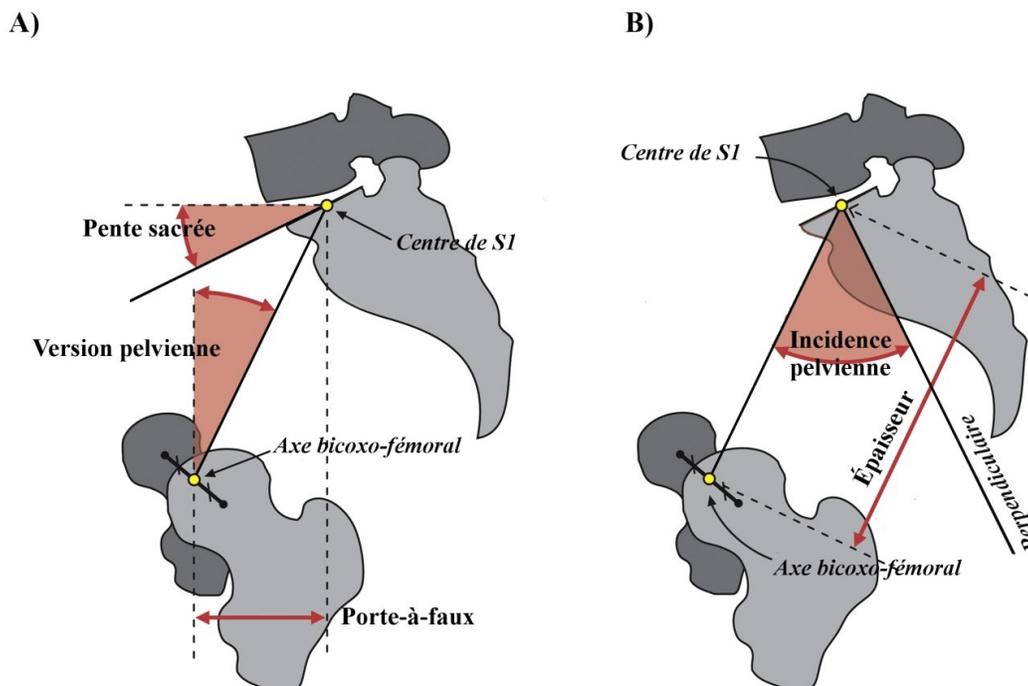


Figure 9. A) représentation des paramètres positionnels pelviens; B) représentation des paramètres anatomiques pelviens. Adaptée de Vrtovec et al. (2012), téléchargée le 14/05/2013.

Le Tableau II présente les paramètres sagittaux pelviens qui sont les plus employés sur des sujets sains par la plupart des auteurs tels que la pente sacrée, version pelvienne et incidence pelvienne. Ceux-ci seront utilisés dans le présent travail afin de documenter les déformations pelviennes associées à la scoliose qui sont pertinentes à la pratique clinique au cours de la croissance des jeunes filles. La plupart des travaux ont été réalisés sur des femmes et hommes adultes sans antécédents pathologiques de la colonne vertébrale ou de la hanche. Selon les études, la moyenne d'âge des sujets varie entre 24 ans (Legaye et al., 1998) et 45,4 ans (Horduna & Legaye, 2008).

Tableau II. Les paramètres sagittaux pelviens chez les sujets sains. Les paramètres anatomiques sont représentés par l'épaisseur pelvienne (EP) et l'incidence pelvienne (IP). Les paramètres positionnels sont représentés par la pente sacrée (SS), version pelvienne (VP) et le porte-à-faux (PAF).

Paramètres anatomiques et positionnels	Outils de mesure LAT (latérale)	Nombre de sujets F (femmes) H (hommes)	Âge (moyenne ± écart-type)	Références
EP, VP, SS, IP, PAF	Radio LAT	- 6F adultes - 11H adultes	F : 29 ± 10 ans H : 29,7 ± 12 ans	Duval-Beaupere et al. (1992)
VP, SS, IP, PAF	Reconstruction en 3D	49 adultes : 21F et 28H	24 ± 5,8 ans (19-50 ans)	Legaye et al. (1998)
EP, VP, SS, IP, PAF	Radio LAT	30 adultes : 15F et 15H	34,3 ± 3,06 ans (30-39 ans)	Rajnic, Pomeroy, Templier, Lavaste et Illes (2001)
VP, SS, IP	Radio LAT : assise et debout	24 adultes : 9F et 15H	31 ± 3,89 ans (24-41 ans)	Eddine et al. (2001)
VP, SS, IP	Radio LAT	100 adultes : 46 % F et 54 % H	26,5 ± 4,0 ans (23-45 ans)	Vaz, Roussouly, Berthonnaud et Dimnet (2002)
VP, SS, IP	Radio LAT	180 enfants et adolescents : 112F et 68H	12 ± 3,1 ans (4-18 ans)	Mac-Thiong, Berthonnaud, Dimar, Betz et Labelle (2004)
VP, SS, IP	Radio LAT	160 adultes	25,7 ± 5,5 ans (20-70 ans)	Berthonnaud, Dimnet, Roussouly et Labelle (2005)
VP, SS, IP	Radio LAT	160 adultes : 86F et 74H	27 ans (18-48 ans)	Roussouly et al. (2005)
VP, SS, IP	Radio LAT	300 adultes : 110F et 190H	35 ± 12 ans (20-70 ans)	Vialle et al. (2005)
VP, SS, IP	Radio LAT	149 adultes : 71F et 78H	30,8 ± 6,0 ans (19-51 ans)	Boulay, Tardieu, Hecquet et al. (2006)
IP	Radio LAT	132 adultes : 73F et 59H	45,4 ± 17,7 ans (15-76 ans)	Horduna et Legaye (2008)
VP, SS, IP	Reconstruction en 3D	60 adultes : 30F et 30H	F : 26 ans (20-42 ans) H : 27 ans (21-49 ans)	Janssen, Drevelle, Humbert, Skalli et Castelein (2009)
PS, IP, PAF	Radio LAT	32 adolescents : 12F et 8H	15,1 ± 1,9 ans	Mendoza-Lattes, Ries, Gao et Weinstein (2010)
VP, PS, IP	Radio LAT	33 adolescentes	13,7 (11-18 ans)	Yong et al. (2012)

D'après Vrtovec et al. (2012), les paramètres sagittaux du bassin sont classés en deux groupes, à savoir : les paramètres anatomiques représentant la morphologie pelvienne (épaisseur et incidence pelvienne) et les paramètres de position qui décrivent l'orientation du bassin dans l'espace (pente sacrée, version pelvienne et porte-à-faux). Dans la plupart des études, les paramètres géométriques et d'orientation du bassin de sujets non scoliotiques ont été mesurés sur une seule radiographie. Ces paramètres ont été calculés le plus souvent à partir du plan sagittal afin d'observer la relation du bassin avec la colonne vertébrale. Cela peut biaiser l'analyse morphologique du bassin, car on néglige ce qui se passe anatomiquement dans les plans frontal et horizontal.

2.3 Bassin scoliotique

Des études (Dalleau et al., 2012; Stylianides et al., 2012) suggèrent que la progression de la scoliose soit liée à une croissance osseuse asymétrique du bassin. De plus, Stylianides et al. (2012) proposent que cette asymétrie géométrique du bassin associée à la déformation de la colonne vertébrale se déroule dans le plan transversal en fonction de la progression de l'angle de Cobb. Leurs résultats ont indiqué que la scoliose serait une conséquence de la torsion pelvienne.

Notamment, une rotation axiale du bassin dans le sens de la déformation scoliotique a été observée dans plusieurs études (Gum et al., 2007; Pasha et al., 2010). De plus, Saji, Upadhyay et Leong (1995) ont noté que l'angle du col du fémur de chaque côté de l'articulation coxo-fémorale du groupe des patientes ayant la scoliose idiopathique était plus élevé que celui du groupe témoin. En outre, ils ont supposé que cette augmentation pourrait être liée au type de scoliose et aux côtés de la courbure scoliotique.

Afin d'observer la morphologie et l'orientation spatiale du bassin chez les patients atteints de la scoliose idiopathique, plusieurs études font appel aux radiographies prises dans différents plans anatomiques. Les techniques de mesure utilisées pour quantifier la géométrie du bassin et sa position, qui serviront à ce travail de maîtrise, sont présentées à la section suivante. Le lecteur est référé à l'annexe A et B pour une description détaillée des paramètres.

2.3.1 Mesures radiographiques bidimensionnelles

La plupart des études font référence à l'orientation et à la géométrie du bassin scoliotique à partir des mesures prises dans un seul plan, à savoir le plan postéro-antérieur, c'est-à-dire la vue de face du bassin ou le plan latéral qui correspond à la vue de profil de celui-ci. Parfois, les informations des deux plans anatomiques sont utilisées, mais séparément, c'est-à-dire que les clichés radiographiques sont analysés l'un après l'autre. Ces analyses sont donc bidimensionnelles (2D). Dans leur étude, Mac-Thiong et al. (2003) ont évalué trois paramètres de l'alignement sagittal du bassin scoliotique. Ceux-ci ont été calculés sur les radiographies latérales et ont permis de calculer des paramètres tels que la version pelvienne, la pente sacrée et l'incidence pelvienne. Ces chercheurs ont observé que l'incidence pelvienne des sujets scoliotiques était significativement plus élevée que celle rapportée dans la littérature pour les adolescents normaux. Cette étude suscite de l'intérêt pour le présent travail de maîtrise puisque nous analyserons également les mêmes paramètres sagittaux pelviens, mais durant la période où les filles sont en observation jusqu'au traitement par corset.

Hong et al. (2010) ont utilisé une radiographie latérale pour mesurer l'orientation du bassin alors que la radiographie postéro-antérieure était utilisée uniquement dans le but de calculer l'angle de Cobb. Ces auteurs ont rapporté que la version pelvienne et le paramètre porte-à-faux étaient significativement plus élevés pour les patients ayant une scoliose. Cela signifie que le bassin des sujets scoliotiques a basculé vers l'arrière produisant ainsi une rétroversion pelvienne. Hong et al. (2010) ont également observé une corrélation significative de la pente sacrée, version pelvienne et de l'incidence pelvienne à la déformation du rachis. Le présent travail de maîtrise fait également appel aux paramètres sagittaux pelviens de la même manière que Hong et al. (2010). Par contre, seules les jeunes filles scoliotiques dont la sévérité varie entre faible et modérée seront étudiées.

L'étude réalisée par Gum et al. (2007) suscite aussi de l'intérêt pour le présent travail de maîtrise puisque ces auteurs ont mesuré d'autres variables morphologiques du bassin que celles des paramètres sagittaux pelviens limités au plan sagittal. Afin de décrire la relation entre la direction de la rotation axiale du bassin et celle de la déformation scoliotique, Gum et al. (2007) ont mesuré la largeur du bassin au moyen d'une radiographie postéro-antérieure.

Toutefois, ces auteurs ont supposé que la différence entre les largeurs du bassin serait due exclusivement à sa rotation axiale sans considérer que le bassin pourrait aussi présenter une asymétrie morphologique. À cet effet, la rotation du bassin sera caractérisée dans ce mémoire au moyen de trois paramètres d'orientation, tels qu'une longueur dans le plan sagittal et deux angles dans le plan horizontal.

En somme, la plupart des études sur le bassin sont réalisées en 2D et comprennent essentiellement des paramètres sagittaux. Toutefois, les paramètres du bassin mesurés en 3D pourraient améliorer notre compréhension sur le rôle du bassin dans l'évolution de la scoliose. Le présent de travail de maîtrise abordera aussi des paramètres sagittaux pelviens (Hong et al., 2010; Lonner, Auerbach, Sponseller, Rajadhyaksha, & Newton, 2010; Mac-Thiong et al., 2003) en 2D dans le but de documenter leur progression au fil du temps. Par contre, l'objet principal de cette recherche sera la morphologie tridimensionnelle du bassin.

2.3.2 Mesures 3D sur des spécimens cadavériques

Les études sur la reconstruction tridimensionnelle du bassin même à partir de cadavres sont pertinentes pour le présent travail. Delorme et al. (2003) ont validé l'exactitude et la précision d'une méthode de reconstruction 3D de la colonne vertébrale, de la cage thoracique et du bassin sur les sujets scoliotiques. Pour la reconstruction tridimensionnelle du bassin, ces auteurs ont calculé les coordonnées 3D de 21 repères anatomiques identifiés sur la radiographie postéro-antérieure et latérale. Ce calcul a été réalisé au moyen de la technique de stéréoradiographie nommée DLT « *Direct Linear Transformation* » décrite par Abdel-Aziz (1971). En plus d'utiliser les deux vues radiographiques pour une reconstruction 3D du squelette axial, Delorme et al. (2003) ont également utilisé une vue postéro-antérieure ayant une inclination orientée vers le bas de 20° pour la reconstruction 3D des côtes. L'avantage de cette étude est l'utilisation d'un grand nombre de repères anatomiques identifiés sur le bassin cadavérique, ce qui procure une meilleure représentation. Finalement, la plus importante démarche à retenir dans l'étude de Delorme et al. (2003) est celle des moyens de mesure des paramètres d'orientation du bassin, tels que l'obliquité pelvienne et l'obliquité de la hanche. Le premier paramètre représente un angle mesuré à partir d'une ligne qui lie le bord supérieur de chaque crête iliaque à l'horizontale. Dans le présent travail, ce paramètre porte le nom

d'obliquité des crêtes iliaques au lieu d'obliquité pelvienne. Quant à l'obliquité de la hanche, les points anatomiques ont été remplacés par le bord supérieur de l'acétabulum gauche et droit. C'est pourquoi dans le présent mémoire, il sera appelé l'obliquité des acétabulums. En plus de reprendre ces deux paramètres, nous allons mesurer une troisième obliquité, soit celle des tubérosités ischiatiques. Cette dernière sera formée par un angle calculé par la droite qui lie les deux points anatomiques situés sur les tubérosités ischiatiques à l'axe médio-latéral dans le plan frontal.

Un autre modèle géométrique 3D du bassin réalisé au moyen de radiographies biplanaires a été développé par Mitton et al. (2006). La validation de leur modèle a été effectuée sur trois pièces anatomiques du bassin sec dont les extrémités proximales des fémurs ont été préservées afin de se rapprocher de la réalité. La précision de la reconstruction 3D a été évaluée en la comparant avec des méthodes de reconstruction 3D à l'aide du CT-scan. Les résultats de précision obtenus avec ce modèle ont été similaires à ceux obtenus par CT-scan avec une différence moyenne de 1,6 mm. Les auteurs ont alors conclu que la morphologie 3D du bassin pouvait être reconstruite avec une précision de 5 %. Bien que cette étude ait été réalisée sur des pièces anatomiques, celle-ci suscite un grand intérêt pour le présent travail de maîtrise puisqu'elle rapporte un ordre de grandeur sur l'erreur de mesure. De plus, certains points anatomiques pelviens utilisés par ces auteurs seront repris dans le présent travail notamment le promontoire sacré et les têtes fémorales.

Afin de mesurer l'asymétrie morphologique du bassin, Boulay, Tardieu, Benaim et al. (2006) ont identifié 476 points anatomiques sur la surface du bassin de 12 cadavres adultes sans aucun antécédent pathologique. Les coordonnées des points anatomiques du bassin ont été calculées au moyen d'un système électromagnétique (*Fastrak*). Des mesures anatomiques 3D du bassin ont alors été représentées par 270 distances linéaires et 79 angles formés entre les points anatomiques. Ces auteurs ont constaté que 15 dimensions étaient significativement asymétriques entre les côtés gauche et droit, telles que le paramètre d'orientation des crêtes iliaques, la distance entre la crête sacro-iliaque et l'acétabulum et la distance entre l'apex de la crête iliaque et l'acétabulum. De plus, ils ont observé que cette asymétrie morphologique pelvienne semble suivre une trajectoire en spirale, c'est-à-dire qu'une torsion des ailes iliaques

se produit dans le sens horaire tandis qu'une torsion de la symphyse pubienne se produit dans le sens contraire, comme illustré à la Figure 10. Le paramètre essentiel à retenir dans l'étude de Boulay, Tardieu, Benaim et al. (2006) est celui de la longueur pelvienne. Le présent mémoire se repose sur cette longueur pour mesurer la distance linéaire 3D entre le promontoire sacré et la symphyse pelvienne sur chaque côté du bassin. Ce paramètre permettra ainsi de documenter une éventuelle asymétrie de longueur du bassin entre les côtés. De plus, la distorsion du bassin, telle que représentée à la Figure 10, sera également investiguée dans ce mémoire.

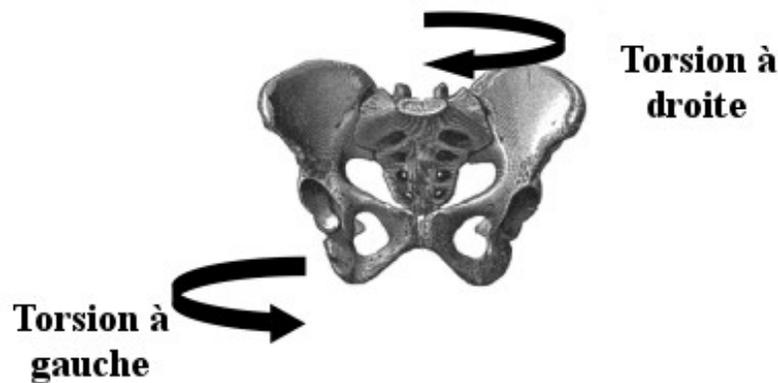


Figure 10. Représentation de la façon dont se produit l'asymétrie pelvienne : les ailes iliaques tournent à droite tandis que les symphyses pubiennes tournent à gauche. Adaptée de Boulay, Tardieu, Benaim et al. (2006), téléchargée le 21/05/2013.

Pour conclure, le nombre de pièces cadavériques du bassin utilisé par étude est petit, variant entre 1 (Delorme et al., 2003) et 12 (Boulay, Tardieu, Benaim et al., 2006). En outre, la plupart des études portent sur des bassins d'hommes et de femmes âgés, ayant une moyenne d'âge se situant entre 65 ans (Mitton et al., 2006) et 72,6 ans (Boulay, Tardieu, Benaim et al., 2006). De plus, Delorme et al. (2003) ont analysé une pièce cadavérique d'une femme âgée de 44 ans qui est décédée d'une déficience pulmonaire causée par la compression de ses poumons due à une déformation scoliotique sévère. Dans le présent travail, seules les patientes ayant des scoliozes faibles lors de la première évaluation chez le médecin à modérées avant le port du corset seront étudiées. Le but de la présente recherche sera d'analyser les bassins chez les jeunes scoliotiques qui n'ont subi aucun type d'intervention médicale.

2.3.3 Mesures 3D du bassin de patients scoliotiques

Depuis près de 40 ans, la scoliose est analysée comme étant une déformation tridimensionnelle de la colonne vertébrale (Koreska, Gibson, & Robertson 1978a; Koreska, Schwentker, Albisser, Gibson, & Mills, 1978b; McNeice et al., 1975). Par contre, l'étude tridimensionnelle du bassin est plus récente. L'une des premières études qui a mis en évidence la morphologie 3D pelvienne chez les patients ayant la scoliose idiopathique a été réalisée par Gauvin et al. (1998). Ces chercheurs ont identifié et numérisé sur des radiographies 19 points anatomiques au niveau du bassin. La reconstruction 3D a été réalisée au moyen du DLT. De plus, ils ont observé que les erreurs les plus faibles étaient relatives au promontoire sacré et aux acétabulums. Cette étude suscite un grand intérêt, car le présent travail de maîtrise repose sur la reconstruction 3D du bassin à partir de deux clichés radiographiques de façon similaire à la méthode proposée par ces auteurs.

Qiu et al. (2012) ont utilisé le cliché radiographique postéro-antérieur ainsi que le CT-scan pour réaliser une reconstruction tridimensionnelle du bassin. Il est à noter toutefois que cette dernière technologie présente certaines limites (Dubousset et al., 2005). En plus de placer le sujet en décubitus, la dose d'irradiation par le CT-scan est élevée, car de nombreuses coupes sont nécessaires pour étudier l'ensemble rachis-bassin. Qiu et al. (2012) ont utilisé comme repères les épines iliaques antéro-supérieures et le bord inférieur de l'articulation sacro-iliaque. Les paramètres morphologiques pelviens mesurés dans leur étude étaient la hauteur du bassin et de l'ilium ainsi que la largeur de ce dernier. Ces paramètres de déformations du bassin et d'asymétrie anatomique sont pertinents pour notre étude puisqu'ils pourront identifier une possible distorsion pelvienne chez les patients scoliotiques au cours de leur croissance.

Stylianides et al. (2012) ont proposé une méthode de reconstruction 3D du bassin à partir de neuf points anatomiques identifiés sur chaque côté du bassin. Ces repères anatomiques ont été utilisés afin d'estimer la morphologie et l'orientation du bassin dans l'espace. Leurs coordonnées 3D ont été obtenues au moyen d'un capteur magnétique nommé « *Flock of Birds* » ayant la première vertèbre sacrée (S1) comme référence. Ces auteurs ont supposé qu'une différence significative des angles mesurés entre le groupe scoliotique et le contrôle serait considérée comme une inclinaison latérale anormale du bassin tandis qu'une

différence des distances linéaires entre S1 et chacun des huit points anatomiques du bassin serait indicatif d'une distorsion pelvienne. Ces observations sont aussi indicatives d'un mouvement de rotation axial ou une inclinaison latérale dans l'espace, ou encore une asymétrie morphologique entre les os coxaux. Le bassin pourra également présenter toutes les déformations citées précédemment.

Ce qu'il faut retenir de l'étude de Stylianides et al. (2012) est leur technique de mesure pour l'inclinaison latérale du bassin (illustrée à la Figure 11) représentée par l'angle entre les lignes qui joignent le promontoire sacré à quatre points anatomiques. Trois longueurs morphologiques mesurées dans ce mémoire sont basées sur le même principe d'un seul point anatomique de départ. Ces longueurs mesurées sur chaque os coxal seront représentées par les épines iliaques postéro-supérieures jusqu'au promontoire sacré, les acétabulums et la symphyse pubienne. Nous croyons qu'une différence significative observée pour ces valeurs entre les côtés du bassin pourrait représenter une asymétrie morphologique du bassin.

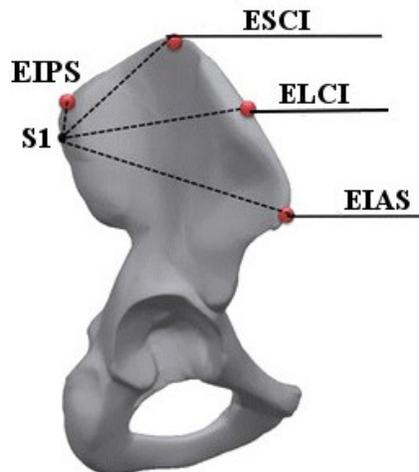


Figure 11. Illustration d'une vue de droite du bassin avec des mesures représentée par la distance de la première vertèbre sacrée (S1) à l'extrémité supérieure (ESCI) et latérale des crêtes iliaques (ELCI) et aussi aux épines iliaques postéro-antérieures (EIPS) et antéro-supérieures (EIAS). Adaptée de Stylianides et al. (2012), téléchargée le 10/06/2013.

Contrairement à d'autres travaux qui comparent les paramètres morphologiques du bassin entre les sujets scoliotiques et non scoliotiques, Dalleau et al. (2012) ont analysé la

géométrie 3D du bassin et du tronc entre les filles ayant différents degrés de sévérité de scoliose. De plus, ils ont inclus dans leur étude la morphologie du bassin et de la colonne vertébrale ainsi que la posture et l'équilibre. Dalleau et al. (2012) ont utilisé le système « *Flock of Birds* » aussi utilisé antérieurement par Stylianides et al. (2012). Ces chercheurs ont utilisé la même technique de mesure que celle développée par Pasha et al. (2010) pour calculer les inclinaisons latérale et frontale du bassin ainsi que sa rotation transversale dans l'espace. À cet effet, Pasha et al. (*Ibid.*) ont utilisé comme repères anatomiques les épines iliaques antéro-supérieures et postéro-supérieures (gauche et droite) par rapport au promontoire sacré. L'asymétrie pelvienne observée par Dalleau et al. (2012) se révèle être pertinente pour le présent mémoire grâce à l'analyse de plusieurs aspects biomécaniques corporels en lien avec le bassin.

Pour résumer, de nombreuses méthodes de reconstruction 3D du bassin associées à la scoliose existent. Néanmoins, le choix de chaque technique dépend du chercheur. Au Tableau III, la plupart des études 3D portent sur la morphologie et sur l'orientation pelvienne dont la quantité des points anatomiques placés sur la surface du bassin varie entre 4 (Pasha et al., 2010) et 24 (Kadoury, Cheriet, Laporte, & Labelle, 2007). De plus, les types des paramètres 3D mesurés sur le bassin sont différents entre les études. Certains auteurs (Qiu et al., 2012) ont observé les aspects morphologiques du bassin, tels que la largeur et la hauteur de celui-ci. D'autres (Pasha et al., 2010) ont retenu les aspects positionnels pelviens, tels que l'inclinaison et la rotation. Parmi sept études, cinq font appel à la méthode de stéréoradiographie qui utilise deux vues radiographiques dans le but de reconstruire un modèle tridimensionnel du bassin.

Tableau III. Présentation des paramètres du bassin calculés en 3D et leurs moyens de mesure chez les individus ayant divers types de scoliose idiopathique de l'adolescence. Les paramètres sagittaux pelviens sont représentés par VP : version pelvienne; SS : pente sacrée; IP : incidence pelvienne et PAF : porte-à-faux. Les types de scoliose sont représentés par T : thoracique; TL : thoraco-lombaire et L : lombaire.

Paramètres 3D mesurés	Moyens de mesure	Nombre de points	Nombre de sujets	Type de scoliose	Références
Géométrie de la base supérieure du sacrum, de S1, de la courbure sacrée, des crêtes iliaques et des acétabulums	Radio PA et LAT	19	11 scoliotiques et 2 pièces cadavériques du bassin	Non documenté	Gauvin et al. (1998)
VP, SS, IP, PAF	Radio PA et LAT	Non documenté	49 adultes non scoliotiques : 21F et 28H 66F adultes scoliotiques	24 L 42 TL	Legaye et al. (1998)
VP, SS, IP Obliquités du bassin	Radio PA et LAT	24	9 non scoliotiques 51 scoliotiques	Non documenté	Kadoury et al. (2007)
Inclinaison frontale et sagittale Rotation transverse	Radio PA et LAT Système de captation d'analyse du mouvement (5 caméras)	4	12 adolescents non scoliotiques 25 jeunes filles ayant une SIA	18 T à droite 7 T à droite avec une courbe compensatoire à gauche	Pasha et al. (2010)
Distorsion pelvienne : 24 distances Orientation pelvienne : 12 angles	Système Flock of birds	9	28 adolescents non scoliotiques 23 adolescents ayant une scoliose modérée <27° 23 adolescents ayant une scoliose sévère >27°	28 T à droite 16 T à droite ayant une courbe compensatoire à gauche 2 TL à droite	Stylianides et al. (2012)
Morphologie pelvienne : 6 distances Orientation pelvienne : 3 angles	Système Flock of birds	9	22 adolescents ayant une scoliose modérée <27° 23 adolescents ayant une scoliose sévère	Toutes les courbures étaient à droite	Dalleau et al. (2012)
Hauteur du bassin et de l'ilium Largeur de l'ilium	Radio PA CT-scan	6	42 adolescents ayant une SIA classés en 3 groupes	12 T, 8 TL/L, 22 doubles majeurs	Qiu et al. (2012)

2.4 Relation entre le bassin et la scoliose

Le concept de Nottingham décrit par Burwell et al. (1992) met en relation le bassin et la déformation de la colonne vertébrale. Cette théorie suggère qu'une anomalie du bassin causée par un développement anormal du système nerveux central pourrait entraîner des mécanismes neuromusculaires qui perturberaient ainsi l'alignement de la colonne vertébrale. Cette anomalie du bassin pourrait être causée par une altération de son orientation dans l'espace (Gum et al., 2007; Mac-Thiong et al., 2003) ou encore être due à une asymétrie dans sa géométrie (Dalleau et al., 2012; Mac-Thiong et al., 2006; Stylianides et al., 2012).

À la suite de l'étude de Burwell et al. (1992), l'alignement sagittal entre le bassin et la colonne a été investigué dans plusieurs études (Boulay, Tardieu, Hecquet et al., 2006; Legaye et al., 1998; Lonner et al., 2010; Mac-Thiong et al., 2003). Le paramètre pelvien sagittal le plus étudié est l'incidence pelvienne proposée par Duval-Beaupere et al. (1992) et Legaye et al. (1998). Boulay, Tardieu, Hecquet et al. (2006) ont conclu qu'un angle de l'incidence pelvienne de 44° pourrait entraîner une diminution de la pente sacrée et, conséquemment, une lordose lombaire aplatie. À l'opposé de cela, une incidence élevée au-dessus de 62° entraînerait une augmentation de la pente sacrée et une lordose plus prononcée. Ainsi, des changements morphologiques tels que l'asymétrie du bassin ou encore une rotation axiale de celui-ci dans l'espace pourraient bouleverser toute la structure de la colonne vertébrale.

Cette observation a été aussi constatée auparavant par Berthonnaud et al. (2005) qui ont considéré l'ensemble bassin-rachis dans le plan sagittal comme étant une chaîne linéaire. De plus, ce concept de Nottingham suggère que des changements dans la forme ou dans la position du bassin ou du rachis pourraient directement influencer le segment adjacent altérant ainsi l'équilibre postural, tel que dans le cas de la scoliose idiopathique. Une autre étude qui porte sur la relation entre la colonne vertébrale et le bassin est celle réalisée par Roussouly et al. (2005). Ces chercheurs ont décrit quatre types de lordose lombaire basés sur la pente sacrée, un paramètre d'orientation du bassin reflétant l'alignement sagittal global. Par ailleurs, un autre paramètre sagittal du bassin à noter est celui de la version pelvienne, car une augmentation ou une diminution de cet angle entraîne des conséquences directes sur le sacrum

et sur la colonne lombaire. Selon Morvan et al. (2008), une augmentation de la version pelvienne fait en sorte que le centre de masse du corps se déplace en arrière des têtes fémorales produisant une rétroversion qui rapproche le corps du sacrum de la verticale. À l'opposé de cela, la diminution de la version pelvienne entraînerait une antéversion du bassin et une horizontalisation du sacrum. À cet effet, il est possible de faire la distinction de la rétroversion pelvienne à l'antéversion pelvienne au moyen d'une vue horizontale du bassin. Lorsque le sacrum est verticalisé, les trous ischio-pubiens sont nettement visibles sur la vue de dessus du bassin, ce qui indique qu'il est rétroversé et que la colonne lombaire est aplatie (Morvan et al., 2008). À cet égard, l'orientation du bassin est un facteur relatif à l'alignement de la colonne vertébrale dans le plan sagittal. Pour cette raison, le présent travail de maîtrise prendra en considération au cours de la croissance des jeunes filles tous les paramètres pelviens qui pourraient décrire l'orientation du bassin dans l'espace.

En ce qui concerne le rôle du bassin dans la pathogenèse de la scoliose, Nicolopoulos, Burwell et Webb (1985) ont constaté que la grande taille des sujets scoliotiques par rapport aux sujets non scoliotiques était due à un accroissement anormal du bassin et des membres inférieurs. Afin de calculer la hauteur du bassin, ces chercheurs se sont basés sur la méthode de Merriam, Burwell, Mulholland, Pearson et Webb (1983) en mesurant la taille des filles en positions debout et assise ainsi que la longueur de leurs membres inférieurs à partir de radiographies antéro-postérieures. Cette méthode est toutefois biaisée, car la hauteur pelvienne a été calculée à partir de la soustraction de la longueur des membres inférieurs à la taille du sujet en position debout et à la taille du sujet en position assise (Stylianides et al., 2012) sans considérer l'orientation du bassin dans l'espace.

La relation entre le bassin et la scoliose a toujours été interprétée de deux façons dans les études : soit que la scoliose puisse entraîner des modifications compensatoires dans la morphologie du bassin ou que des changements structuraux du bassin soient des facteurs prédisposant à la scoliose. Mahaudens et al. (2005), par exemple, ont confirmé l'hypothèse qu'une anomalie structurale pelvienne pourrait être secondaire à une scoliose lombaire. Ils ont examiné des radiographies dans le plan frontal de 12 adolescents scoliotiques ayant une courbure lombaire ou thoraco-lombaire par rapport à 12 sujets non scoliotiques. Mahaudens et

al. (2005) n'ont toutefois constaté aucune différence significative de l'orientation du bassin pendant la marche entre les sujets scoliotiques et le groupe contrôle. Selon ces auteurs, cette observation pourrait être expliquée par une augmentation de l'activité musculaire afin d'éviter un déséquilibre postural durant la marche causée par la scoliose lombaire. Ces observations nous amènent à considérer que l'asymétrie morphologique du bassin ou encore sa rotation axiale sont des facteurs étroitement liés à la déformation de la colonne vertébrale telle que la scoliose. L'asymétrie du bassin et son attitude posturale pourraient être des mécanismes compensatoires de la scoliose idiopathique ou encore être les agents qui déclenchent cette maladie. À cet effet, les problématiques du bassin en lien avec la scoliose seront abordées dans la section suivante.

2.5 Problématique du bassin

Des études concernant la rotation axiale pelvienne et l'asymétrie morphologique entre les deux côtés du bassin seront abordées dans cette section. Le mécanisme de distorsion du bassin pendant la croissance de jeunes filles atteintes de la scoliose idiopathique n'a pas encore été investigué. Ce projet de maîtrise examinera l'évolution morphologique du bassin entre l'instant où le diagnostic de la scoliose est posé et le moment où un corset est prescrit afin de mieux comprendre son rôle durant la croissance.

2.5.1 Rotation pelvienne

Divers travaux concernant la rotation du bassin ont été réalisés (Gum et al., 2007; Pasha et al., 2010; Qiu et al., 2012; Stylianides et al., 2012). Certains d'entre eux (Asher, Lai, Carlson, Gum, & Burton, 2010; Gum et al., 2007) ont proposé que la différence observée de la largeur du bassin entre les côtés gauche et droit sur les radiographies postéro-antérieures serait due à une rotation axiale du bassin dans l'espace. Cette rotation pourrait être constatée à partir de l'observation radiographique d'une ombre du bassin plus large sur le côté vers lequel la face antérieure a été mise en rotation. Néanmoins, Qiu et al. (2012) ont interprété que la différence de largeur du bassin notée sur une radiographie pourrait être due à une asymétrie morphologique entre les deux côtés mesurés et non à une rotation du bassin dans le plan horizontal. Dans la présente étude, nous prenons en compte les deux hypothèses décrites

précédemment (Gum et al., 2007; Qiu et al., 2012). Nous supposons que le bassin scoliotique peut présenter à la fois de l'asymétrie pelvienne ainsi que de la rotation selon différentes directions. Pour cette raison, en plus d'étudier les paramètres tridimensionnels du bassin, nous analyserons les paramètres bidimensionnels qui peuvent décrire les déformations pelviennes telles que la rotation.

D'après Gum et al. (2007), la rotation axiale du bassin représente un mécanisme de compensation de la déformation du rachis, comme illustré à la Figure 12. Autrement dit, prenons le cas d'une scoliose thoracique droite où l'apex qui se situe à T8 subit une rotation dans le sens horaire, comme représenté à la Figure 12. Cette rotation serait compensée par des rotations des vertèbres thoraciques plus hautes que T8 et des vertèbres lombaires dans le sens anti-horaire. Ensuite, une rotation axiale du bassin se produirait comme un phénomène compensatoire dans le même sens que la courbure principale où se trouve l'apex (T8). Selon ces auteurs, ce mécanisme se produit pour préserver l'équilibre corporel.

Cependant, l'étude de Gum et al. (2007), comme celle de Lucas, Asher, McIff, Lark et Burton (2005) n'a pas considéré la géométrie du bassin. La faiblesse de ces travaux est que ces chercheurs supposent que la seule explication pour justifier la différence des distances entre les deux côtés du bassin serait celle de l'orientation de celui-ci dans l'espace.

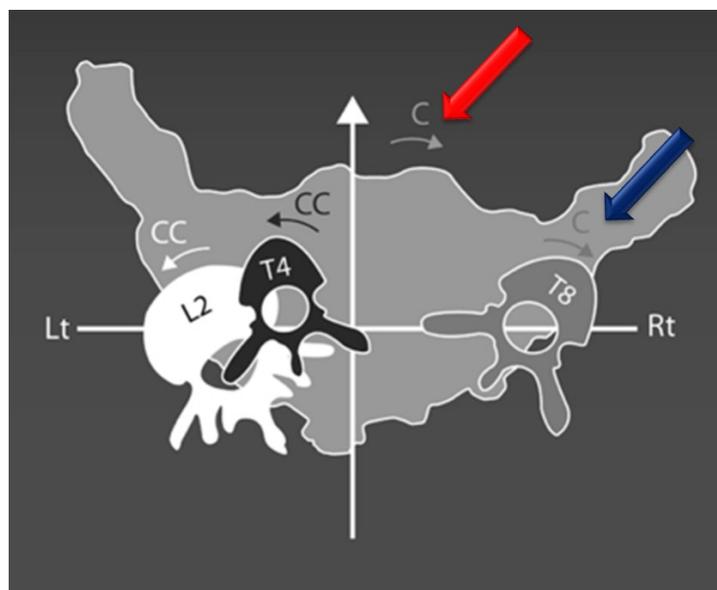


Figure 12. Vue horizontale représentant un mécanisme compensatoire de rotation des structures anatomiques dans une scoliose thoracique droite ayant comme apex T8. La flèche rouge indique la rotation axiale du bassin qui suit le même sens horaire que celle de la vertèbre apex identifiée par la flèche bleue. Adaptée de Gum et al. (2007), téléchargée le 27/05/2013.

À l'opposé de ces dernières recherches, celle de Qiu et al. (2012) soutient l'hypothèse que la rotation axiale pelvienne pourrait être expliquée par une asymétrie géométrique entre les côtés du bassin. Pour mesurer la largeur de chaque ilium du bassin, Qiu et al. (2012) se sont servis des mêmes repères anatomiques que ceux proposés par Gum et al. (2007). Ils ont également évalué la rotation du bassin de la même façon que celle proposée par Lucas et al. (2005) en prenant le ratio de la largeur entre les côtés de l'ilium. Qiu et al. (2012) ont toutefois observé qu'il n'y avait aucune asymétrie pelvienne chez les patients ayant la SIA. Ces auteurs ont conclu que l'asymétrie entre l'ilium gauche et droit observée sur les radiographies postéro-antérieures de sujets scoliotiques pourrait être causée par la rotation pelvienne transversale. Cette étude appuie l'hypothèse que l'asymétrie pelvienne et la rotation pelvienne pourraient être toutes les deux présentes.

En s'inspirant des études antérieures, Stylianides et al. (2012) ont rassemblé les principales hypothèses qui pourraient expliquer le rôle du bassin dans la progression de la scoliose idiopathique de l'adolescence. Dans leur étude tridimensionnelle, ils ont observé que

l'orientation du bassin de sujets scoliotiques était similaire à celle de sujets non scoliotiques. Cependant, ces auteurs ont constaté une asymétrie morphologique tridimensionnelle du bassin qui se produisait dans le plan transverse. Le but du présent travail de maîtrise repose sur les mêmes principes que ceux investigués par Stylianides et al. (2012), mais à partir de données relevées sur des radiographies pour obtenir directement et de façon plus précise les dimensions osseuses.

En général, les principaux biais méthodologiques de ces études portant sur la rotation axiale du bassin sont l'analyse de l'orientation pelvienne dans un seul plan anatomique (Asher et al., 2010; Gum et al., 2007; Lucas et al., 2005; Qiu et al., 2012) et l'utilisation de très peu de repères anatomiques sur le bassin (Asher et al., 2010; Gum et al., 2007; Lucas et al., 2005; Qiu et al., 2012; Stylianides et al., 2012). En ce qui concerne l'orientation pelvienne dans l'espace, il est nécessaire d'identifier davantage de points anatomiques sur toute la surface osseuse du bassin afin de bien dissocier l'orientation de celui-ci de son asymétrie morphologique. Dans le but de dissocier ces deux déformations pelviennes, le présent travail de maîtrise fera appel à une analyse tridimensionnelle du bassin scoliotique avec seize points anatomiques répartis sur différentes régions anatomiques du bassin.

2.5.2 Asymétrie du côté gauche versus le côté droit

La morphologie pelvienne est un facteur indissociable de la déformation géométrique de la colonne vertébrale (Legaye et al., 1998; Mac-Thiong et al., 2003; Nicolopoulos et al., 1985). Néanmoins, l'asymétrie morphologique entre les deux côtes du bassin par rapport à la scoliose a été peu étudiée (Dalleau et al., 2012; Mac-Thiong et al., 2006; Qiu et al., 2012; Stylianides et al., 2012).

Mac-Thiong et al. (2006) ont comparé la géométrie du bassin du groupe de scoliotiques sévère à celui de sujets non scoliotiques. Ils ont repéré 26 points anatomiques sur la radiographie de vue postéro-antérieure et 13 autres points sur la radiographie de vue latérale sur le bassin de chaque sujet. Ensuite, ils ont mesuré 45 paramètres anatomiques sur les deux côtés du bassin dont 26 étaient dans le plan frontal et 19 dans le plan sagittal. Aucune différence significative dans l'indice d'asymétrie n'a été constatée. En ce qui concerne le plan

sagittal, aucune différence significative n'a été observée sur la morphologie pelvienne entre le groupe scoliotique et le groupe non scoliotique. Leur étude bidimensionnelle peut toutefois confondre l'asymétrie avec la distorsion.

La première étude faite sur les aspects tridimensionnels de la géométrie du bassin chez les sujets scoliotiques est celle de Stylianides et al. (2012). Ces chercheurs ont évalué 24 distances horizontales sur le bassin afin d'identifier une asymétrie pelvienne entre le groupe de filles ayant une scoliose sévère à celles ayant une scoliose modérée et un groupe témoin. Ils ont rapporté que les épines iliaques du bassin dans le plan transverse étaient asymétriques entre les trois groupes. Dalleau et al. (2012) ont comparé la morphologie pelvienne entre deux groupes scoliotiques au lieu de les comparer avec des sujets normaux. Ils ont observé une différence significative de la morphologie pelvienne entre le groupe de scoliose modérée et le groupe de scoliose sévère. Malgré le fait que ces travaux ont noté des asymétries pelviennes chez les patients ayant la scoliose idiopathique de l'adolescence, ces asymétries ont été évaluées entre les groupes d'étude et non entre les côtés du bassin. Par contre, Stylianides et al. (2012) ont observé dans leur étude que les filles ayant une scoliose sévère présentaient le côté gauche pelvien plus profond que le droit tandis que le côté droit était le plus large. Cependant, aucune différence significative de la hauteur du bassin n'a été constatée par ces auteurs.

À cet égard, Qiu et al. (2012) ont analysé le ratio (concave/convexe) de neuf longueurs mesurées sur le bassin de 42 jeunes filles ayant la scoliose idiopathique de l'adolescence. Cette méthode d'évaluation de l'asymétrie pelvienne (Figure 13) a été décrite précédemment par Gum et al. (2007). Qiu et al. (2012) ont proposé que le côté concave du bassin est celui qui se trouve du côté concave de la courbure principale du rachis et que le côté convexe du bassin est celui du côté convexe de la déformation scoliotique. Le ratio de la largeur de l'ilium était significativement inférieur à 1 avec le côté concave plus large que le côté convexe. Cependant, aucune asymétrie pelvienne n'a été constatée. Les auteurs en ont ainsi conclu que l'asymétrie pelvienne visualisée sur les radiographies postéro-antérieures serait le résultat d'une rotation du bassin dans l'espace, telle que proposée par Gum et al. (2007).

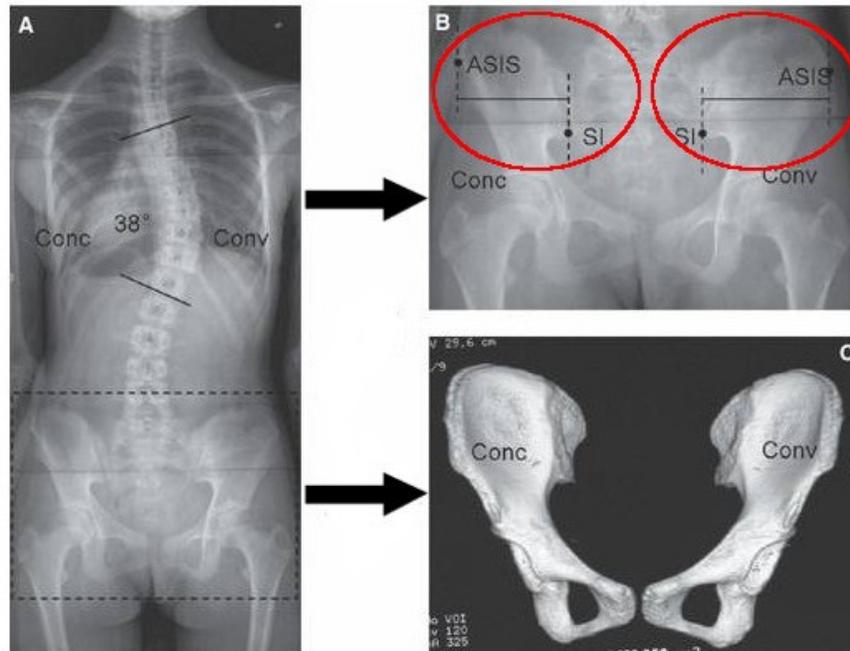


Figure 13. Représentation de la mesure de la largeur de l'ilium selon les côtés concaves et convexes de la courbure scoliothique. Adaptée de Qiu et al. (2012), téléchargée le 29/05/2013.

Dans la plupart des travaux, une asymétrie géométrique des os coxaux du bassin a été observée. Toutefois, il manque encore de l'information afin d'identifier le côté du bassin le plus large ou le plus profond. En outre, aucun autre chercheur n'a suivi l'évolution de cette asymétrie comme l'ont fait Gum et al. (2007).

Afin d'élucider l'enjeu de la morphologie pelvienne, la reconstruction tridimensionnelle du bassin (Dalleau et al., 2012; Stylianides et al., 2012) serait un outil fondamental d'analyse de l'asymétrie osseuse entre les deux côtés du pelvis dans les trois plans anatomiques. De plus, une étude 3D du bassin nous permettrait de dissocier si la disparité entre les côtés du bassin visualisée sur la radiographie postéro-antérieure est due à une asymétrie pelvienne, une torsion pelvienne ou encore les deux.

2.5.3 Croissance du bassin et sa distorsion

Le bassin et la colonne vertébrale évoluent physiquement durant la croissance. Au cours de celle-ci, l'incidence pelvienne augmente et l'épaisseur du bassin diminue (paramètres

morphologiques) ainsi que la pente sacrée qui augmente (paramètre d'orientation) conjointement avec l'apparition de la lordose lombaire (Legaye, 2011). De nombreux auteurs ont étudié la dissymétrie anatomique du squelette humain au cours de la progression de la scoliose durant la phase de croissance (Burwell et al., 2006; Goldberg et al., 1997). Nicolopoulos et al. (1985) ont observé que le bassin et les membres inférieurs de jeunes filles ayant une scoliose ont eu une croissance anormale. Ils ont également remarqué une disproportion de la hauteur corporelle chez les jeunes filles scoliotiques. En conséquence, ces auteurs ont supposé que cette disproportion entre le squelette axial et le squelette appendiculaire serait de nature plutôt étiologique qu'un phénomène de compensation de la scoliose. Cependant, cette étude visant la hauteur du bassin n'est qu'une estimation de celle-ci, puisqu'elle n'a pas été directement mesurée sur le bassin.

Stylianides et al. (2012) ont identifié une corrélation entre l'asymétrie géométrique pelvienne et l'angle de Cobb. En conclusion, ces auteurs font l'hypothèse que cette asymétrie est due à une croissance horizontale anormale du bassin produisant ainsi une distorsion pelvienne. Cette hypothèse a été appuyée plus tard par Dalleau et al. (2012) qui ont observé que les filles ayant une scoliose sévère présentaient le côté droit du bassin plus large que le côté gauche, ce dernier étant plus profond. Le plus grand coefficient de corrélation observé par ces auteurs se situe entre le paramètre de la largeur du bassin droit et l'angle de Cobb ($r=0,54$). Le second est celui situé entre le paramètre de profondeur du bassin gauche et l'angle de Cobb ($r=0,43$). En outre, l'augmentation du coefficient de régression multiple entre les paramètres morphologiques du bassin et rachis a mené Dalleau et al. (2012) à suggérer que l'asymétrie du rachis n'est pas la seule à être associée à la pathogenèse de la scoliose. La croissance anormale du bassin pourrait être aussi liée à cette maladie.

En général, la croissance osseuse anormale du bassin est un facteur à davantage investiguer puisque plusieurs auteurs ont associé celle-ci à la déformation du rachis. L'analyse 2D du bassin réalisée par Nicolopoulos et al. (1985) ne suffit pas à la compréhension du développement du bassin au cours de la croissance de jeunes filles scoliotiques. Ainsi, une reconstruction géométrique tridimensionnelle du bassin scoliotique (Dalleau et al., 2012; Stylianides et al., 2012) durant la croissance des patients pourrait éclaircir cette hypothèse,

mais en utilisant plutôt des radiographies biplanaires que des mesures cutanées de repères osseux.

À cet effet, le présent travail de maîtrise portera sur l'analyse du bassin scoliotique à deux temps différents. Le premier temps correspondra à la première prise de radiographie biplanaire au moment du diagnostic de la scoliose idiopathique de l'adolescence, qui a normalement lieu au début de la croissance de jeunes filles. Le second instant sera la seconde prise radiographique au moment de la prescription d'un corset. Ces deuxièmes radiographies seront en moyenne réalisées un an après le diagnostic de la SIA. Le but de notre recherche sera alors de vérifier si la distorsion pelvienne progresse ou se maintient au cours de la croissance de jeunes filles représentée par cet intervalle de temps sans aucun traitement médical. À cette fin, les systèmes de reconstruction tridimensionnelle du squelette humain, tels que la stéréoradiographie, seront abordés dans la prochaine section.

2.6 Systèmes de reconstruction tridimensionnelle

2.6.1 Stéréoradiographie

La reconstruction 3D du squelette humain par la méthode de stéréoradiographie s'appuie sur deux clichés radiographiques d'incidences différentes. Autrement dit, la représentation 3D du rachis et du bassin est normalement réalisée à partir d'une vue radiographique postéro-antérieure et latérale. Les différents clichés radiographiques sont pris soit en déplaçant le patient entre la première et la seconde acquisition d'images, soit en repositionnant les sources de rayons X entre les deux acquisitions ou encore en prenant deux radiographies simultanément.

La stéréoradiographie consiste à identifier des points anatomiques stéréo-correspondants (PSC) visibles dans les deux vues radiographiques dans le but de reconstruire leur position dans l'espace. Normalement, cette technique de reconstruction 3D se déroule en trois principales étapes. À priori, le système de radiographie pour l'obtention des images est calibré, par la suite, l'identification des repères anatomiques est réalisée au moyen d'une

méthode de numérisation à l'aide d'un logiciel et, en dernier lieu, la mise en correspondance des images 2D est réalisée par la méthode de triangulation afin d'obtenir des coordonnées 3D.

Des méthodes de reconstruction 3D du bassin à partir de la radiographie de face et de profil ont été proposées par Delorme et al. (2003) et Gauvin et al. (1998). Ces approches sont basées sur l'identification et la numérisation de 19 (Gauvin et al., 1998) et de 21 (Delorme et al., 2003) repères anatomiques du bassin. Ces chercheurs ont identifié plusieurs points anatomiques stéréo-correspondants qui seront utilisés dans ce mémoire.

Pour reconstruire les coordonnées 3D de repères dont la position est initialement inconnue, une méthode de calibrage est nécessaire. L'algorithme de base le plus souvent utilisé est le Direct Linear Transformation (DLT), ce qui nécessite au préalable d'au moins six points stéréo-correspondants visibles sur une paire radiographique d'un objet aux dimensions connues. Dans le cas de la morphologie pelvienne, Gauvin et al. (1998) ont utilisé une DLT avec des coefficients de confiance. L'emploi de cette technique a été expliqué par le fait qu'une partie du bassin était partiellement invisible sur les images à cause d'une cache plombée durant la prise radiographique. La géométrie du bassin peut être ainsi représentée par les points anatomiques reconstruits en 3D ou être parachevée par la technique de krigeage (Delorme et al., 2003) dans le but d'obtenir une reconstruction 3D des repères additionnels non numérisés. Il n'en demeure pas moins que les positions calculées sont des estimations qui reposent sur des interpolations non spécifiées.

En s'inspirant des modèles génériques sur des points anatomiques non stéréo-correspondants (NSCP), d'autres méthodes de stéréoradiographie ont été développées à partir de l'identification de contours non stéréo-correspondants (CNSC). Mitton et al. (2006) ont mis en place une telle technique sur trois bassins cadavériques comprenant également les fémurs. Ces auteurs ont repéré des points anatomiques stéréo-correspondants sur sept différentes régions du bassin et ont également identifié 50 points non stéréo-correspondants qui ont été projetés sur la paire radiographique pour obtenir des contours (NSCC) du bassin. L'étude réalisée par Mitton et al. (2006) présente la même limitation que celle de Gauvin et al. (1998), qui réside dans le grand nombre de points anatomiques non identifiables sur les deux

radiographies. Dans l'étude de Mitton et al. (2006), la région centrale des os iliaques n'a pas été observée clairement dans les deux vues radiographiques.

Des méthodes de stéréoradiographie ont également été développées à partir d'images radiographiques non calibrées (Kadoury et al., 2007; Novosad et al., 2002). Kadoury et al. (2007) proposent une méthode de reconstruction du rachis et du bassin à partir de deux clichés radiographiques (PA et LAT) avec l'aide d'un équipement de calibrage comme celui illustré à la Figure 14. Ces chercheurs ont placé un petit objet (Figure 14) sur la colonne lombaire des patients afin de minimiser les erreurs d'échelle sur les images. Cependant, selon les auteurs, cette méthode présente une sensibilité au niveau de l'algorithme d'auto-calibration, en particulier, pour le type et la qualité de points anatomiques employés dans la paire de radiographies.

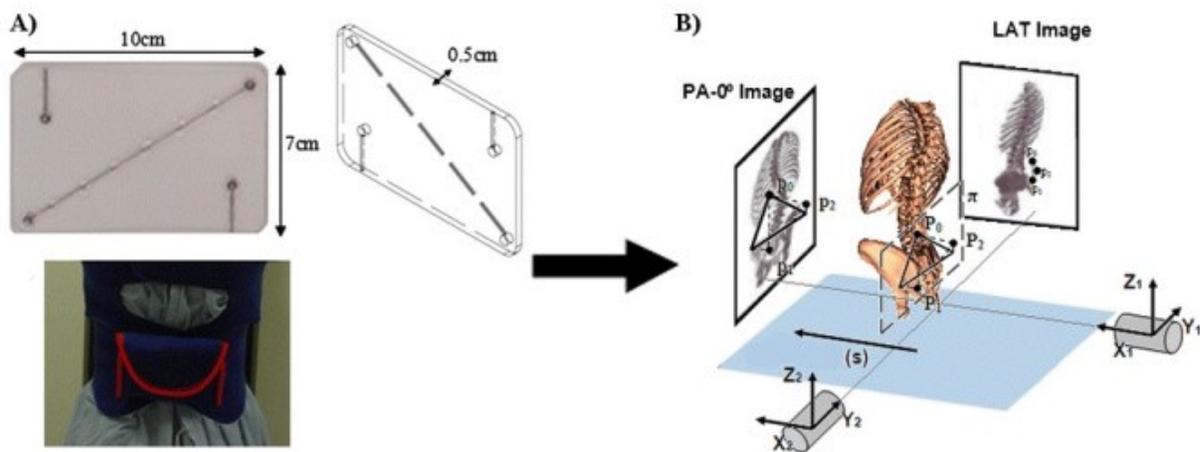


Figure 14. A) illustration de l'objet de calibrage portable développé et utilisé lors de la prise radiographique de la patiente. B) représentation de la méthode de stéréoradiographie. Adaptée de Kadoury et al. (2007), téléchargée le 03/05/2013.

La précision de la méthode stéréoradiographique au niveau du bassin sur des pièces anatomiques est de $3,3 \pm 3,8$ mm chez neuf sujets ayant une scoliose sévère par rapport à la technique de CT-scan (Delorme et al., 2003). Kadoury et al. (2007) ont validé la précision de la stéréoradiographie à partir d'images pré-calibrées chez 60 adolescents dont 51 étaient scoliotiques et 9 non scoliotiques. Aucune différence n'a été observée sur la morphologie et

l'orientation pelvienne entre les images pré-calibrées lors de la prise radiographique et les images auto-calibrées. Le présent travail de recherche repose sur des radiographies pré-calibrées.

2.6.2 Système EOS®

Le système EOS® (Biospace Med, Paris, France) est une technique récente de stéréoradiographie ayant comme principe l'obtention simultanée de deux clichés radiographiques d'incidences différentes en position debout. En outre, cette technique permet une prise radiographique à faible dose de radiation. Selon Dubousset et al. (2005), ce facteur de réduction de rayons X est de 10 par rapport à celui d'une radiographie conventionnelle et peut aller de 800 à 1000 par rapport à la technique de tomodensitométrie. Dans le cas de l'imagerie du bassin, Deschenes et al. (2010) ont observé un ratio de dosage de radiation (EOS/radiographie standard) de 9,2 plus faible pour les épines iliaques antéro-supérieures. D'après ces auteurs, les images prises par EOS® dans le plan frontal sont de meilleure qualité à celle du système conventionnel ($p < 0,006$), telles que présentées à la Figure 15. En ce qui touche le plan sagittal, Deschenes et al. (2010) indiquent que la radiographie standard semble être plus efficace pour identifier les apophyses lombaires.

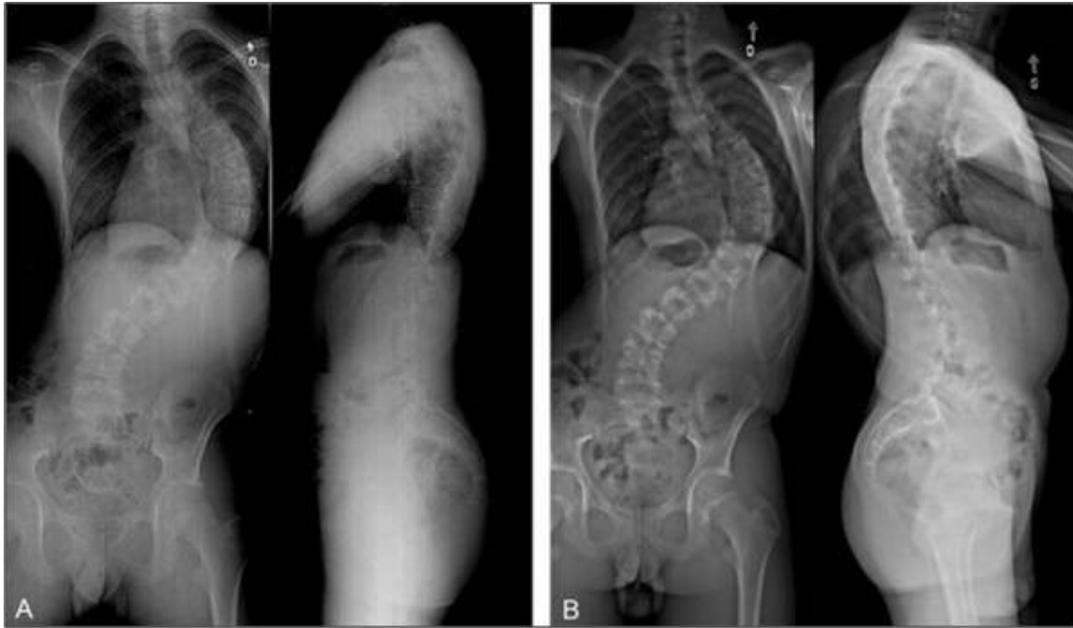


Figure 15. Illustration de paires radiographiques : A) réalisée par le système de l'imagerie conventionnel et B) prise par EOS®. Adaptée de Deschenes et al. (2010), téléchargée le 04/06/2013.

Le système EOS® est fondé sur deux détecteurs gazeux inventés par Georges Chapak disposés de façon orthogonale. Cela permet une prise synchrone des images de face et de profil. De plus, le mécanisme de rayons X consiste en un balayage vertical d'une durée pouvant varier entre 10 et 20 secondes selon la taille de l'individu (Dubousset et al., 2005). Les clichés radiographiques faits par EOS® sont conçus de la même façon que ceux obtenus par scanner, c'est-à-dire que l'image de la structure anatomique est obtenue ligne par ligne (Feydy et al., 2008). La qualité des images du bassin obtenues par EOS® est supérieure à celle du système conventionnel (Delplanque et al., 2012). De plus, Journe, Sadaka, Belicourt et Sautet (2012) ont conclu que l'équipement EOS® génère des images plus précises que celles du CT-scan avec une précision de $1,4^{\circ}$ lorsque l'inclinaison des implants acétabulaires est mesurée. Selon Morvan et al. (2011), ce système peut être considéré comme étant une percée technologique de l'imagerie médicale dans la recherche du complexe bassin-rachis puisqu'il empêche la distorsion verticale de l'image. Cet avantage peut être expliqué par le fait que les sources de rayons X du système EOS® sont toujours perpendiculaires à la région anatomique radiographiée (Dubousset et al., 2008).

Récemment, Wade et al. (2013) ont conclu que la plupart des travaux portant le système EOS® sont limités pour l'évaluation de la scoliose. Quant à ces chercheurs, aucune étude réalisée n'a mis en relation la capacité de reconstruction 3D d'un modèle du rachis-bassin à partir du système EOS® à sa capacité d'améliorer les résultats cliniques.

En général, la méthode de stéréoradiographie consiste en une calibration lors de la prise radiographique de l'individu au moyen d'un dispositif de dimensions connues. L'architecture du système EOS® (Figure 16) réduit au minimum les mouvements du patient, parce que les radiographies PA et LAT sont prises simultanément et de meilleure qualité. À ce jour, aucune étude utilisant les images radiographiques EOS® n'a été réalisée afin d'analyser la géométrie et l'orientation du bassin 3D chez les patients ayant la scoliose idiopathique de l'adolescence.

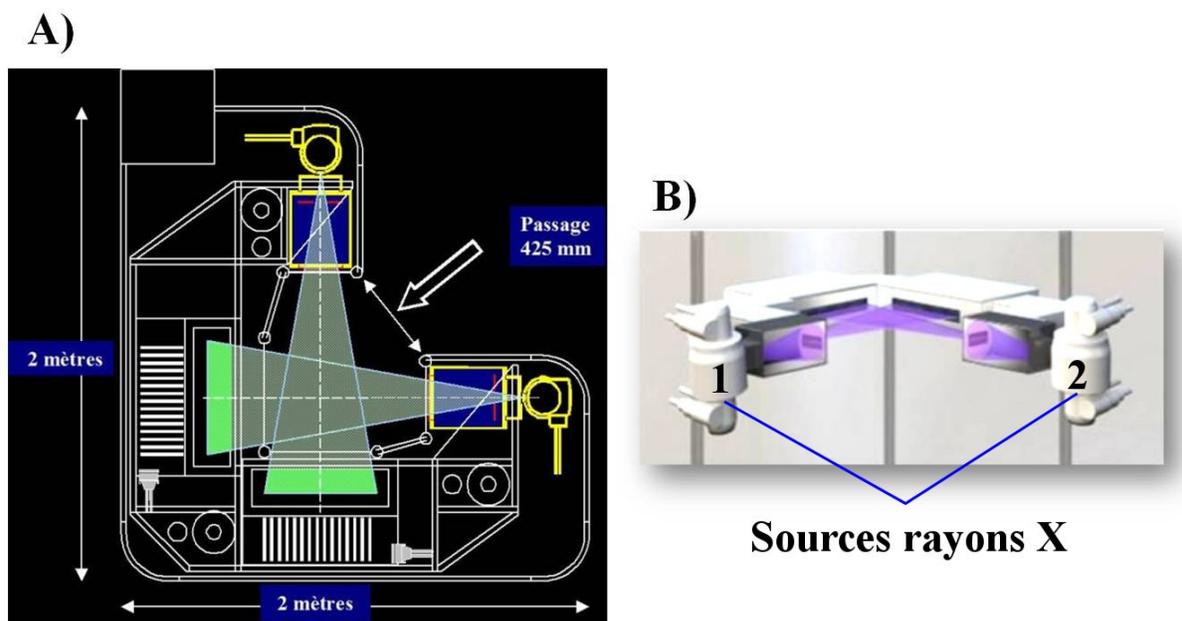


Figure 16. A) schéma de l'architecture du système EOS®, source : www.demauroy.net et B) schéma du bras qui rejoint les deux détecteurs gazeux de rayons X, adapté de Morvan et al. (2011).

2.7 Objectifs spécifiques

Plusieurs études ont montré que la géométrie du bassin (Burwell et al., 1992; Dalleau et al., 2012) ainsi que son attitude posturale (Gum et al., 2007; Stylianides et al., 2012) étaient altérées chez les sujets ayant une scoliose. L'originalité de ce travail de maîtrise est d'investiguer ces deux aspects en relation avec la progression de la déformation du rachis chez le même groupe de jeunes filles scoliotiques. De plus, des chercheurs ont suggéré que le bassin pourrait être lié à la pathogenèse de la scoliose ou encore être l'un des facteurs liés à cette déformation du squelette (Dalleau et al., 2012; Nicolopoulos et al., 1985; Stylianides et al., 2012). Toutefois, la plupart des travaux ont été réalisés en 2D, ce qui nous a conduits à une analyse 3D du bassin. Le présent travail de recherche portera sur de jeunes filles scoliotiques au cours de leur croissance, qui n'ont reçu aucun type de traitement orthopédique. Les filles présentant des scolioses faibles à modérée ont été analysées au moyen de radiographies à deux instants : lors du diagnostic de scoliose et lors de la prescription du port du corset. Celles-ci seront évaluées au moyen d'une approche récente de stéréoradiographie, le système EOS®. Les paramètres 2D seront également étudiés, puisqu'ils se rapprochent de la pratique clinique. La mise en évidence des déformations morphologiques du bassin des filles scoliotiques au cours de leur poussée pubertaire pourrait être un signe précurseur de la scoliose et servir d'indicateur de la progression de la scoliose.

Chapitre 3 : Méthode

Dans un premier temps, les caractéristiques démographiques des sujets sont présentées. Par la suite, le protocole expérimental, l'identification des repères anatomiques du bassin sur les radiographies et le choix des paramètres morphologiques du bassin sont décrits. Ces paramètres se rapportent, non seulement, aux dimensions du bassin, mais servent aussi à décrire son orientation, sa croissance et ses distorsions. Les analyses statistiques qui serviront à déterminer si le bassin scoliotique se déforme ou non lors de la progression de la scoliose complètent le présent chapitre.

3.1 Sélection de sujets

Dix-sept filles âgées de 9 à 15 ans ayant une scoliose idiopathique de l'adolescence ont participé à cette étude. Elles ont été sélectionnées à la clinique de scoliose du Dr Charles-Hilaire Rivard, chirurgien orthopédiste à l'hôpital CHU Sainte-Justine qui a posé le diagnostic selon les critères d'inclusion de Bunnell (1986). Ceux-ci incluent, entre autres, le sexe, l'âge au moment du diagnostic et la sévérité de scoliose déterminée par l'angle de Cobb.

Les critères d'exclusion étaient la présence d'autres types de scoliose comme les scolioses congénitale, neuromusculaire ou posturale, et des problèmes orthopédiques ou neurologiques pouvant perturber la posture et l'équilibre chez les jeunes filles ayant une scoliose idiopathique (Dalleau et al., 2012; Stylianides et al., 2012). Les filles qui avaient reçu un traitement orthopédique, tel qu'un corset, ou qui avaient été opérées pour la correction de leur déformation scoliotique ou pour toute autre raison ont également été exclues (Beaulieu et al., 2009). Finalement, les personnes qui présentaient une inégalité des membres inférieurs ou qui portaient des semelles plantaires n'ont pas participé au projet.

3.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental a été approuvé par le comité d'éthique de la recherche de l'hôpital CHU Sainte-Justine. Toutes les procédures ont été expliquées à chaque patiente et aux parents ou tuteurs. Le formulaire de consentement éclairé a été signé par la participante à l'expérience et par un des parents ou tuteurs. Les données du projet ont été extraites d'une

première radiographie prise au moment du diagnostic de la SIA et d'une seconde qui a été prise à la prescription d'un corset. Les données prises à l'instant 1 (T1) se rapportent aux radiographies obtenues lors de l'évaluation initiale de la scoliose alors que celles prélevées sur la seconde radiographie constituaient l'instant 2 (T2). Les radiographies ont été prises au moyen du système d'imagerie numérique EOS® qui permet des clichés radiographiques simultanés de face et de profil en station debout, comme illustré à la Figure 17.

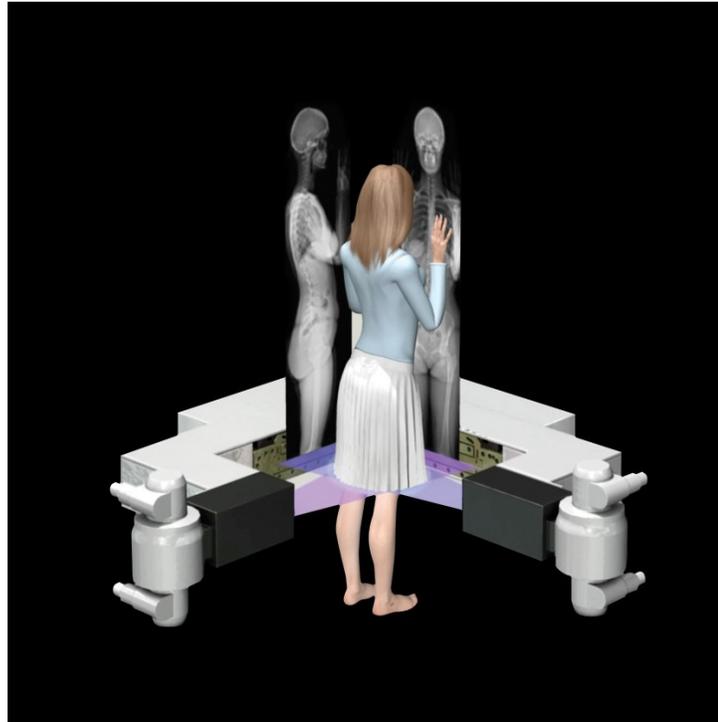


Figure 17. Représentation d'une patiente en position debout et les clichés radiographiques postéro-antérieur et latéral obtenus de façon simultanée par le système d'imagerie médicale EOS®. Source : www.eos-imaging.com, téléchargée le 04/03/2013.

Les jeunes filles ayant une SIA possédaient des types variés de courbures, tels que résumés au Tableau IV. Six filles présentaient des courbes principales thoraciques, dont trois étaient à droite et trois, à gauche. De plus, il y avait quatre thoracolombaires gauches et une droite ainsi que six de types lombaires. Parmi les lombaires, quatre étaient à gauche et les deux autres étaient à droite. Le Tableau V représente les valeurs de l'âge (ans) et l'angle de Cobb (degrés) des jeunes filles à deux instants.

Tableau IV. Caractéristiques du type de courbures des scolioses étudiées et la vertèbre correspondant à l'apex de la courbe (T : thoracique, TL : thoracolombar, L : lombar) lors de la radiographie initiale (T1) et de la dernière radiographie (T2) avant le traitement orthopédique par corset ainsi que le côté de la scoliose (D : droite, G : gauche).

<i>Sujets</i>	<i>Courbure principale</i>	<i>Apex (T1)</i>	<i>Apex (T2)</i>	<i>Côté de la courbure principale</i>
1	Thoracique	T5	T5	G
2	Thoracique	T7	T7	D
3	Thoracique	T8	T5	G
4	Thoracique	T9	T9	D
5	Thoracique	T10	T10	D
6	Thoracique	T12	L1	G
7	Thoracolombar	T11	T12	G
8	Thoracolombar	T12	T12	G
9	Thoracolombar	L1	L1	G
10	Thoracolombar	L1	L1	D
11	Thoracolombar	L2	L2	G
12	Lombar	L1	L2	D
13	Lombar	L1	L1	G
14	Lombar	L1	L1	G
15	Lombar	L2	L2	G
16	Lombar	L2	L2	G
17	Lombar	L2	L2	D

Tableau V. L'âge et l'angle de Cobb des dix-sept filles lors du diagnostic de la SIA (T1) et avant le traitement orthopédique par corset (T2); les numéros des sujets ne correspondent pas à ceux du Tableau IV.

<i>Observations</i>	<i>T1</i>		<i>T2</i>	
	Âge (ans)	Cobb (°)	Âge (ans)	Cobb (°)
Sujets				
1	10,9	7	11,3	10
2	11,2	7	11,9	18
3	10,6	8	12,6	22
4	14,1	8	14,6	18
5	9,4	10	10,4	16
6	11,6	10	12,6	17
7	13,2	10	13,7	23
8	12,8	12	13,8	15
9	11,4	14	13,6	16
10	11,0	15	12,5	23
11	12,5	15	13,0	21
12	13,1	15	15,1	19
13	12,6	18	13,3	19
14	12,2	19	13,0	22
15	15,5	25	15,9	26
16	14,9	26	15,4	33
17	13,6	30	15,1	29

L'angle de Cobb moyen au T1 était de $14,6 \pm 7,0^\circ$ et variait entre 7° et 30° . La moyenne d'âge du premier instant était de $12,4 \pm 1,6$ ans. Pour le T2, la moyenne d'âge était de $13,4 \pm 1,5$ ans et l'angle de Cobb moyen était de $20,4 \pm 5,5^\circ$ se situant entre 10° et 33° (Tableau V).

Les filles à T1 sont représentatives d'une scoliose peu sévère alors que celles à T2 correspondent approximativement à une scoliose dite modérée selon des études antérieures

(Bunnell, 1986; Dalleau et al., 2012; Lonstein & Carlson, 1984; Parent, Newton, & Wenger, 2005; Wong & Tan, 2010).

3.2.1 Repères anatomiques sur le bassin

Seize repères anatomiques du bassin et de la première vertèbre sacrée (S1) ont été identifiés sur les radiographies, comme indiqué à la Figure 18. Pour 12 d'entre eux, il était possible de les repérer sur les deux radiographies et de calculer leurs coordonnées tridimensionnelles. Les quatre premiers correspondent aux extrémités du plateau vertébral de S1 (1 à 4). Les deux suivants sont situés au niveau des épines iliaques postéro-supérieures (EIPS) gauche (5) et droite (6), telles que décrites par Reynolds et al. (1982). Deux autres repères (7 et 8) sont localisés au sommet de l'arcade des acétabulums (Reynolds et al., 1982) et deux autres (9 et 10) au centre des têtes fémorales (Kersnič et al., 1997). Les symphyses pubiennes sont indiquées par les repères 11 et 12 (Reynolds et al., 1982).

Quatre repères anatomiques n'ont été relevés que sur la radiographie postéro-antérieure. Ces repères ont été inclus dans l'analyse, car ils sont couramment utilisés dans le calcul d'indices cliniques (Mitton et al., 2006; Patriquin et al., 2002, 2005). Il s'agit des parties osseuses les plus élevées de la crête iliaque, à savoir les extrémités supérieures 13 et 14 (Reynolds et al., 1982). Les deux derniers repères indiquent les tubérosités ischiatiques 15 et 16 (Reynolds et al., 1982).

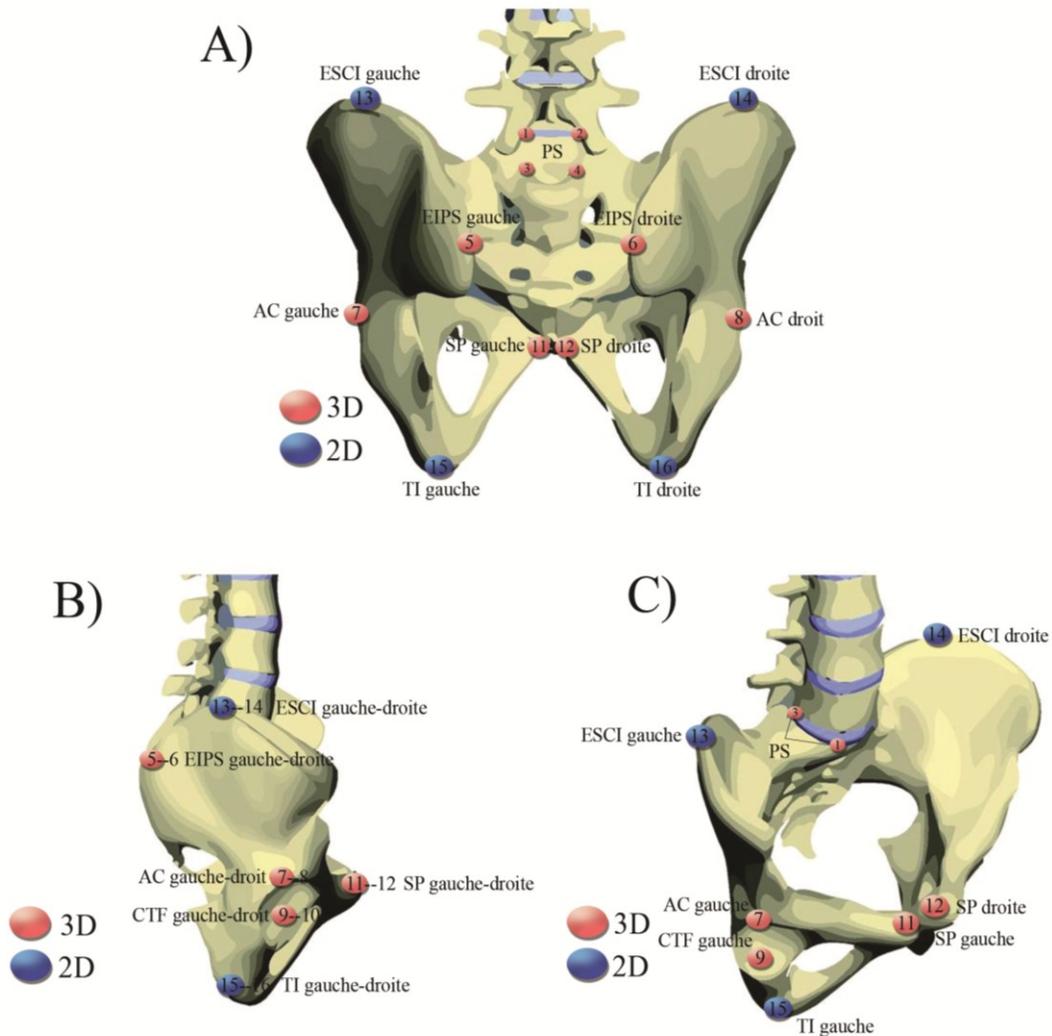


Figure 18. Position des 16 repères anatomiques sur le bassin selon A) le plan frontal (vue postérieure), B) le plan sagittal (vue latérale droite) et C) le plan transverse (vue oblique). Les points rouges (1 à 12) indiquent les repères anatomiques relevés dans les deux vues radiographiques et les points bleus (13 à 16) indiquent les repères anatomiques relevés uniquement sur la radiographie postéro-antérieure.

3.2.2 Identification des repères sur les radiographies

L'identification des 12 repères anatomiques de la ceinture pelvienne et de S1 a été réalisée manuellement sur chaque paire de radiographies numériques postéro-antérieure et latérale au moyen d'un logiciel développé sous Matlab© (The Mathworks, USA). Comme

mentionnés, les quatre derniers points anatomiques ont été identifiés seulement sur les images postéro-antérieures à cause de leur manque de visibilité sur les radiographies latérales.

S'il était aisé d'identifier un repère osseux sur au moins une des deux radiographies, la principale difficulté était de l'identifier sur la seconde. Pour pallier ce problème, une ligne horizontale était tracée à partir de chaque repère localisé sur l'une des deux images, par le logiciel sur les deux radiographies, comme illustré à la Figure 19 pour le repère 8. Ainsi, le sommet de l'arcade de l'acétabulum droit (8) est facilement identifiable sur le plan sagittal (radiographie de gauche); il est ensuite repéré dans le plan frontal (radiographie de droite) en se servant de cette ligne. Cette procédure a été utilisée pour la numérisation des 12 repères anatomiques du bassin. À l'issue de l'identification des repères, leurs coordonnées en pixels $[u_1, v_1]$ pour la radiographie postéro-antérieure et $[u_2, v_2]$ pour la radiographie latérale dans les repères associés aux images sont enregistrées pour la reconstruction en 3D.

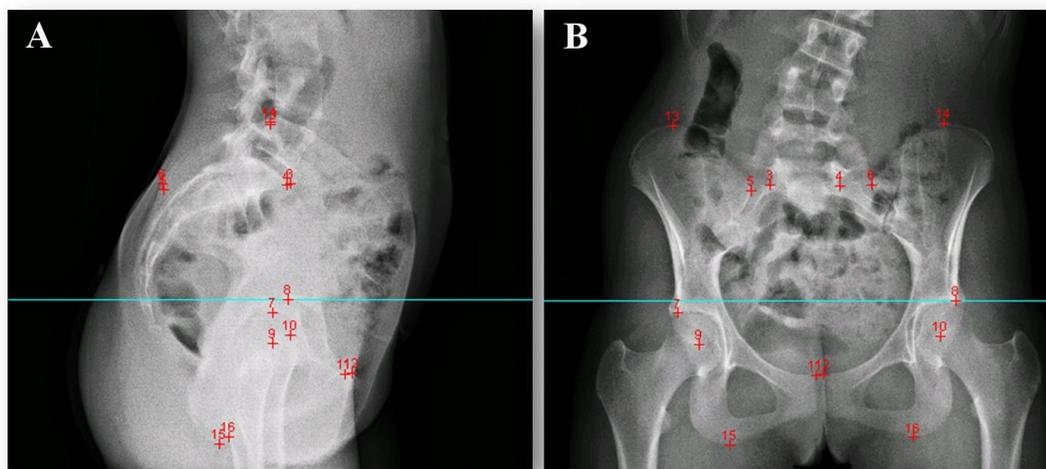


Figure 19. Sommet de l'arcade de l'acétabulum droit (8) est identifié sur la radiographie latérale (A). Une ligne horizontale permet de localiser ce repère anatomique sur la radiographie frontale (B).

3.2.3 Technique de reconstruction tridimensionnelle

La reconstruction tridimensionnelle des repères du bassin a été réalisée à partir des coordonnées images $[u, v]$ de chacun des 12 points anatomiques identifiés sur les deux clichés radiographiques, comme indiqué à la Figure 19, et d'un modèle de calibrage. La

reconstruction des repères du bassin consiste en une DLT (« Direct Linear Transformation ») modifiée pour tenir compte des caractéristiques géométriques et fonctionnelles du système d'imagerie EOS®. Cette méthode s'appuie sur la géométrie multivue et met en relation les coordonnées images de repères pour obtenir leurs coordonnées tridimensionnelles. Afin de déterminer les paramètres du modèle de DLT, un objet de calibrage à la géométrie tridimensionnelle connue est nécessaire (Marzan & Karara, 1975). Les dimensions de l'objet doivent également être similaires au volume de l'ensemble à reconstruire.

Dans le modèle, il faut tenir compte de l'environnement du système EOS®. Cela inclut notamment des distances fixes entre les plans-images orthogonaux et la source, qui effectue un balayage vertical. Cette dernière caractéristique n'entraîne pas de perspective selon l'axe vertical, comme illustré à la Figure 20. Contrairement à une caméra où les objets au premier plan apparaissent plus gros sur l'image que ceux en arrière-plan (Figure 20B), le balayage vertical permet de conserver les rapports des hauteurs entre les objets quelle que soit leur position dans la profondeur du champ (Figure 20A).

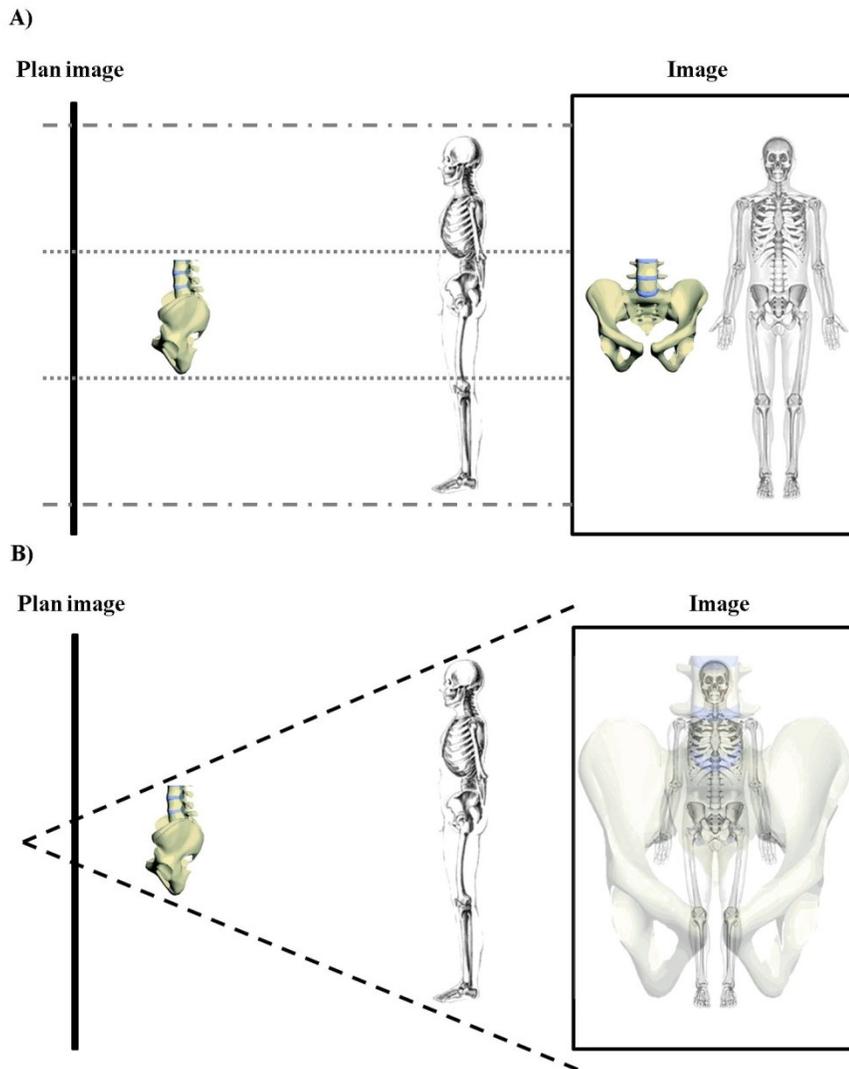


Figure 20. A) représentation du système EOS®, B) représentation du système caméra.

Les paramètres du modèle de reconstruction ont été obtenus à partir d'un objet de calibrage (Figure 21) dont la géométrie était connue. Un algorithme non linéaire de moindres carrés a également été utilisé afin de minimiser la distance euclidienne entre les coordonnées tridimensionnelles réelles et reconstruites. Une fois les valeurs expérimentales des paramètres optimisées, les valeurs mesurées ont été recherchées dans les tags des fichiers DICOM qui contiennent de façon non explicite toutes les valeurs nécessaires à la reconstruction notamment utilisées dans le logiciel commercial SterEOS® (biospace med, Paris).

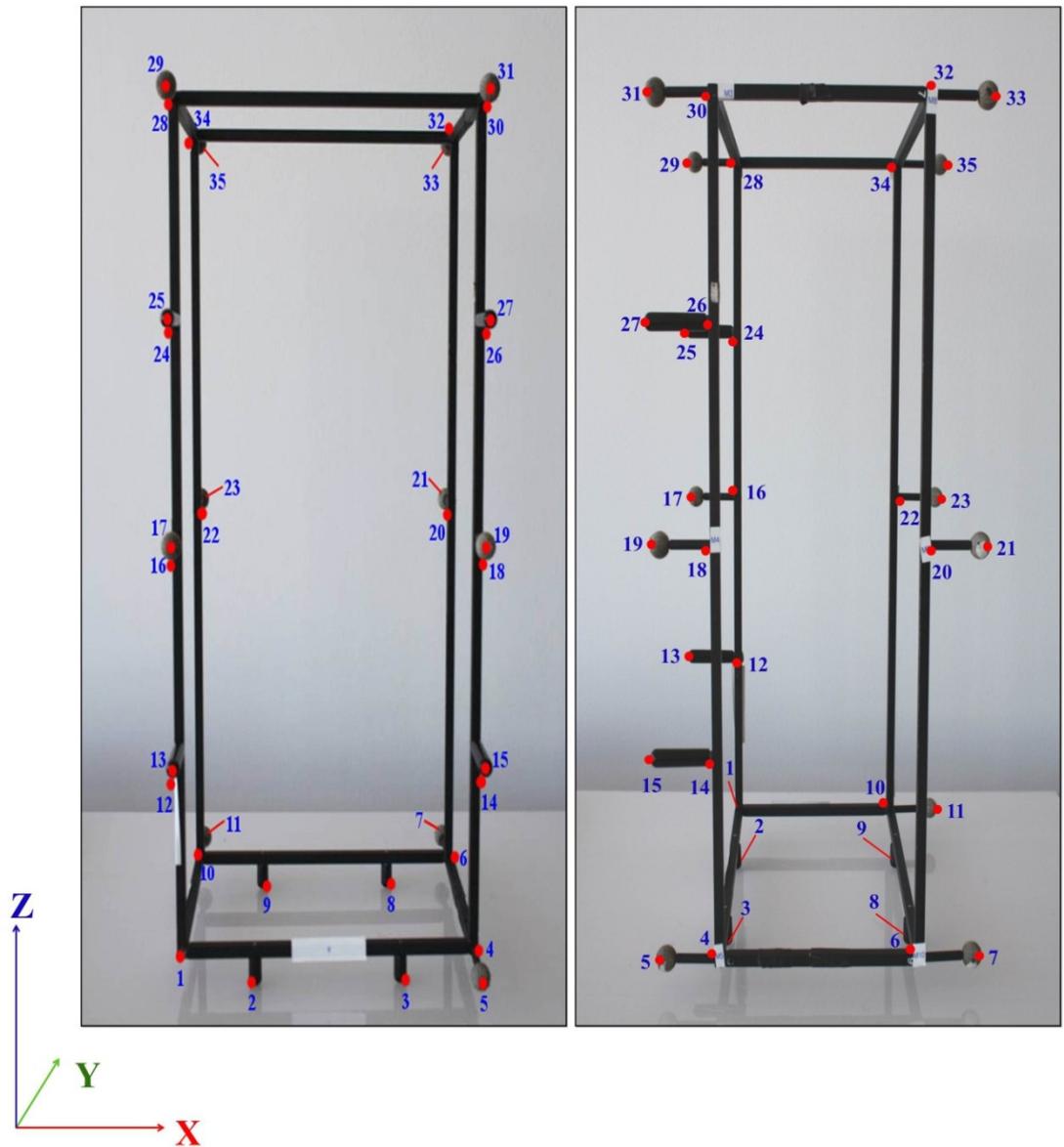


Figure 21. Image de l'objet de calibrage avec ses 35 repères.

Les étapes successives de l'algorithme de reconstruction sont décrites ci-après. Outre les paramètres de la calibration, les données initiales sont les coordonnées des repères osseux en pixels dans la paire d'images postéro-antérieure et latérale. La première étape consiste à exprimer en mètres les coordonnées images $[u_1, v_1]$ et $[u_2, v_2]$ données en pixels, comme indiqué à la Figure 22 dans un repère du système EOS®, soit les vecteurs $[-d_1, x_{u1}, z_{u1}]$ et $[-d_2, y_{u2}, z_{u2}]$. Les distances d_1 et d_2 correspondent à la position des plans-images par rapport au

repère global et sont des constantes. Cette étape nécessite à la fois une translation de l'origine et l'application d'un facteur d'échelle pour les coordonnées horizontales et verticales, les pixels n'étant pas carrés. La seconde étape est de calculer la coordonnée verticale du repère dans l'espace comme étant la moyenne des coordonnées verticales en mètres dans les deux vues $Z = (Z_{V1} + Z_{V2}) / 2$. Enfin les coordonnées horizontales sont obtenues comme étant l'intersection des deux lignes de fuite, c'est-à-dire la droite qui joint la source 1 avec la coordonnée métrique d'un repère dans le plan-image 1 et celle qui joint la source 2 avec la coordonnée métrique du même repère dans le plan-image 2. Les positions des sources sont également des constantes du modèle. Une fois les coordonnées tridimensionnelles calculées, il est possible d'observer la géométrie du bassin selon plusieurs dimensions, comme à la Figure 23, et d'effectuer les calculs de la morphologie pelvienne.

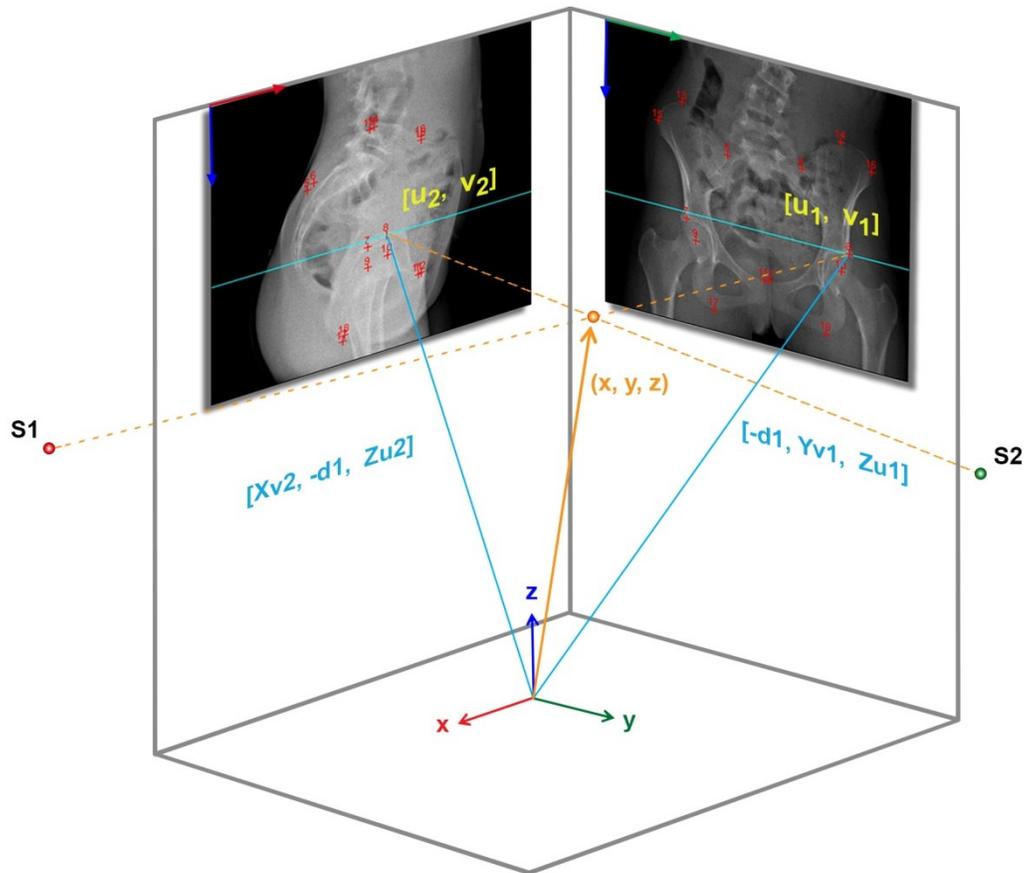


Figure 22. Représentation d'un point anatomique (3D) dans le repère de référence global (x,y,z) et sa projection dans les deux clichés radiographiques (u,v) . Les deux sources des rayons X sont représentées par S_1 et S_2 .

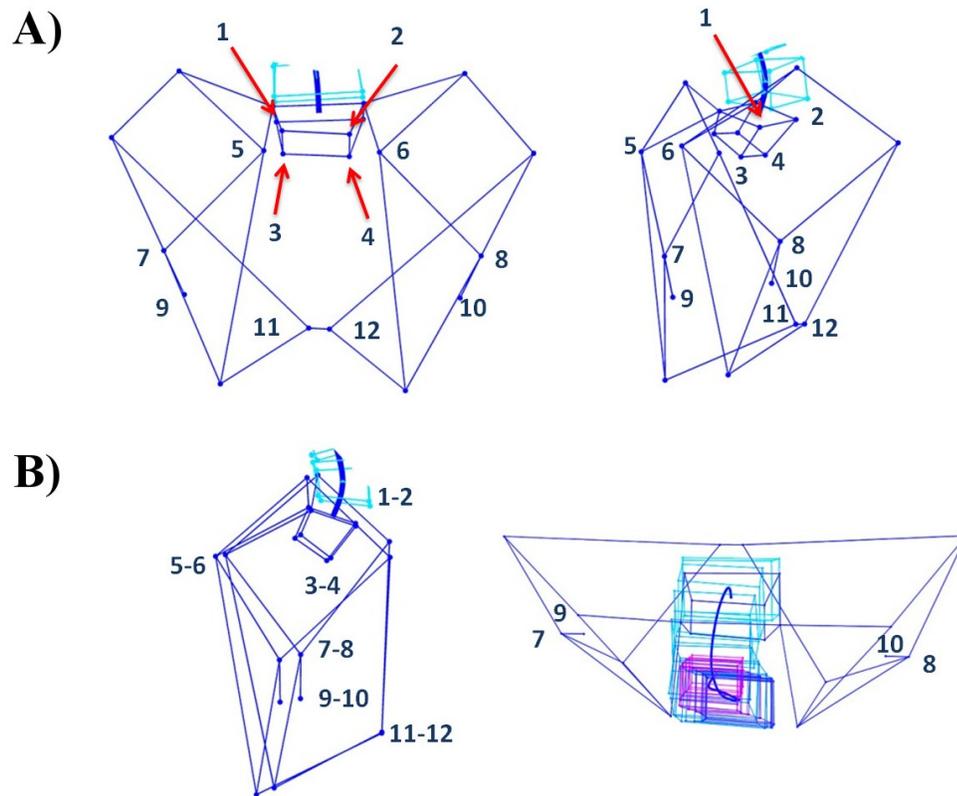


Figure 23. Schémas de la reconstruction 3D du bassin. A) bassin dans le plan frontal et oblique et B) bassin dans le plan sagittal et horizontal.

3.3 Paramètres mesurés sur le bassin

Au total, 18 paramètres ont été calculés afin de quantifier la symétrie, la distorsion et l'orientation spatiale du bassin entre les deux temps d'observations expérimentales (T1 et T2). Parmi ces 18 paramètres qui caractérisent la morphologie et l'orientation pelvienne, 9 ont été calculés en 3D et 9, en 2D.

3.3.1 Paramètres 3D

La morphologie pelvienne a été évaluée au moyen de six distances et trois angles, calculés sur le bassin des côtés gauche et droit. La longueur PS-acétabulum (Figure 18) est similaire au paramètre de l'épaisseur pelvien proposé par Duval-Beaupere et al. (1992). Cette longueur est toutefois tridimensionnelle, alors que dans l'étude citée, elle était seulement

mesurée dans le plan sagittal du promontoire sacré à l'axe bicoxo-fémoral. Cette distance en 3D est calculée entre le point anatomique sur le promontoire sacré (PS) et les points placés sur l'arcade des acétabulums gauche et droit (7 et 8). Le promontoire sacré (PS) correspond au point milieu entre les quatre repères anatomiques placés sur la première vertèbre sacrée (S1). Ensuite, la méthode utilisée pour calculer la longueur PS-symphyse (Figure 18) est basée sur celle de la longueur des épines iliaques supérieures du bassin proposée par Boulay, Tardieu, Benaim et al. (2006). En effet, la distance entre les épines iliaques antéro-supérieures et postéro-supérieures (EIAS-EIPS) a été remplacée par la distance entre le promontoire sacré et les symphyses pubiennes (11 et 12) en 3D.

De plus, nous avons mesuré trois longueurs ayant le même point anatomique de départ représenté par les EIPS (5 et 6). Cette méthode repose sur la technique de Stylianides et al. (2012). Toutefois, les repères anatomiques choisis diffèrent de cette dernière. La longueur EIPS-PS (Figure 18) est exprimée par la droite qui relie les EIPS gauche et droit au repère anatomique PS. En ce qui concerne les longueurs EIPS-acétabulum (Figure 18) et EIPS-symphyse (Figure 18), ce sont les derniers repères qui les différencient comme leur nom l'indique. En somme, le dernier paramètre 3D représenté par une longueur est celui de l'acétabulum-symphyse formé par une droite qui rejoint l'arcade des acétabulums (7 et 8) aux symphyses pubiennes (11 et 12).

Les dernières dimensions du bassin sont trois angles du triangle formé par les EIPS (5 et 6), les acétabulums (7 et 8) et les symphyses pubiennes (11 et 12), comme indiqué à la Figure 18. La comparaison entre les angles du côté gauche et ceux du côté droit servira à déterminer la présence d'une dissymétrie du bassin.

3.3.2 Paramètres 2D

Les neuf paramètres 2D se rapportent à l'orientation du bassin et ils ont été calculés au moyen de huit angles et une longueur. Ces paramètres ont été classés en trois catégories : la rotation du bassin (plan sagittal et horizontal), l'inclinaison latérale pelvienne dans le plan frontal et l'inclinaison antéro-postérieure pelvienne dans le plan sagittal.

La rotation du bassin a été décrite à l'aide de trois paramètres : longueur PS-acétabulum horizontale gauche et droite, orientation des acétabulums et orientation des EIPS. Toutefois, le

seul paramètre d'orientation du bassin caractérisé par une longueur est celui entre le promontoire sacral (PS) et les deux acétabulums (7 et 8). Cette longueur nous permet d'observer une éventuelle rotation du bassin pendant la progression de la scoliose (Figure 18). Ce paramètre est préféré à celui créé par Duval-Beaupere et al. (1992), nommé porte-à-faux (PAF), puisque nous avons utilisé l'arcade des acétabulums à la place de l'axe bicoxo-fémoral, qui est plus facile à repérer et qui réduit l'imprécision dans le calcul. Par la suite, l'orientation des acétabulums (Figure 18) a été représentée par l'angle formé entre une droite reliant les deux acétabulums (7 et 8) et l'axe médio-latéral dans le plan horizontal. Cette méthode est préférée à celle proposée par Delorme et al. (2003), car notre calcul a été réalisé dans le plan horizontal. Pour l'orientation des EIPS (Figure 18), notre méthode est basée sur le paramètre d'orientation du bassin proposé par Stylianides et al. (2012) et caractérisé par un angle défini entre une droite liant les deux EIPS (5 et 6) du bassin et l'axe médio-latéral dans le plan horizontal.

L'inclinaison latérale du bassin est caractérisée par l'obliquité des crêtes iliaques, des acétabulums et des tubérosités ischiatiques (Figure 18). Celles-ci se reposent sur la technique décrite par Delorme et al. (2003). La première obliquité représente un angle calculé par une droite liant les deux extrémités les plus supérieures des crêtes iliaques (13 et 14) et l'axe médio-latéral dans le plan frontal. Pour les deux autres paramètres, ce sont les repères qui diffèrent dans le calcul comme leurs noms l'indiquent.

L'inclinaison antéro-postérieure du bassin repose sur les paramètres pelviens dans le plan sagittal (Figure 18), décrits par Duval-Beaupere et al. (1992). Ces paramètres nous permettent d'observer la relation entre la déformation du bassin et la colonne vertébrale comme étant des structures indissociables (Legaye et al., 1998; Roussouly & Nnadi, 2010; Vrtovec et al., 2012). La pente sacrée a été calculée au moyen d'un angle formé entre un plan tangent au promontoire sacré et l'horizontale. Par la suite, la version pelvienne a été calculée au moyen d'un angle formé entre la verticale et une droite reliant le promontoire sacral au centre de l'axe bicoxo-fémoral. En dernier, l'incidence pelvienne a été représentée par l'angle formé entre la ligne perpendiculaire au centre du promontoire sacré et la droite joignant ce même point au point milieu de l'axe bicoxo-fémoral.

3.4 Analyses statistiques

La morphologie du bassin représentée par les paramètres 3D classés selon les côtés gauche et droit a été analysée au moyen d'un test t ($p < 0,05$) pour un échantillon apparié à deux temps donnés (T1 et T2). La morphologie pelvienne a été également évaluée par une analyse multivariée (MANOVA) à mesures répétées selon deux conditions. Des facteurs intra-sujets, tels que la condition temps et le côté du bassin, ont été choisis afin de déterminer l'asymétrie et la croissance osseuse du bassin. Seuls les neuf paramètres 3D ont été utilisés dans cette analyse. Une différence significative entre les paramètres 3D des côtés gauche et droit du bassin ($p < 0,05$) indique une asymétrie du bassin, tandis qu'une différence significative ($p < 0,05$) des paramètres 3D entre T1 et T2 indique une croissance osseuse du bassin. De plus, une interaction significative entre les deux facteurs intra-sujets (côtés du bassin et temps) serait indicative d'une distorsion du bassin.

En ce qui concerne les paramètres 2D, le test t pour un échantillon apparié a été aussi utilisé ($p < 0,05$). Par contre, l'objectif était d'évaluer la progression de neuf paramètres 2D au cours de la croissance de jeunes filles scoliotiques entre les deux temps d'observations T1 et T2. La croissance des filles a été représentée par l'intervalle de temps entre la première prise radiographique lors du diagnostic de la scoliose (T1) et la seconde radiographie avant le port du corset (T2).

Finalement, la distorsion du bassin chez les jeunes filles scoliotiques a été évaluée par une analyse multivariée. Cette distorsion a été représentée par la norme de la différence des côtés du bassin des paramètres 3D en fonction de la croissance de jeunes filles. La norme a été à la fois représentée au moyen d'un calcul sur lequel « G » correspondait au côté gauche du bassin tandis que « D », au droit : $(G - D)/(G + D) / 2$.

Chapitre 4 : Résultats

Ce chapitre se divise en trois volets. Le premier volet portera sur les paramètres tridimensionnels afin de documenter l'asymétrie pelvienne chez les jeunes filles ayant la scoliose idiopathique de l'adolescence durant leur croissance. Par la suite, le second volet étayera les paramètres bidimensionnels qui sont pertinents pour la pratique clinique. En dernier lieu, la rotation et la distorsion du bassin seront adressées au cours de la croissance des jeunes filles scoliotiques.

4.1 Paramètres pelviens tridimensionnels

L'ensemble des paramètres 3D du bassin mesurés sur les côtés gauche et droit du bassin pour les deux instants différents est présenté aux Tableaux VI et VII.

Tableau VI. Moyenne et écart type des paramètres 3D mesurés sur les côtés gauche (G) et droit (D) du bassin au moment du diagnostic de la scoliose (T1). L'astérisque indique un test t significatif ($p < 0,05$).

Paramètres 3D	Côté G	Côté D	p
<i>PS-acétabulum (mm)</i>	100,27 ± 12,89	99,94 ± 13,34	0,742
<i>PS-symphyse (mm)</i>	122,41 ± 11,05	121,66 ± 11,09	0,114
<i>EIPS-PS (mm)</i>	57,13 ± 10,34	62,65 ± 13,28	0,000*
<i>EIPS-acétabulum (mm)</i>	93,85 ± 11,00	95,88 ± 12,31	0,036*
<i>EIPS-symphyse (mm)</i>	143,58 ± 15,23	147,43 ± 16,57	0,001*
<i>Acétabulum-symphyse (mm)</i>	84,14 ± 13,21	86,57 ± 14,31	0,284
<i>Angle EIPS (°)</i>	33,75 ± 4,61	33,76 ± 4,93	0,993
<i>Angle acétabulum (°)</i>	108,04 ± 6,33	108,37 ± 6,73	0,814
<i>Angle symphyse (°)</i>	38,21 ± 2,63	37,87 ± 3,08	0,602

Au Tableau VI, parmi les neuf paramètres 3D mesurés sur le bassin au moment du diagnostic de la scoliose, trois longueurs présentent des différences significatives entre les côtés gauche et droit. La longueur EIPS-PS présente la plus grande asymétrie (5,52 mm). Ensuite vient la longueur EIPS-symphyse avec une différence de 3,85 mm et la longueur EIPS-acétabulum (2,03 mm). Ces trois longueurs sont toutes plus grandes du côté droit que du

côté gauche. La longueur EIPS-symphyse a un plus grand écart type (16,57 mm) pour le côté droit que pour le côté gauche (15,23 mm).

Tableau VII. Moyenne et écart type des paramètres 3D mesurés sur les côtés gauche (G) et droit (D) du bassin avant le traitement orthopédique par corset (T2). L'astérisque indique un test t significatif ($p < 0,05$).

Paramètres 3D	Côté G	Côté D	P
<i>PS-acétabulum (mm)</i>	112,72 ± 12,40	114,49 ± 11,00	0,399
<i>PS-symphyse (mm)</i>	128,60 ± 10,12	128,69 ± 9,94	0,849
<i>EIPS-PS (mm)</i>	68,33 ± 10,10	74,83 ± 12,39	0,000*
<i>EIPS-acétabulum (mm)</i>	104,76 ± 10,11	108,90 ± 13,73	0,011*
<i>EIPS-symphyse (mm)</i>	158,63 ± 14,76	163,16 ± 19,22	0,010*
<i>Acétabulum-symphyse (mm)</i>	100,24 ± 14,16	100,07 ± 12,56	0,907
<i>Angle EIPS (°)</i>	37,99 ± 4,24	36,72 ± 3,00	0,235
<i>Angle acétabulum (°)</i>	101,89 ± 6,01	102,72 ± 4,31	0,583
<i>Angle symphyse (°)</i>	40,12 ± 2,84	40,56 ± 2,78	0,607

Lors de la dernière visite (Tableau VII) avant le port du corset, les mêmes trois longueurs partant du point anatomique EIPS présentent des différences significatives entre les côtés gauche et droit. La longueur EIPS-PS présente encore la plus grande asymétrie avec 6,50 mm. La deuxième plus grande asymétrie pelvienne est celle de la longueur EIPS-acétabulum avec 4,13 mm. Par la suite, la longueur EIPS-symphyse représente la troisième plus grande asymétrie (4,52 mm). Le plus grand écart-type est encore observé par la longueur EIPS-symphyse pour le côté droit (de 19,22 mm). Le côté droit est toujours plus grand que celui de gauche.

L'ensemble des neuf paramètres 3D est également représenté au Tableau VIII aux conditions « *Temps* » et « *Côté* » ainsi que leur interaction. L'effet « *Temps* » se rapporte à la différence des moyennes entre les sujets scoliotiques lors du diagnostic de la SIA (T1) et avant le port du corset (T2). En ce qui concerne l'effet « *Côté* », c'est la différence des moyennes entre le côté gauche et le côté droit du bassin qui est pris en considération. Finalement, l'interaction de ces deux effets nous amène à questionner si la différence entre les côtés du bassin se déroule en fonction de la croissance de jeunes filles dans l'intervalle de temps entre

T1 et T2. Il est à noter que, durant la croissance de jeunes filles, la moyenne d'angle de Cobb a progressé de 5,8°.

Quant aux résultats du Tableau VIII, la différence des moyennes entre les deux instants donnés (effet *Temps*) est significative pour l'ensemble des neuf paramètres pelviens 3D, puisqu'un p de 0,033 ($p < 0,05$) a été observé. Une différence significative a également été observée entre les côtés du bassin (effet *Côté*) avec un p de 0,013 ($p < 0,05$). Cela représente une asymétrie morphologique entre les deux os coxaux pelviens. À propos de l'interaction de l'asymétrie pelvienne en fonction de la croissance osseuse du bassin (interaction *Temps***Côté*), le résultat n'est pas significatif ($p = 0,789$). Les longueurs correspondantes aux EIPS-PS, EIPS-acétabulum et EIPS-symphyse sont représentatives d'une asymétrie anatomique entre les côtés du bassin, qui persiste durant toute la croissance de jeunes filles.

Tableau VIII. Paramètres 3D pour les conditions « Temps » et « Côté » ainsi que leur interaction. L'astérisque indique un p value significatif ($p < 0,05$).

Paramètres 3D	Temps	Côtés	Temps * Côtés
<i>PS-acétabulum (mm)</i>	0,000*	0,610	0,213
<i>PS-symphyse (mm)</i>	0,000*	0,365	0,188
<i>EIPS-PS (mm)</i>	0,001*	0,000*	0,521
<i>EIPS-acétabulum (mm)</i>	0,000*	0,004*	0,197
<i>EIPS-symphyse (mm)</i>	0,000*	0,000*	0,741
<i>Acétabulum-symphyse (mm)</i>	0,000*	0,403	0,342
<i>Angle EIPS (°)</i>	0,003*	0,423	0,411
<i>Angle acétabulum (°)</i>	0,002*	0,621	0,771
<i>Angle symphyse (°)</i>	0,011*	0,936	0,349

4.2 Paramètres 2D

Les paramètres 2D sont présentés au Tableau IX dans le but de documenter les déformations pelviennes, telles que la rotation du bassin et son inclinaison latérale dans l'espace durant la croissance de jeunes filles. Ces paramètres sont généralement utilisés dans la pratique clinique, car ils peuvent être calculés directement sur les radiographies.

Tableau IX. Moyenne et écart type des paramètres 2D mesurés sur le bassin de 17 jeunes filles scoliotiques au moment du diagnostic de la scoliose (T1) et avant le traitement orthopédique par corset (T2). L'astérisque indique un test t significatif ($p < 0,05$). Le paramètre PS-acétabulum correspond à une longueur horizontale (horiz.) mesurée sur les côtés gauche (G) et droit (D) du bassin; † indique que l'obliquité des tubérosités ischiatiques a été mesurée sur le bassin de 16 jeunes filles.

Paramètres 2D	T1	T2	P
<i>PS-acétabulums horiz. G (mm)</i>	12,16 ± 10,80	16,50 ± 12,06	0,068
<i>PS-acétabulums horiz. D (mm)</i>	12,39 ± 11,01	16,92 ± 12,92	0,169
<i>Orientation des acétabulums (°)</i>	3,61 ± 3,48	3,30 ± 2,51	0,775
<i>Orientation des EIPS (°)</i>	6,10 ± 3,58	4,35 ± 2,28	0,125
<i>Obliquité des crêtes iliaques (°)</i>	2,92 ± 3,03	1,46 ± 1,80	0,063
<i>Obliquité des acétabulums (°)</i>	2,45 ± 2,53	1,21 ± 0,95	0,069
<i>Obliquité des tubérosités ischiatiques (°)</i>	3,13 ± 2,85†	1,58 ± 1,51†	0,056
<i>Pente sacrée (°)</i>	47,14 ± 12,55	42,30 ± 10,43	0,092
<i>Version pelvienne (°)</i>	6,80 ± 6,65	9,96 ± 7,11	0,024*
<i>Incidence pelvienne (°)</i>	53,94 ± 12,70	52,26 ± 11,75	0,501

Au Tableau IX sont rapportés dix paramètres bidimensionnels qui décrivent l'orientation du bassin dans l'espace. Toutefois, les longueurs PS-acétabulums horizontales gauche et droite sont analysées comme étant un seul paramètre, ce qui nous donne un total de neuf paramètres. Le seul paramètre 2D de la version pelvienne est statistiquement plus grand de 3,16° lors de la dernière visite clinique. Par contre, d'autres valeurs sont à noter, car elles présentent des seuils qui sont presque significatifs, tels que les trois obliquités du bassin ainsi que la pente sacrée. L'obliquité des tubérosités ischiatiques est statistiquement la plus petite des obliquités de -1,55° tandis que la pente sacrée est statistiquement la plus petite des paramètres 2D de -4,84°.

4.3 Distorsion du bassin

La norme de la différence des côtés du bassin de chaque paramètre 3D pour les deux temps a été calculée pour estimer l'asymétrie entre les côtés du bassin en fonction de la croissance des filles. Le Tableau X ne rapporte aucune différence significative pour chacun des neuf paramètres 3D. Par contre, la longueur PS-acétabulum (mm) montre une

augmentation de 0,024 mm qui est près du seuil significatif. Dans ce même tableau, le bassin ne présente pas de distorsion puisqu'une valeur de p de 0,763 a été observée pour l'ensemble des paramètres 3D.

Tableau X. Moyenne et écart-type de la norme de la différence des côtés du bassin de chaque paramètre 3D. Test multivarié de chaque paramètre 3D par rapport à la norme de la différence des côtés du bassin à un facteur inter-sujet tel que celui représenté par les instants (T1 et T2); l'astérisque indique un p value significatif ($p < 0,05$).

Paramètres 3D	T1	T2	Temps
<i>PS-acétabulum (mm)</i>	0,031 ± 0,029	0,055 ± 0,047	0,083
<i>PS-Symphyse (mm)</i>	0,013 ± 0,011	0,011 ± 0,011	0,691
<i>EIPS-PS (mm)</i>	0,091 ± 0,057	0,091 ± 0,053	0,980
<i>EIPS-acétabulum (mm)</i>	0,037 ± 0,022	0,052 ± 0,039	0,165
<i>EIPS-Symphyse (mm)</i>	0,029 ± 0,019	0,036 ± 0,031	0,445
<i>Acétabulum-symphyse (mm)</i>	0,070 ± 0,074	0,049 ± 0,034	0,306
<i>Angle EIPS (°)</i>	0,094 ± 0,089	0,095 ± 0,070	0,968
<i>Angle acétabulum (°)</i>	0,039 ± 0,038	0,049 ± 0,032	0,407
<i>Angle symphyse (°)</i>	0,050 ± 0,045	0,072 ± 0,043	0,157

En conclusion, nous pouvons dire que l'asymétrie anatomique entre les côtés du bassin persiste au cours de la croissance des jeunes filles. Toutefois, les résultats du Tableau X nous montrent que cette asymétrie persiste, mais ne constitue pas une distorsion avec la croissance des jeunes filles puisqu'aucune valeur significative n'a été observée pour l'interaction entre la norme de la différence des côtés du bassin et les instants donnés.

Chapitre 5 : Discussion

Le principal objectif de ce travail était de documenter les asymétries morphologiques du bassin au cours de la croissance des jeunes filles atteintes de la scoliose idiopathique de l'adolescence. Le premier objectif spécifique était de comparer les paramètres morphologiques 3D du bassin calculés sur ses côtés droit et gauche afin de documenter s'il y a des asymétries pelviennes au moment du diagnostic de la scoliose ainsi qu'à la prescription d'un corset. Le second objectif spécifique de cette recherche était de documenter les déformations pelviennes pertinentes à la pratique clinique, telles que la rotation du bassin dans l'espace. C'est pourquoi des paramètres 2D ont également été mesurés sur le bassin des jeunes filles scoliotiques. Enfin, le troisième objectif spécifique était d'identifier une distorsion du bassin des jeunes filles en comparant la norme de la différence entre les côtés du bassin mesurés en 3D en fonction de la croissance des filles. Outre la discussion de ces trois objectifs spécifiques, les limites de cette étude et des suggestions de recherches futures complètent le présent chapitre.

5.1 Asymétrie pelvienne : côté gauche versus côté droit

De nombreuses études ont rapporté des dissymétries morphologiques chez les patients ayant une SIA. Toutefois, la plupart des travaux portent sur la disproportion du tronc (Goldberg, Moore, Fogarty, & Dowling, 2008; Grivas et al., 2006) et de la cage thoracique (Stokes et al., 1989; Zhu et al., 2011) ainsi que des membres supérieurs (Burwell et al., 2006). Des changements dans la morphologie du bassin qui pourraient modifier l'alignement et la croissance des vertèbres ont également été observés (Dalleau et al., 2012; Nicolopoulos et al., 1985; Stylianides et al., 2012). À notre connaissance et à ce jour, aucune étude n'avait comparé la géométrie des côtés gauche et droit du pelvis et son évolution avec la croissance de jeunes filles scoliotiques avant un traitement orthopédique.

La première étude faite sur la géométrie du bassin en 3D chez des sujets scoliotiques (Stylianides et al., 2012) a rapporté des différences dans la géométrie pelvienne entre de jeunes filles ayant une scoliose sévère et d'autres avec des scolioses modérées. Ces auteurs ont observé que les distances à gauche et à droite entre la première vertèbre sacrée (S1) et les

épines iliaques antéro-supérieures, le bord supérieur de la crête iliaque ainsi que le bord latéral de la crête étaient asymétriques. De plus, les filles ayant une scoliose sévère présentaient le côté droit plus large et le côté gauche plus profond que les filles ayant une scoliose modérée. Le présent travail de maîtrise a également mis en évidence une asymétrie morphologique significative entre les os coxaux du bassin. Toutefois, nos résultats de recherche sont différents de ceux obtenus par Stylianides et al. (2012). Lorsque nous avons considéré la condition « *Côté* » (gauche versus droit), une asymétrie morphologique significative entre les os coxaux gauche et droit du bassin a été observée pour l'ensemble des paramètres 3D. Stylianides et al. (2012), quant à eux, n'ont observé des asymétries significatives que pour trois distances parmi les vingt-quatre mesurées sur le bassin des groupes ayant une scoliose. De plus, ces auteurs ont noté une asymétrie morphologique sur des distances par rapport à la première vertèbre sacrée (S1) tandis que la présente recherche a observé une asymétrie sur des distances ayant les épines iliaques postéro-supérieures comme point anatomique. La présente recherche s'est appuyée sur la technique de stéréoradiographie au moyen du système EOS® comprenant des repères osseux alors que Stylianides et al. (2012) a employé le système électromagnétique Flock of Birds pour numériser la surface cutanée des repères anatomiques. Cette dernière méthode est plus sujette aux incertitudes de mesure, notamment par le fait que le champ électromagnétique peut entraîner des interférences durant l'acquisition des données afin de connaître la position et l'orientation de marqueurs cutanés. En ce qui concerne la méthode de stéréoradiographie telle qu'utilisée dans ce mémoire, certains travaux de recherche sont pertinents pour la reconstruction du bassin en 3D (Delorme et al., 2003; Gauvin et al., 1998). Toutefois, ces études portaient sur des spécimens cadavériques. De ce fait, le présent travail de maîtrise sera le premier à étudier la morphologie et l'orientation du bassin tridimensionnel chez de jeunes filles ayant la SIA en utilisant les images radiographiques obtenues par le système EOS®.

Lorsque nous avons considéré la condition « *Temps* », c'est-à-dire entre le moment du diagnostic de la scoliose et l'instant de la prescription du port d'un corset, une croissance osseuse du bassin a été observée pour l'ensemble des paramètres 3D. Cependant, aucun résultat significatif mettant en relation la distorsion du bassin à sa croissance osseuse au fil du temps n'a été observé. Cette constatation ne corrobore pas avec l'hypothèse formulée par

Stylianides et al. (2012) selon laquelle une croissance osseuse asymétrique produirait une torsion pelvienne conduisant à une déformation du rachis. Autrement dit, la présente recherche a constaté que l'asymétrie entre les côtés gauche et droit du bassin a augmenté au cours de la croissance osseuse des filles, sans toutefois créer de distorsion. À la différence de notre étude, leurs groupes présentaient des scolioses plus sévères et il ne s'agissait pas d'une étude longitudinale.

Dalleau et al. (2012) ont comparé la morphologie pelvienne entre deux groupes scoliotiques sans avoir de sujets non scoliotiques. Ces auteurs ont conclu que le groupe de scoliose sévère présentait un bassin plus large de 9 mm (11 %) au groupe ayant une scoliose modérée. De plus, ils ont observé que le groupe scoliotique sévère avait le côté droit pelvien plus large et le côté gauche plus profond lorsqu'il était comparé au groupe modéré. Cette observation du côté droit plus large que le côté gauche est aussi confirmée par le présent travail. Il est à noter que, dans cette recherche, la longueur *EIPS-acétabulum* peut être considérée comme étant la largeur du bassin, car ce paramètre s'étend sur l'os coxal d'une extrémité (EIPS) à l'autre (arcade des acétabulums). Toutefois, Dalleau et al. (2012) ont analysé deux groupes différents de sujets scoliotiques ayant toutes leurs courbures principales à droite. Cet aspect se différencie de notre recherche, car nous avons étudié un seul groupe de jeunes filles. De plus, le présent travail de maîtrise a eu comme objet d'étude un groupe hétérogène puisque les filles présentaient différentes convexités de courbures. En outre, dans les études de Dalleau et al. (2012) et Stylianides et al. (2012), les groupes de sujets étaient d'âges comparables alors que notre étude, elle, s'étend sur environ 12 mois et tient compte de la croissance osseuse.

Il est concevable que les paramètres anatomiques du bassin mesurés dans le plan sagittal, tels que l'incidence pelvienne, jouent un rôle important dans l'équilibre postural d'un individu (Duval-Beaupere et al., 1992; Legaye et al., 1998). En raison de cela, les courbures de la colonne vertébrale sont variables d'un individu à l'autre. Le concept de Nottingham (Burwell et al., 1992) suggère qu'une asymétrie morphologique dans les trois plans anatomiques du bassin ou des membres inférieurs pourrait déplacer la ligne de gravité du corps. Cela modifierait donc la chaîne musculaire de la colonne vertébrale pour assurer la

stabilité posturale. Afin d'assurer que la ligne de gravité passe par le centre de têtes fémorales, la biomécanique du corps s'adapterait au moyen d'efforts neuromusculaires, ce qui perturberait l'alignement de la colonne vertébrale. Toutefois, les résultats de cette recherche ne peuvent pas affirmer si l'asymétrie entre les côtés du bassin a engendré des déformations sur la colonne vertébrale tel que proposé par Burwell et al. (1992).

5.2 Rotation pelvienne

Une des principales préoccupations des études sur le bassin scoliotique semble être de dissocier l'asymétrie morphologique de l'orientation asymétrique dans l'espace. Lorsqu'on analyse une radiographie postéro-antérieure d'un individu scoliotique, une asymétrie géométrique du bassin est normalement observée. Néanmoins, il est difficile de déterminer si cette disproportion entre les côtés du bassin est due à une rotation de celui-ci par rapport au plan de la radiographie, à une distorsion ou encore à l'interaction de ces deux facteurs (Qiu et al., 2012). En effet, des travaux ont porté autant sur l'asymétrie entre les os coxaux des sujets scoliotiques (Qiu et al., 2012; Stylianides et al., 2012) que sur la rotation du bassin (Asher et al., 2010; Gum et al., 2007; Qiu et al., 2013). Gum et al. (2007) ont soutenu l'hypothèse que la rotation axiale du bassin se produirait dans le même sens que la courbure principale du rachis pour les groupes scoliotiques classés selon Lenke. Toutefois, ces auteurs ont réalisé leur étude sans tenir compte de la morphologie du bassin. D'autre part, Qiu et al. (2012) ont suggéré que la rotation axiale du bassin observée chez les patientes ayant la SIA pouvait être expliquée par une géométrie asymétrique entre ses côtés. Ces auteurs ont toutefois observé qu'il n'y avait aucune asymétrie pelvienne chez les patients ayant la scoliose. À ce jour, aucune recherche n'a exploré à la fois la rotation et la distorsion pelvienne dans une étude longitudinale des filles ayant une SIA.

Dans le but de documenter l'orientation du bassin chez les jeunes filles atteintes de la SIA et de dissocier la rotation de l'asymétrie anatomique, le présent travail de maîtrise s'est inspiré de l'étude de Stylianides et al. (2012). Ces auteurs, qui suggéraient que le bassin serait impliqué dans la progression de la scoliose idiopathique de l'adolescence, ont pris en considération autant la morphologie du bassin que son orientation spatiale dans une analyse

tridimensionnelle. Ils ont observé que l'orientation spatiale du bassin chez les sujets scoliotiques était similaire à celle des sujets non scoliotiques. En revanche, un seul groupe de jeunes filles scoliotiques a été impliqué dans la présente recherche sur l'orientation du bassin au moyen de neuf paramètres sur un intervalle d'environ 12 mois. Le seul paramètre qui a présenté une rotation significative au cours de la croissance de jeunes filles a été la version pelvienne mesurée dans le plan sagittal. Lorsque ce paramètre augmente, il correspond à une bascule vers l'arrière (rétroversion) tandis qu'une diminution de celui-ci correspond à une bascule vers l'avant (antéversion) (Morvan et al., 2008). Dans le présent travail, la version pelvienne a augmenté entre la première (T1) prise radiographique de jeunes filles et la seconde (T2). Cela indique que le bassin a basculé vers l'arrière produisant ainsi un mouvement de rétroversion pelvienne au cours de la croissance des jeunes filles. Ce mouvement du bassin pourrait entraîner une diminution de la lordose lombaire qui amènerait à un affaiblissement de la cyphose thoracique. Selon Allard et al. (2004) et Nault et al. (2002), une posture hypocyphotique peut être considérée comme un indicatif d'une scoliose. Ces résultats contredisent ceux de Mac-Thiong et al. (2003) qui n'ont observé aucun changement significatif de la version pelvienne entre les groupes scoliotiques. Là encore, cette étude ne portait pas sur un suivi longitudinal de patients scoliotiques, mais sur la comparaison de sujets ayant des scolioses de sévérité différente. Hong et al. (2010) ont également observé une version pelvienne significativement plus élevée sur des patients ayant une scoliose que sur des patients non scoliotiques. Ceci renforce nos résultats quant à l'augmentation de la version pelvienne conjointement à la déformation du rachis. Pour conclure, la présente recherche a été la première à documenter l'orientation du bassin au cours de la croissance pour un même groupe d'adolescentes scoliotiques au moyen d'un suivi longitudinal.

La pente sacrée qui diminue au cours de la croissance de jeunes filles est également à noter. D'après Morvan et al. (2008), cela pourrait s'expliquer par l'augmentation de la version pelvienne qui engendre le déplacement du centre de masse du corps en arrière des têtes fémorales. En conséquence, le bassin, en basculant vers l'arrière, entraîne une diminution de la pente sacrée, car le corps du sacrum se verticalise. Des paramètres, tels que l'obliquité du bassin et la pente sacrée, ont présenté des seuils presque significatifs au cours de la croissance de jeunes filles. Delorme et al. (2003) proposent que le bassin pourrait être incliné

latéralement dans l'espace. Ces auteurs ont retrouvé une variabilité de $0,2^\circ$ pour l'obliquité pelvienne et une autre de $0,3^\circ$ pour l'obliquité de la hanche. Cela nous a inspirés à mesurer l'obliquité des crêtes iliaques, acétabulums ainsi que des tubérosités ischiatiques dans le plan frontal.

En guise de conclusion, nous affirmons que l'attitude posturale du bassin au cours de la croissance de jeunes filles scoliotiques a été perturbée dans les plans frontal et sagittal, car les obliquités du bassin autant que la pente sacrée ont diminué durant la poussée pubertaire des filles. Cependant, le présent travail de maîtrise n'a constaté aucun changement de l'orientation du bassin dans le plan horizontal durant la croissance des filles.

5.3 Croissance du bassin et sa distorsion

Des études révèlent que la croissance osseuse anormale du rachis n'est pas la seule à être associée à la pathogenèse de scoliose idiopathique. Le concept de Nottingham décrit par Burwell et al. (1992) met en évidence des relations entre la croissance osseuse du bassin et la déformation de la colonne vertébrale. Cette théorie suggère qu'une anomalie du bassin causée par un développement anormal du système nerveux central pourrait entraîner des mécanismes neuromusculaires qui perturberaient l'alignement de la colonne vertébrale. Cette anomalie du bassin pourrait être causée par des changements d'orientation (Gum et al., 2007; Mac-Thiong et al., 2003) ou encore par une asymétrie dans sa géométrie (Dalleau et al., 2012; Mac-Thiong et al., 2006; Stylianides et al., 2012). De plus, Nicolopoulos et al. (1985) ont observé que la grande taille des jeunes filles ayant la scoliose par rapport à celles des jeunes filles non scoliotiques était due à la croissance osseuse anormale du bassin et des membres inférieurs. Ces auteurs suggèrent que la disproportion entre le squelette axial et les membres inférieurs serait un mécanisme étiologique. Cependant, l'analyse 2D de la hauteur du bassin réalisée par ces auteurs ne suffit pas pour comprendre le développement du bassin au cours de la croissance des jeunes filles scoliotiques. Dans cette étude, la hauteur pelvienne a été calculée à partir de la soustraction de la longueur des membres inférieurs à la taille du sujet en position debout et à la taille du sujet en position assise sans prendre en considération l'orientation spatiale du bassin. Stylianides et al. (2012) ont suggéré que la disproportion anatomique du

bassin est due à sa croissance horizontale anormale produisant ainsi une distorsion pelvienne. Cette hypothèse a été appuyée plus tard par Dalleau et al. (2012) qui ont suggéré que la croissance anormale du bassin pourrait être aussi liée à cette maladie. Les résultats de cette recherche ont également soutenu l'hypothèse qu'il existe une croissance osseuse anormale du bassin. Le présent travail n'a toutefois relevé aucun indice appuyant que cette asymétrie disproportionnelle au cours de la croissance de jeunes filles pourrait engendrer la distorsion du bassin et, conséquemment, la déformation du tronc et de la cage thoracique. En d'autres mots, l'asymétrie du bassin augmente au cours de la croissance osseuse des jeunes filles tout comme la scoliose, mais le lien entre les deux aspects demeure inconnu.

5.4 Limites de l'étude

La présente étude possède certaines limites, notamment un nombre réduit des jeunes filles, l'hétérogénéité des courbures et l'identification manuelle des repères anatomiques qui sont développés par la suite. Les sujets recrutés dans le présent travail de maîtrise étaient de jeunes filles scoliotiques pour lesquelles des radiographies bi-planaires étaient disponibles pour le chirurgien orthopédiste pédiatrique au moment du diagnostic et à l'instant de la prescription d'un corset. Dans la grande majorité des cas, la scoliose est constatée par le médecin lorsqu'elle est déjà légèrement avancée. De plus, le port du corset SpineCor (Coillard et al., 2009) a fait en sorte que les filles scoliotiques ont reçu un corset de manière précoce comparativement au corset traditionnel qui est prescrit plus tard. Cela se traduit par un angle de Cobb autour de 15° à 20° au moment de la prescription du corset. Même si l'intervalle moyen entre le diagnostic et le port du corset est de 12 mois, la progression de la scoliose entre les deux évaluations est relativement faible, mais significative. De plus, notre groupe d'étude était composé de jeunes scoliotiques ayant des courbures structurales à gauche et à droite. Il est à noter que Goldberg, Dowling et Fogarty (1994) ont observé dans leur étude que même si les scolioses à gauche ont moins tendance à progresser, elles peuvent aussi avoir des impacts morphologiques différents sur le squelette. Cependant, la présente recherche ne permet pas d'analyser l'influence de la convexité de la scoliose sur les impacts morphologiques du bassin compte tenu du nombre réduit de jeunes filles présentes dans chaque sous-groupe.

Comme toute étude qui porte sur l'identification des repères anatomiques sur des radiographies numérisées, une autre limite de notre recherche a été la difficulté d'identifier certaines régions osseuses du bassin. Afin de réaliser une reconstruction morphologique tridimensionnelle du bassin, la sélection de repères anatomiques dépend généralement de leur visibilité sur les deux vues radiographiques. Au cours de la présente recherche, les filles scoliotiques ont porté un protecteur plombé de radioprotection des organes reproductifs, ce qui a réduit la clarté de certains repères anatomiques du bassin. De plus, la taille et le type du protecteur ont joué un rôle important, car certaines patientes avaient des zones de leur bassin presque entièrement cachées. Ceci explique pourquoi la présente recherche a utilisé un nombre limité de points anatomiques privilégiant plutôt les régions du bassin éloignées du protecteur. Bien que l'asymétrie pelvienne soit corroborée par la littérature, notre recherche n'a pas couvert l'ensemble du bassin. Il se peut que la distorsion pelvienne soit plus marquée dans les zones dissimulées par le protecteur. Il reste à déterminer si cette asymétrie se produit sur l'os coxal autour des épines iliaques postéro-supérieures ou si elle se développe dans la région articulaire sacro-iliaque ou même sur le promontoire sacré.

5.4 Perspectives

En ce qui concerne les axes de recherches futures, l'asymétrie entre les côtés du bassin doit être investiguée en fonction de la convexité de la courbure principale de la scoliose. Pour ce faire, une étude rétrospective portant sur deux groupes de types de scoliose différents (gauche et droit) pourrait expliquer l'hypothèse que l'asymétrie morphologique pelvienne se déroule en raison de la convexité de la courbure principale. Cette recherche devrait être effectuée lors du début de la scoliose vers l'âge de 11 ans jusqu'au moment de la prescription d'un traitement orthopédique, comme nous l'avons fait dans le présent mémoire.

Comme il a été mentionné précédemment, les obliquités du bassin ont présenté des seuils presque significatifs de progression au cours de la croissance de jeunes filles scoliotiques. Toutefois, il serait intéressant de savoir si les inclinaisons latérales du bassin sont différentes entre des sujets scoliotiques et non scoliotiques ainsi qu'identifier la direction d'inclinaison du bassin. Le rôle de l'orientation du bassin dans la pathogenèse de la SIA doit

être analysé par des études diachroniques portant sur de jeunes scoliotiques qui n'auront subi aucun traitement comparé à des adolescents normaux. Ainsi, il serait possible de comparer l'orientation du bassin au cours de la croissance des patients scoliotiques à celle d'un groupe de sujets non scoliotiques. Une telle approche pourrait nous conduire à une analyse plus large de l'orientation pelvienne quant à son orientation spatiale.

En outre, une étude comparative de la morphologie tridimensionnelle pelvienne et de celle en 2D permettrait aux cliniciens de mieux comprendre l'importance d'étudier la géométrie du bassin dans les trois plans anatomiques liée à la déformation du rachis. En comparant la morphologie du bassin en 3D et en 2D, de plus fortes corrélations quant aux déformations pelviennes liées à la déformation de la colonne vertébrale pourraient être observées.

Finalement, en plus d'étudier la morphologie tridimensionnelle du bassin scoliotique, la présente recherche permettra d'orienter la compréhension du rôle du bassin dans la pathogenèse de la scoliose idiopathique de l'adolescence. Il est clair que d'autres études doivent être menées pour mieux comprendre le déroulement de l'asymétrie morphologique du bassin associée à la progression de la scoliose, plus particulièrement de l'angle de Cobb.

Chapitre 6 : Conclusion

Le présent travail de maîtrise a porté sur l'évolution de la morphologie tridimensionnelle du bassin associé à la progression de la scoliose idiopathique de l'adolescence à partir du système d'imagerie EOS®. Ce travail a fait également la lumière sur des déformations du bassin pertinentes à la pratique clinique au moyen de paramètres bidimensionnels.

En conclusion, notre étude débouche sur des résultats qui indiquent que les jeunes filles atteintes de la scoliose idiopathique de l'adolescence développent une asymétrie morphologique entre les deux os coxaux du bassin au cours de leur croissance. Cette asymétrie constatée au moment du diagnostic de la scoliose des filles a évolué jusqu'au moment de la prescription du corset. De plus, le côté droit du bassin semble être plus grand que le côté gauche, principalement sur des paramètres ayant les épines iliaques postéro-supérieures comme points anatomiques. Quant aux paramètres bidimensionnels, nous pouvons conclure que la rotation du bassin vers l'arrière a augmenté au cours de la croissance de jeunes filles, produisant ainsi une rétroversion pelvienne dans le plan sagittal. Il est à noter également que les obliquités du bassin ainsi que la pente sacrée ont diminué pendant l'intervalle de temps situé entre le diagnostic de la scoliose et le moment de la prescription du port du corset. Cette diminution de la pente sacrée pourrait s'expliquer par l'augmentation de la bascule vers l'arrière du bassin où le sacrum se rapproche plus de la verticale. Il est certain que des changements sur l'attitude posturale du bassin se produisent au cours de la croissance de jeunes filles. La distorsion tridimensionnelle du bassin n'a toutefois pas été observée au cours de notre étude. Aucun paramètre 3D d'asymétrie morphologique du bassin n'a évolué en fonction de la croissance de jeunes filles.

Bibliographie

- Abdel-Aziz, Y. I. (1971). *Karara. HM (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates in close-range photogrammetry*. Communication présentée Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry of the American Society of Photogrammetry.
- Adams, F. (1891). *The Genuine Works of Hippocrates: Translated from the Greek with a Preliminary Discourse and Annotations*. New York: W. Wood.
- Allard, P., Chavet, P., Barbier, F., Gatto, L., Labelle, H., & Sadeghi, H. (2004). Effect of body morphology on standing balance in adolescent idiopathic scoliosis. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(9), 689-697.
- Allard, P., Nault, M. L., Hinse, S., LeBlanc, R., & Labelle, H. (2001). Relationship between morphologic somatotypes and standing posture equilibrium. *Annals of Human Biology*, 28(6), 624-633.
- Asher, M. A., Lai, S. M., Carlson, B. B., Gum, J. L., & Burton, D. C. (2010). Transverse plane pelvic rotation increase (TPPRI) following rotationally corrective instrumentation of adolescent idiopathic scoliosis double curves. *Scoliosis*, 5, 18. doi: 10.1186/1748-7161-5-18.
- Beaulieu, M., Toulotte, C., Gatto, L., Rivard, C. H., Teasdale, N., Simoneau, M., & Allard, P. (2009). Postural imbalance in non-treated adolescent idiopathic scoliosis at different periods of progression. *European Spine Journal*, 18(1), 38-44. doi: 10.1007/s00586-008-0831-6.
- Bernard, J. C., Jemni, S., Schneider, M., Boussard, D., Saillard, V., Bard, R., . . . Notin, G. (2005). [Evaluation of the efficacy of a carbon brace ("Corset monocoque carbone respectant la respiration" [CMCR]) preserving lung capacity to treat idiopathic scoliosis in children and adolescents: a retrospective study of 115 patients]. *Annales de réadaptation et de médecine physique : revue scientifique de la Société française de rééducation fonctionnelle de réadaptation et de médecine physique*, 48(9), 637-649. doi: 10.1016/j.annrmp.2005.08.004.
- Berthonnaud, E., Dimnet, J., Roussouly, P., & Labelle, H. (2005). Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*, 18(1), 40-47.
- Birchall, D., Hughes, D., Gregson, B., & Williamson, B. (2005). Demonstration of vertebral and disc mechanical torsion in adolescent idiopathic scoliosis using three-dimensional MR imaging. *European Spine Journal*, 14(2), 123-129. doi: 10.1007/s00586-004-0705-5.

- Birchall, D., Hughes, D. G., Hindle, J., Robinson, L., & Williamson, J. B. (1997). Measurement of vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis using three-dimensional magnetic resonance imaging. *Spine (Phila Pa 1976)*, *22*(20), 2403-2407.
- Boulay, C., Tardieu, C., Benaim, C., Hecquet, J., Marty, C., Prat-Pradal, D., . . . Pelissier, J. (2006). Three-dimensional study of pelvic asymmetry on anatomical specimens and its clinical perspectives. *Journal of Anatomy*, *208*(1), 21-33. doi: 10.1111/j.1469-7580.2006.00513.x.
- Boulay, C., Tardieu, C., Hecquet, J., Benaim, C., Mouilleseaux, B., Marty, C., . . . Pelissier, J. (2006). Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *European Spine Journal*, *15*(4), 415-422. doi: 10.1007/s00586-005-0984-5.
- Bruyneel, A. V., Chavet, P., Bollini, G., & Mesure, S. (2010). Gait initiation reflects the adaptive biomechanical strategies of adolescents with idiopathic scoliosis. *Ann Phys Rehabil Med*, *53*(6-7), 372-386. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rehab.2010.06.005>.
- Bunnell, W. P. (1986). The natural history of idiopathic scoliosis before skeletal maturity. *Spine (Phila Pa 1976)*, *11*(8), 773-776.
- Burwell, R., Freeman, B. J. C., Dangerfield, P., Aujla, R., Cole, A. A., Kirby, A., . . . Moulton, A. (2006). Left-right upper arm length asymmetry associated with apical vertebral rotation in subjects with thoracic scoliosis: anomaly of bilateral symmetry affecting vertebral, costal and upper arm physes? *Studies in Health Technology and Informatics*, *123*, 66.
- Burwell, R. G., Cole, A. A., Cook, T. A., Grivas, T. B., Kiel, A. W., Moulton, A., . . . et al. (1992). Pathogenesis of idiopathic scoliosis. The Nottingham concept. *Acta Orthopaedica Belgica*, *58 Suppl 1*, 33-58.
- Chen, P. Q., Wang, J. L., Tsuang, Y. H., Liao, T. L., Huang, P. I., & Hang, Y. S. (1998). The postural stability control and gait pattern of idiopathic scoliosis adolescents. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, *13*(1 Suppl 1), S52-S58.
- Cobb, J. R. (1948). Outline for the study of scoliosis. *Instructional Course Lectures*, *5*, 261-275.
- Coillard, C., Circo, A. B., & Rivard, C. H. (2009). SpineCore treatment for early scoliosis: 15 to 24. *Scoliosis*, *4*(Suppl 1), O34.
- Coillard, C., Circo, A. B., & Rivard, C. H. (2010). SpineCor treatment for Juvenile Idiopathic Scoliosis: SOSORT award 2010 winner. *Scoliosis*, *5*, 25. doi: 10.1186/1748-7161-5-25.

- Cotrel, Y., & Dubousset, J. (1984). A new technic for segmental spinal osteosynthesis using the posterior approach]. *Revue de chirurgie orthopédique et réparatrice de l'appareil moteur*, 70(6), 489.
- Dalleau, G., Leroyer, P., Beaulieu, M., Verkindt, C., Rivard, C. H., & Allard, P. (2012). Pelvis morphology, trunk posture and standing imbalance and their relations to the Cobb angle in moderate and severe untreated AIS. *PLoS One*, 7(7), e36755. doi: 10.1371/journal.pone.0036755.
- Della Croce, U., Cappozzo, A., & Kerrigan, D. C. (1999). Pelvis and lower limb anatomical landmark calibration precision and its propagation to bone geometry and joint angles. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 37(2), 155-161.
- Delorme, S., Petit, Y., de Guise, J. A., Labelle, H., Aubin, C. E., & Dansereau, J. (2003). Assessment of the 3-d reconstruction and high-resolution geometrical modeling of the human skeletal trunk from 2-D radiographic images. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 50(8), 989-998. doi: 10.1109/TBME.2003.814525.
- Delplanque, M., de la Simone, M., Burdin, V., Skalli, W., Pomero, V., Brusson, A., & Lazennec, J.-Y. (2012). Imagerie 3D fonctionnelle de l'articulation de la hanche pour la prévention, le diagnostic, la planification et le suivi chirurgical. *IRBM*, 33(2), 98-108.
- Deschenes, S., Charron, G., Beaudoin, G., Labelle, H., Dubois, J., Miron, M. C., & Parent, S. (2010). Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(9), 989-994. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181bdcaa4.
- Diard, F., Chateil, J. F., Hauger, O., Moinard, M., & Ducou-Lepointe, H. (2002). [Imaging of childhood and adolescent scoliosis]. *Journal de Radiologie*, 83(9 Pt 2), 1117-1139; discussion 1141-1112.
- Dubousset, J. (1999). [Idiopathic scoliosis. Definition--pathology--classification--etiology]. *Bulletin de l'Academie Nationale de Medecine*, 183(4), 699-704.
- Dubousset, J., Charpak, G., Dorion, I., Skalli, W., Lavaste, F., Deguise, J., . . . Ferey, S. (2005). [A new 2D and 3D imaging approach to musculoskeletal physiology and pathology with low-dose radiation and the standing position: the EOS system]. *Bulletin de l'Academie Nationale de Medecine*, 189(2), 287-297; discussion 297-300.
- Dubousset, J., Charpak, G., Skalli, W., de Guise, J., Kalifa, G., & Wicart, P. (2008). Modélisation vertébrale et squelettique par le système EOS. *Archives de Pédiatrie*, 15(5), 665-666.
- Dubousset, J., & Cotrel, Y. (1991). Application technique of Cotrel-Dubousset instrumentation for scoliosis deformities. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 264, 103-110.

- Dubousset, J., Queneau, P., & Thillard, M. (1983). Experimental scoliosis induced by pineal and diencephalic lesions in young chickens: its relation with clinical findings. *Orthop Trans*, 7(7).
- Duval-Beaupere, G., Schmidt, C., & Cosson, P. (1992). A Barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Annals of Biomedical Engineering*, 20(4), 451-462.
- Eddine, T. A., Migaud, H., Chantelot, C., Cotten, A., Fontaine, C., & Duquennoy, A. (2001). Variations of pelvic anteversion in the lying and standing positions: analysis of 24 control subjects and implications for CT measurement of position of a prosthetic cup. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 23(2), 105-110.
- Edery, P., Biot, B., & Bernard, J. C. (2005). La génétique peut-elle nous aider à comprendre la scoliose idiopathique? *Résonances Européennes du Rachis*, 1661-1663.
- Edery, P., Margaritte-Jeannin, P., Biot, B., Labalme, A., Bernard, J. C., Chastang, J., . . . Clerget-Darpoux, F. (2011). New disease gene location and high genetic heterogeneity in idiopathic scoliosis. *European Journal of Human Genetics*, 19(8), 865-869. doi: 10.1038/ejhg.2011.31.
- Fayssoux, R. S., Cho, R. H., & Herman, M. J. (2010). A history of bracing for idiopathic scoliosis in North America. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 468(3), 654-664. doi: 10.1007/s11999-009-0888-5.
- Feydy, A., Ferey, S., Merzoug, V., Guerini, H., Chevrot, A., Dubousset, J., . . . Drape, J. (2008). Imagerie de la scoliose. Place du système EOS. *Société d'imagerie musculo-squelettique. Congrès Thématique de Juin. Paris (Fr): Sauramps médical*.
- Gatto, L., Allard, P., Chavet, P., Barbier, F., & Labelle, H. (2003). Effect of body somatotype on standing balance in adolescent idiopathic scoliosis. *Archives of Physiology and Biochemistry* 111, 10.
- Gauchard, G. C., Lascombes, P., Kuhnast, M., & Perrin, P. P. (2001). Influence of different types of progressive idiopathic scoliosis on static and dynamic postural control. *Spine (Phila Pa 1976)*, 26(9), 1052-1058.
- Gauvin, C., Dansereau, J., Petit, Y., De Guise, J. A., & Labelle, H. (1998). [Customized 3D radiographic reconstruction of the human pelvis]. *Annales de Chirurgie*, 52(8), 744-751.
- A Glossary of Scoliosis Terms. (1976). *Spine*, 1(1), 57-58.
- Goldberg, C. J., Dowling, F. E., & Fogarty, E. E. (1994). Left thoracic scoliosis configurations. Why so different? *Spine (Phila Pa 1976)*, 19(12), 1385-1389.

- Goldberg, C. J., Fogarty, E. E., Moore, D. P., & Dowling, F. E. (1997). Scoliosis and developmental theory: adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, *22*(19), 2228-2237; discussion 2237-2228.
- Goldberg, C. J., Moore, D. P., Fogarty, E. E., & Dowling, F. E. (2008). Scoliosis: a review. *Pediatric Surgery International*, *24*(2), 129-144. doi: 10.1007/s00383-007-2016-5.
- Gorman, K. F., Julien, C., & Moreau, A. (2012). The genetic epidemiology of idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*, *21*(10), 1905-1919. doi: 10.1007/s00586-012-2389-6.
- Grivas, T. B., Vasiliadis, E. S., Koufopoulos, G., Segos, D., Triantafyllopoulos, G., & Mouzakis, V. (2006). Study of trunk asymmetry in normal children and adolescents. *Scoliosis*, *1*, 19. doi: 10.1186/1748-7161-1-19.
- Gum, J. L., Asher, M. A., Burton, D. C., Lai, S. M., & Lambart, L. M. (2007). Transverse plane pelvic rotation in adolescent idiopathic scoliosis: primary or compensatory? *European Spine Journal*, *16*(10), 1579-1586. doi: 10.1007/s00586-007-0400-4.
- Harrington, P. R. (1962). Treatment of Scoliosis Correction and Internal Fixation by Spine Instrumentation. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, *44*(4), 591-634.
- Hong, J. Y., Suh, S. W., Modi, H. N., Hur, C. Y., Yang, J. H., & Song, H. R. (2010). Correlation of pelvic orientation with adult scoliosis. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*, *23*(7), 461-466. doi: 10.1097/BSD.0b013e3181bf1a85.
- Horduna, M., & Legaye, J. (2008). Influence of the sagittal anatomy of the pelvis on the intercrestal line position. *European Journal of Anaesthesiology*, *25*(3), 200-205. doi: 10.1017/S0265021507002803.
- Humbert, L., De Guise, J. A., Aubert, B., Godbout, B., & Skalli, W. (2009). 3D reconstruction of the spine from biplanar X-rays using parametric models based on transversal and longitudinal inferences. *Medical Engineering and Physics*, *31*(6), 681-687. doi: 10.1016/j.medengphy.2009.01.003.
- James, J. I. (1954). Idiopathic scoliosis; the prognosis, diagnosis, and operative indications related to curve patterns and the age at onset. *Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, *36-B*(1), 36-49.
- Janssen, M. M., Drevelle, X., Humbert, L., Skalli, W., & Castelein, R. M. (2009). Differences in male and female spino-pelvic alignment in asymptomatic young adults: a three-dimensional analysis using upright low-dose digital biplanar X-rays. *Spine (Phila Pa 1976)*, *34*(23), E826-832. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181a9fd85.
- Journe, A., Sadaka, J., Belicourt, C., & Sautet, A. (2012). New method for measuring acetabular component positioning with EOS imaging: feasibility study on dry bone. *International Orthopaedics*, *36*(11), 2205-2209. doi: 10.1007/s00264-012-1650-2.

- Kadoury, S., Cheriet, F., Laporte, C., & Labelle, H. (2007). A versatile 3D reconstruction system of the spine and pelvis for clinical assessment of spinal deformities. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 45(6), 591-602. doi: 10.1007/s11517-007-0182-1.
- Kane, W. J. (1977). Scoliosis prevalence: a call for a statement of terms. *Clinical Orthopaedics and Related Research*(126), 43-46.
- Kersnič, B., Iglič, A., Kralj-Iglič, V., Srakar, F., & Antolič, V. (1997). Increased incidence of arthrosis in women could be related to femoral and pelvic shape. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 116(6-7), 345-347.
- Khouri, N., Vialle, R., Mary, P., & Biot, B. (2004). Scoliose idiopathique en période de croissance. Indications et programmes thérapeutiques. *EMC-Rhumatologie-Orthopedie*, 1(1), 45-63.
- Kim, H., Kim, H. S., Moon, E. S., Yoon, C.-S., Chung, T.-S., Song, H.-T., . . . Kim, S. (2010). Scoliosis imaging: what radiologists should know. *Radiographics*, 30(7), 1823-1842.
- King, H. A., Moe, J. H., Bradford, D. S., & Winter, R. B. (1983). The selection of fusion levels in thoracic idiopathic scoliosis. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 65(9), 1302-1313.
- Koreska, J., Gibson, D. A., & Robertson, D. (1978a). Three-dimensional analysis of spinal deformities. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 104(1), 239-253.
- Koreska, J., Schwentker, E. P., Albisser, A. M., Gibson, D. A., & Mills, R. H. (1978b). A simple approach to standardized spinal radiographs. *Medical Instrumentation*, 12(1), 59-63.
- Kruse, L. M., Buchan, J. G., Gurnett, C. A., & Dobbs, M. B. (2012). Polygenic threshold model with sex dimorphism in adolescent idiopathic scoliosis: the Carter effect. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 94(16), 1485-1491. doi: 10.2106/JBJS.K.01450.
- LeBlanc, R., Labelle, H., Rivard, C. H., & Poitras, B. (1997). Relation Between Adolescent Idiopathic Scoliosis and Morphologic Somatotypes. *Spine*, 22(21), 2532-2536.
- Legaye, J. (2011). Le bassin tridimensionnel dynamique en évolution dans le complexe lombo-pelvi-fémoral (*Réflexions autour du bassin* (p. 17-38): Springer.
- Legaye, J., & Duval-Beaupere, G. (2005). Sagittal plane alignment of the spine and gravity: a radiological and clinical evaluation. *Acta Orthopaedica Belgica*, 71(2), 213-220.
- Legaye, J., Duval-Beaupere, G., Hecquet, J., & Marty, C. (1998). Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *European Spine Journal*, 7(2), 99-103.

- Lenke, L. G., Betz, R. R., Harms, J., Bridwell, K. H., Clements, D. H., Lowe, T. G., & Blanke, K. (2001). Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *Journal of Bone and Joint Surgery*, *83-A*(8), 1169-1181.
- Lonner, B. S., Auerbach, J. D., Sponseller, P., Rajadhyaksha, A. D., & Newton, P. O. (2010). Variations in pelvic and other sagittal spinal parameters as a function of race in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, *35*(10), E374-377. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181bb4f96.
- Lonstein, J. E., & Carlson, J. M. (1984). The prediction of curve progression in untreated idiopathic scoliosis during growth. *Journal of Bone and Joint Surgery*, *66*(7), 1061-1071.
- Lucas, B., Asher, M., McIff, T., Lark, R., & Burton, D. (2005). Estimation of transverse plane pelvic rotation using a posterior-anterior radiograph. *Spine*, *30*(1), E20-E27.
- Mac-Thiong, J. M., Berthonnaud, E., Dimar, J. R., 2nd, Betz, R. R., & Labelle, H. (2004). Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine (Phila Pa 1976)*, *29*(15), 1642-1647.
- Mac-Thiong, J. M., Labelle, H., Charlebois, M., Huot, M. P., & de Guise, J. A. (2003). Sagittal plane analysis of the spine and pelvis in adolescent idiopathic scoliosis according to the coronal curve type. *Spine (Phila Pa 1976)*, *28*(13), 1404-1409. doi: 10.1097/01.BRS.0000067118.60199.D1.
- Mac-Thiong, J. M., Labelle, H., & de Guise, J. A. (2006). Comparison of sacropelvic morphology between normal adolescents and subjects with adolescent idiopathic scoliosis. *Studies in Health Technology and Informatics*, *123*, 195-200.
- Machida, M., Dubousset, J., Imamura, Y., Iwaya, T., Yamada, T., & Kimura, J. (1993). An experimental study in chickens for the pathogenesis of idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, *18*(12), 1609-1615.
- Machida, M., Dubousset, J., Imamura, Y., Iwaya, T., Yamada, T., Kimura, J., & Toriyama, S. (1994). Pathogenesis of idiopathic scoliosis: SEPs in chicken with experimentally induced scoliosis and in patients with idiopathic scoliosis. *Journal of Pediatric Orthopedics*, *14*(3), 329-335.
- Mahaudens, P., Thonnard, J. L., & Detrembleur, C. (2005). Influence of structural pelvic disorders during standing and walking in adolescents with idiopathic scoliosis. *Spine J*, *5*(4), 427-433. doi: 10.1016/j.spinee.2004.11.014.
- Marzan, G., & Karara, H. (1975). *A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition, and some applications of it*. Communication présentée Proceedings of the Symposium on close-range Photogrammetric Systems.

- McNeice, G., Koreska, J., & Raso, J. (1975). Spatial description of the spine in scoliosis. *Advances in Bioengineering*, 76-86.
- Mendoza-Lattes, S., Ries, Z., Gao, Y., & Weinstein, S. L. (2010). Natural history of spinopelvic alignment differs from symptomatic deformity of the spine. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(16), E792-798. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181d35ca9.
- Merriam, W. F., Burwell, R. G., Mulholland, R. C., Pearson, J. C., & Webb, J. K. (1983). A study revealing a tall pelvis in subjects with low back pain. *Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 65(2), 153-156.
- Mitton, D., Deschenes, S., Laporte, S., Godbout, B., Bertrand, S., de Guise, J. A., & Skalli, W. (2006). 3D reconstruction of the pelvis from bi-planar radiography. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 9(1), 1-5. doi: 10.1080/10255840500521786.
- Moes, C. C. (1998). Measuring the tilt of the pelvis. *Ergonomics*, 41(12), 1821-1831. doi: 10.1080/001401398185992.
- Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, A. M. R. (2011). Bassin et perinée. Dans D. B. Université (dir.), *Anatomie médicale : Aspects fondamentaux et applications cliniques* (p. 327-438). U.S.A: Lippincott Williams & Wilkins / Wolters Kluwer Health.
- Moreau, A., Wang, D. S., Forget, S., Azeddine, B., Angeloni, D., Fraschini, F., . . . Grimard, G. (2004). Melatonin signaling dysfunction in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 29(16), 1772-1781.
- Morvan, G., Mathieu, P., Vuillemin, V., Guerini, H., Bossard, P., Zeitoun, F., & Wybier, M. (2011). Standardized way for imaging of the sagittal spinal balance. *European Spine Journal*, 20 Suppl 5, 602-608. doi: 10.1007/s00586-011-1927-y.
- Morvan, G., Wybier, M., Mathieu, P., Vuillemin, V., & Guerini, H. (2008). Clichés simples du rachis: statique et relations entre rachis et bassin. *Journal de Radiologie*, 89(5), 654-663.
- Nault, M. L., Allard, P., Hinse, S., Le Blanc, R., Caron, O., Labelle, H., & Sadeghi, H. (2002). Relations between standing stability and body posture parameters in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 27(17), 1911-1917.
- Nicolopoulos, K. S., Burwell, R. G., & Webb, J. K. (1985). Stature and its components in adolescent idiopathic scoliosis. Cephalo-caudal disproportion in the trunk of girls. *Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 67(4), 594-601.
- Novosad, J., Eng, B., Cheriet, F., Delorme, S., Poirier, S., Beausejour, M., & Labelle, H. (2002). Self-calibration of biplanar radiographs for a retrospective comparative study of the 3D correction of adolescent idiopathic scoliosis. *Studies in Health Technology and Informatics*, 91, 272-275.

- Ogilvie, J. W., Braun, J., Argyle, V., Nelson, L., Meade, M., & Ward, K. (2006). The search for idiopathic scoliosis genes. *Spine (Phila Pa 1976)*, *31*(6), 679-681. doi: 10.1097/01.brs.0000202527.25356.90.
- Parent, S., Newton, P. O., & Wenger, D. R. (2005). Adolescent idiopathic scoliosis: etiology, anatomy, natural history, and bracing. *Instructional Course Lectures*, *54*, 529-536.
- Pasha, S., Sangole, A. P., Aubin, C. E., Parent, S., Mac-Thiong, J. M., & Labelle, H. (2010). Characterizing pelvis dynamics in adolescent with idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, *35*(17), E820-826. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181e6856d.
- Patriquin, M. L., Steyn, M., & Loth, S. R. (2002). Metric assessment of race from the pelvis in South Africans. *Forensic Science International*, *127*(1-2), 104-113.
- Patriquin, M. L., Steyn, M., & Loth, S. R. (2005). Metric analysis of sex differences in South African black and white pelvises. *Forensic Science International*, *147*(2-3), 119-127. doi: 10.1016/j.forsciint.2004.09.074.
- Ponseti, I. V., & Friedman, B. (1950). Prognosis in idiopathic scoliosis. *Journal of Bone and Joint Surgery*, *32A*(2), 381-395.
- Qiu, X. S., Wang, Z. W., Qiu, Y., Wang, W. J., Mao, S. H., Zhu, Z. Z., . . . Qiao, J. (2013). Preoperative pelvic axial rotation: a possible predictor for postoperative coronal decompensation in thoracolumbar/lumbar adolescent idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*, *22*(6), 1264-1272. doi: 10.1007/s00586-013-2695-7.
- Qiu, X. S., Zhang, J. J., Yang, S. W., Lv, F., Wang, Z. W., Chiew, J., . . . Qiu, Y. (2012). Anatomical study of the pelvis in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Journal of Anatomy*, *220*(2), 173-178. doi: 10.1111/j.1469-7580.2011.01458.x.
- Rajnic, P., Pomero, V., Templier, A., Lavaste, F., & Illes, T. (2001). Computer-assisted assessment of spinal sagittal plane radiographs. *Journal of Spinal Disorders*, *14*(2), 135-142.
- Reynolds, H. M., Snow, C. C., & Young, J. W. (1982). Spatial geometry of the human pelvis: DTIC Document.
- Roussouly, P., Gollogly, S., Berthonnaud, E., & Dimnet, J. (2005). Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. *Spine (Phila Pa 1976)*, *30*(3), 346-353.
- Roussouly, P., & Nnadi, C. (2010). Sagittal plane deformity: an overview of interpretation and management. *European Spine Journal*, *19*(11), 1824-1836. doi: 10.1007/s00586-010-1476-9.
- Sahlstrand, T., Örtengren, R., & Nachemson, A. L. (1978). Postural equilibrium in adolescent idiopathic scoliosis. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, *49*(4), 354-365.

- Sahlstrand, T., Petruson, B., & Ortengren, R. (1979). Vestibulospinal reflex activity in patients with adolescent idiopathic scoliosis. Postural effects during caloric labyrinthine stimulation recorded by stabilometry. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 50(3), 275-281.
- Saji, M. J., Upadhyay, S. S., & Leong, J. C. (1995). Increased femoral neck-shaft angles in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 20(3), 303-311.
- Simoneau, M., Lamothe, V., Hutin, E., Mercier, P., Teasdale, N., & Blouin, J. (2009). Evidence for cognitive vestibular integration impairment in idiopathic scoliosis patients. *BMC Neuroscience*, 10, 102. doi: 10.1186/1471-2202-10-102.
- Simoneau, M., Richer, N., Mercier, P., Allard, P., & Teasdale, N. (2006). Sensory deprivation and balance control in idiopathic scoliosis adolescent. *Experimental Brain Research*, 170(4), 576-582. doi: 10.1007/s00221-005-0246-0.
- Soucacos, P. N., Zacharis, K., Gelalis, J., Soultanis, K., Kalos, N., Beris, A., . . . Johnson, E. O. (1998). Assessment of curve progression in idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*, 7(4), 270-277.
- Stokes, I. A., Dansereau, J., & Moreland, M. S. (1989). Rib cage asymmetry in idiopathic scoliosis. *Journal of Orthopaedic Research*, 7(4), 599-606. doi: 10.1002/jor.1100070419.
- Stylianides, G. A., Beaulieu, M., Dalleau, G., Rivard, C. H., & Allard, P. (2012). Iliac crest orientation and geometry in able-bodied and non-treated adolescent idiopathic scoliosis girls with moderate and severe spinal deformity. *European Spine Journal*, 21(4), 725-732. doi: 10.1007/s00586-011-2070-5.
- Stylianides, G. A., Dalleau, G., Begon, M., Rivard, C.-H., & Allard, P. (2013). Pelvic Morphology, Body Posture and Standing Balance Characteristics of Adolescent Able-Bodied and Idiopathic Scoliosis Girls. *PLoS One*, 8(7), e70205. doi: 10.1371/journal.pone.0070205.
- Tardieu, C., Hecquet, J., Barrau, A., Loridon, P., Boulay, C., Legaye, J., . . . Duval-Beaupère, G. (2006). Le bassin, interface articulaire entre rachis et membres inférieurs: analyse par le logiciel DE-VISU. *Comptes Rendus Palevol*, 5(3), 583-595.
- Trobisch, P., Suess, O., & Schwab, F. (2010). Idiopathic scoliosis. *Dtsch Arztebl Int*, 107(49), 875-883; quiz 884. doi: 10.3238/arztebl.2010.0875.
- Vaz, G., Roussouly, P., Berthonnaud, E., & Dimnet, J. (2002). Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *European Spine Journal*, 11(1), 80-87.
- Vialle, R., Levassor, N., Rillardon, L., Templier, A., Skalli, W., & Guigui, P. (2005). Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in

asymptomatic subjects. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 87(2), 260-267. doi: 10.2106/JBJS.D.02043.

Vrtovec, T., Janssen, M. M., Likar, B., Castelein, R. M., Viergever, M. A., & Pernus, F. (2012). A review of methods for evaluating the quantitative parameters of sagittal pelvic alignment. *Spine J*, 12(5), 433-446. doi: 10.1016/j.spinee.2012.02.013.

Wade, R., Yang, H., McKenna, C., Faria, R., Gummerson, N., & Woolacott, N. (2013). A systematic review of the clinical effectiveness of EOS 2D/3D X-ray imaging system. *European Spine Journal*, 22(2), 296-304. doi: 10.1007/s00586-012-2469-7.

Wang, W. J., Yeung, H. Y., Chu, W. C., Tang, N. L., Lee, K. M., Qiu, Y., . . . Cheng, J. C. (2011). Top theories for the etiopathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis. *Journal of Pediatric Orthopedics*, 31(1 Suppl), S14-27. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181f73c12.

Wong, H. K., & Tan, K. J. (2010). The natural history of adolescent idiopathic scoliosis. *Indian Journal of Orthopaedics*, 44(1), 9-13. doi: 10.4103/0019-5413.58601.

Yazici, M., Acaroglu, E. R., Alanay, A., Deviren, V., Cila, A., & Surat, A. (2001). Measurement of vertebral rotation in standing versus supine position in adolescent idiopathic scoliosis. *Journal of Pediatric Orthopedics*, 21(2), 252-256.

Yong, Q., Zhen, L., Zezhang, Z., Bangping, Q., Feng, Z., Tao, W., . . . Weiwei, M. (2012). Comparison of Sagittal Spinopelvic Alignment in Chinese Adolescents With and Without Idiopathic Thoracic Scoliosis. *Spine*, 37(12), E714.

Zabjek, K. F., Leroux, M. A., Coillard, C., Prince, F., & Rivard, C. H. (2008). Postural characteristics of adolescents with idiopathic scoliosis. *Journal of Pediatric Orthopedics*, 28(2), 218-224. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181651bdc.

Zhu, F., Chu, W. C.-w., Sun, G., Zhu, Z.-z., Wang, W.-j., Cheng, J. C., & Qiu, Y. (2011). Rib length asymmetry in thoracic adolescent idiopathic scoliosis: is it primary or secondary? *European Spine Journal*, 20(2), 254-259.

commons.wikimedia.org/wiki/File:Skeletpelvis-pubis.jpg. (2006). Skeletpelvis-pubis.

<http://club.doctissimo.fr/>. Anatomie du bassin.

www.centrechiropratiquebeaulieu.com/scoliose-depistage.htm. Test d'Adam.

www.corpshumain.ca/Os_Bassin.php. Vue supérieure des os du bassin.

www.demauroy.net/radiologie_eos.htm. Coupe schématique du système EOS.

www.drivanrocha.com.br/website. Classification de King.

www.eos-imaging.com. EOS system.

www.spinecorbrace.biz/. SpineCor Dynamic Corrective Brace.

Annexe A - Tableaux et figures des paramètres morphologiques tridimensionnels du bassin

Tableau A-I. Paramètres morphologiques tridimensionnels du bassin, leurs repères anatomiques respectifs et la figure correspondante.

Paramètres	Repères anatomiques	Figure
1. PS-acétabulum (mm)	PS-7 et PS-8	<i>A.1</i>
2. PS-symphyse (mm)	PS-11 et PS-12	<i>A.1</i>
3. EIPS-PS (mm)	5-PS et 6-PS	<i>A.1</i>
4. EIPS-acétabulum (mm)	5-7 et 6-8	<i>A.2</i>
5. EIPS-symphyse (mm)	5-11 et 6-12	<i>A.2</i>
6. Acétabulum-symphyse (mm)	7-11 et 8-12.	<i>A.2</i>
7. Angle EIPS (α) (degrés)	5 et 6	<i>A.2</i>
8. Angle acétabulum (β) (degrés)	7 et 8	<i>A.2</i>
9. Angle symphyse (γ) (degrés)	11 et 12	<i>A.2</i>

Tableau A-II. Équations relatives au calcul des paramètres morphologiques tridimensionnels du bassin gauche. Les paramètres pour le côté droit sont calculés de façon similaire.

<i>Morphologie</i>	<i>Calcul</i>
1. PS-acétabulum (mm)	$\sqrt{[(x7 - xPS)^2 + (y7 - yPS)^2 + (zPS - z7)^2]}$
2. PS-symphyse (mm)	$\sqrt{[(xPS - x11)^2 + (y11 - yPS)^2 + (z11 - zPS)^2]}$
3. EIPS-PS (mm)	$\sqrt{[(x5 - xPS)^2 + (y5 - yPS)^2 + (z5 - zPS)^2]}$
4. EIPS-acétabulum (mm)	$\sqrt{[(x5 - x7)^2 + (y5 - y7)^2 + (z5 - z7)^2]}$
5. EIPS-symphyse (mm)	$\sqrt{[(x5 - x11)^2 + (y5 - y11)^2 + (z5 - z11)^2]}$
6. Acétabulum-symphyse (mm)	$\sqrt{[(x7 - x11)^2 + (y7 - y11)^2 + (z7 - z11)^2]}$
7. Angle EIPS (α) (degrés)	$a^2 + b^2 - c^2 / 2ab$ $a = \sqrt{[(x5 - x7)^2 + (y5 - y7)^2 + (z5 - z7)^2]}$ $b = \sqrt{[(x5 - x11)^2 + (y5 - y11)^2 + (z5 - z11)^2]}$ $c = \sqrt{[(x11 - x7)^2 + (y11 - y7)^2 + (z11 - z7)^2]}$
8. Angle acétabulum (β) (degrés)	$a^2 + c^2 - b^2 / 2ac$ $a = \sqrt{[(x11 - x7)^2 + (y11 - y7)^2 + (z11 - z7)^2]}$ $b = \sqrt{[(x5 - x7)^2 + (y5 - y7)^2 + (z5 - z7)^2]}$ $c = \sqrt{[(x5 - x11)^2 + (y5 - y11)^2 + (z5 - z11)^2]}$
9. Angle symphyse (γ) (degrés)	$b^2 + c^2 - a^2 / 2bc$ $a = \sqrt{[(x5 - x11)^2 + (y5 - y11)^2 + (z5 - z11)^2]}$ $b = \sqrt{[(x11 - x7)^2 + (y11 - y7)^2 + (z11 - z7)^2]}$ $c = \sqrt{[(x5 - x7)^2 + (y5 - y7)^2 + (z5 - z7)^2]}$

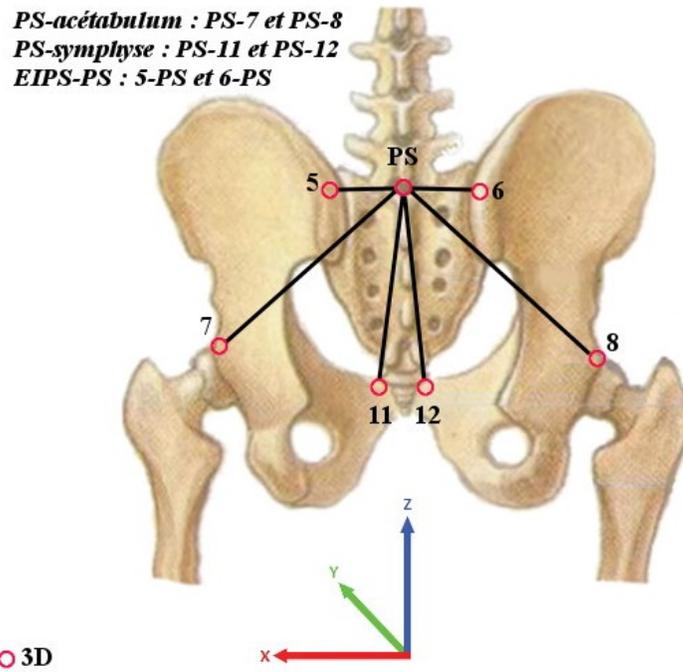


Figure A-1. Distances (mm) PS-acétabulum, PS-symphyse et EIPS-PS du bassin. Adaptée de <http://club.doctissimo.fr>. Image libre de droits.

EIPS-acétabulum : 5-7 et 6-8
EIPS-symphyse : 5-11 et 6-12
Acétabulum-symphyse : 7-11 et 8-12

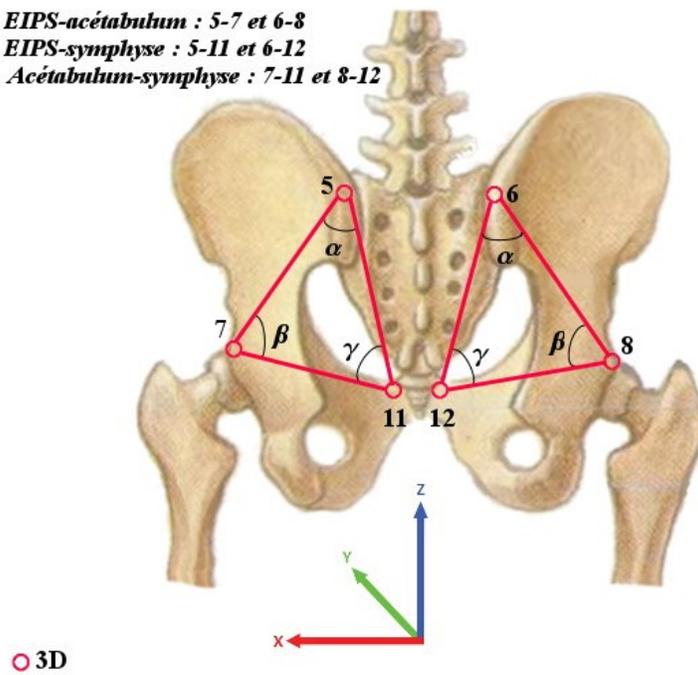


Figure A-2. Distances (mm) EIPS-acétabulum, EIPS-symphyse et acétabulum-symphyse du bassin. Angles du triangle du bassin EIPS (α), acétabulum (β) et symphyse (γ) en degrés.

Annexe B - Tableaux et figures des paramètres d'orientation bidimensionnels du bassin

Tableau B-I. Paramètres d'orientation bidimensionnels du bassin, leurs repères anatomiques respectifs et la figure correspondante.

Orientation	Nom	Points anatomiques	Figure
Rotation	1. PS-acétabulum horizontale (mm)	PS et 7; PS et 8	<i>B.1</i>
	2. Orientation des acétabulums (degrés)	7 et 8	<i>B.2</i>
	3. Orientation des EIPS (degrés)	5 et 6	<i>B.2</i>
Inclinaison latérale	4. Obliquité des crêtes (degrés)	13 et 14	<i>B.3</i>
	5. Obliquité des acétabulums (degrés)	7 et 8	<i>B.3</i>
	6. Obliquité des tubérosités ischiatiques (degrés)	15 et 16	<i>B.3</i>
Antéversion - rétroversion	7. Pente sacrée (α) (degrés)	Tangente sur PS	<i>B.4</i>
	8. Version pelvienne (β) (degrés)	9-10 (axe bicoxo-fémorale) et PS	<i>B.4</i>
	9. Incidence pelvienne (γ) (degrés)	Somme entre α et β	<i>B.4</i>

Tableau B-II. Équations relatives au calcul des paramètres d'orientation bidimensionnels du bassin.

Orientation	Nom	Calcul
Rotation	1. PS-acétabulum horizontale (mm)	Plan sagittal : Distance horizontale gauche : $(y7 - yPS)$ Distance horizontale droite : $(y8 - yPS)$
	2. Orientation des acétabulums (degrés)	Plan transverse : $TAN-I = \frac{(y7 - y8)}{(x7 - x8)}$
	3. Orientation des EIPS (degrés)	Plan transverse: $TAN-I = \frac{(y5 - y6)}{(x5 - x6)}$
Inclinaison latérale	4. Obliquité des crêtes (degrés)	Plan frontal : $TAN-I = \frac{(z13 - z14)}{(x13 - x14)}$
	5. Obliquité des acétabulums (degrés)	Plan frontal : $TAN-I = \frac{(z7 - z8)}{(x7 - x8)}$
	6. Obliquité des tubérosités ischiatiques (degrés)	Plan frontal : $TAN-I = \frac{(z15 - z16)}{(x15 - x16)}$
Antéversion rétroversion	7. Pente sacrée (α) (degrés)	Plan sagittal : $TAN-I = \frac{(z(3+4)/2 - z(1+2)/2)}{(y(3+4)/2 - y(3+4)/2)}$
	8. Version pelvienne (β) (degrés)	Plan sagittal : $TAN-I = \frac{(y(9+10)/2 - yPS)}{(zPS - z(9+10)/2)}$
	9. Incidence pelvienne (γ) (degrés)	Plan Sagittal : $ Pente sacrée + version pelvienne $

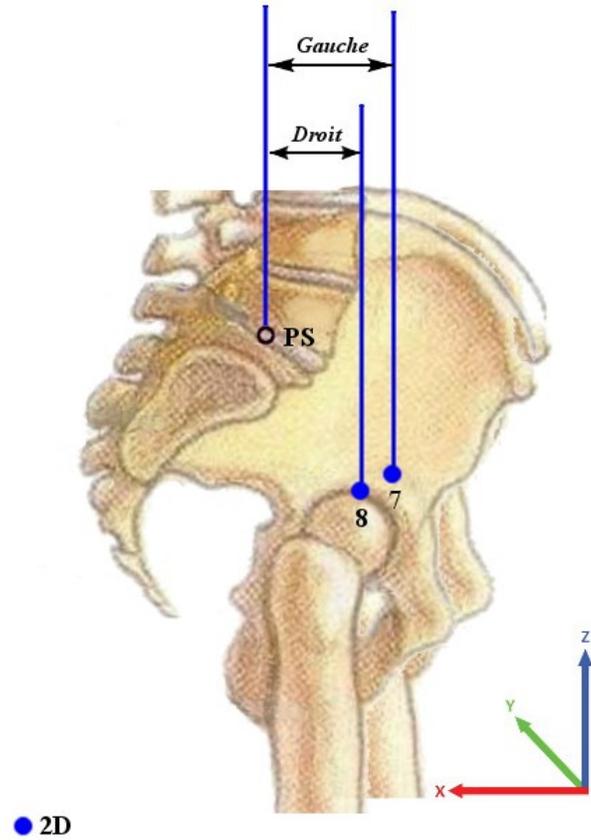
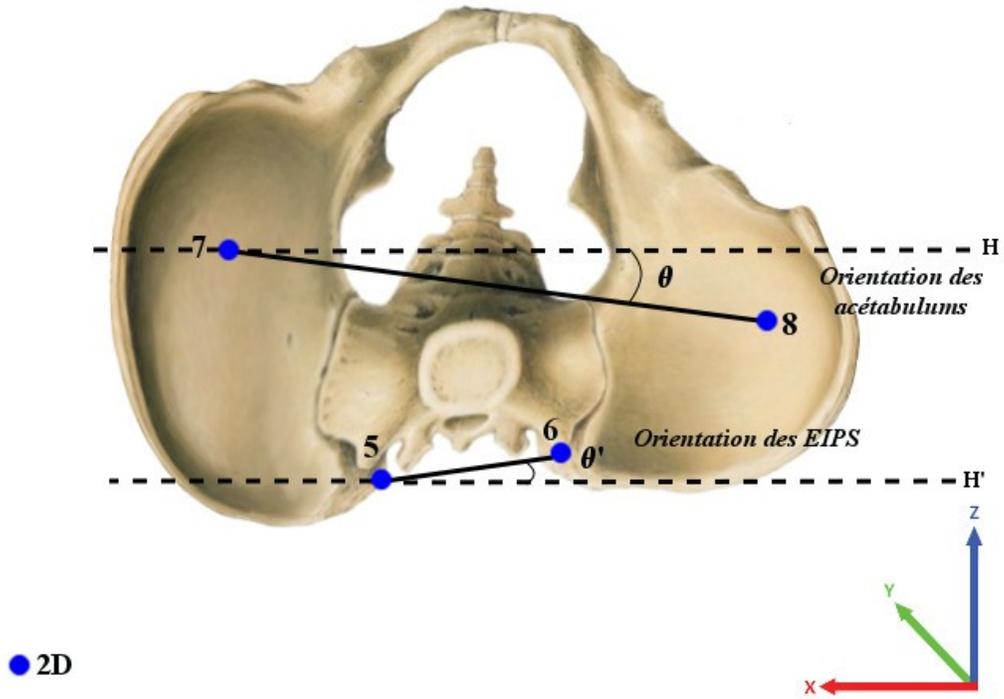
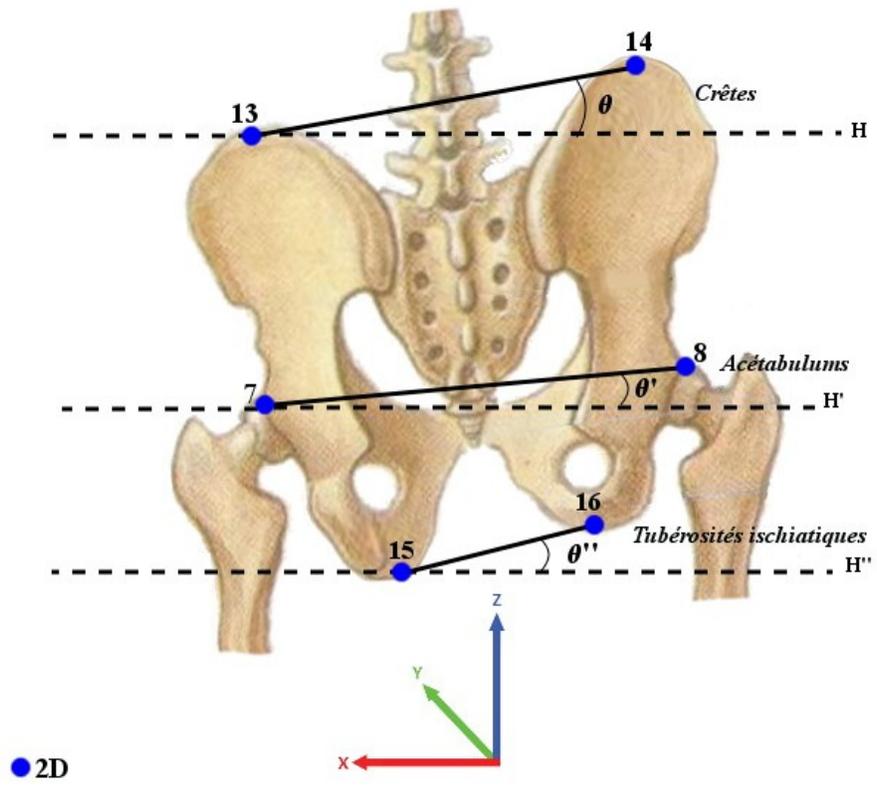


Figure B-1. Vue de droite de la distance (mm) PS-acétabulum horizontale du bassin dans le plan sagittal.



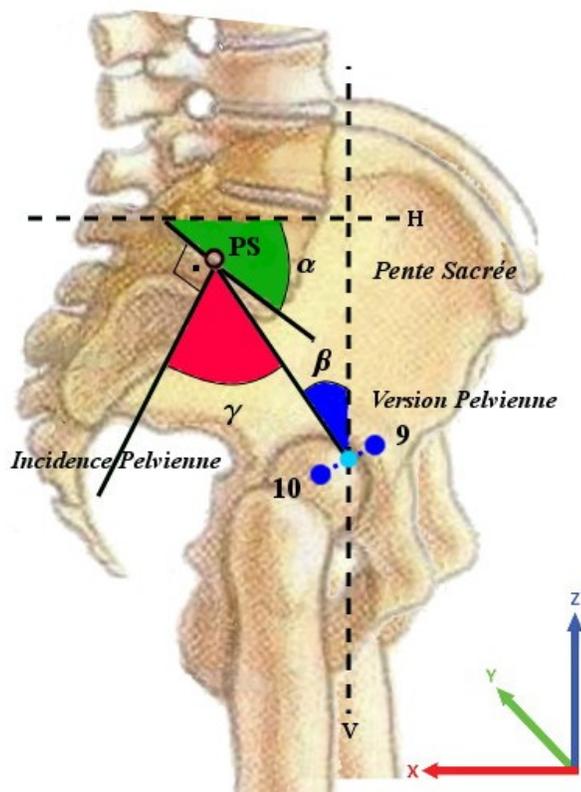
● 2D

Figure B-2. Vue horizontale du bassin. Orientation des acétabulums (θ) et orientation des EIPS (θ') par rapport à l'axe médio-latéral en degrés. Adaptée de www.corpshumain.ca/ Image libre de droits.



● 2D

Figure B-3. Vue postérieure du bassin. Obliquités en degrés des crêtes (θ), des acétabulums (θ') et tubérosités ischiatiques (θ'') par rapport à l'axe médio-latéral.



● 2D

Figure B-4. Vue de droite du bassin. Angle en degrés de l'incidence pelvienne (γ), pente sacrée (α) et version pelvienne (β).