

**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

Sagittal sacro-pelvic morphology and spino-pelvic balance in  
pediatric lumbosacral spondylolisthesis : development of a  
postural model

Morphologie sacro-pelvienne et équilibre spino-pelvien  
sagittal dans le spondylolisthésis lombosacré pédiatrique :  
développement d'un modèle postural

par

Jean-Marc Mac-Thiong

Département de Chirurgie

Faculté de Médecine

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de  
Ph.D. en Sciences biomédicales

Mars 2008

© Jean-Marc Mac-Thiong, 2008



Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

Sagittal sacro-pelvic morphology and spino-pelvic balance in  
pediatric lumbosacral spondylolisthesis : development of a  
postural model

Morphologie sacro-pelvienne et équilibre spino-pelvien  
sagittal dans le spondylolisthésis lombosacré pédiatrique :  
développement d'un modèle postural

présentée par :

Jean-Marc Mac-Thiong

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Alain Jodoin	Président-rapporteur
Hubert Labelle	Directeur de recherche
Jacques de Guise	Co-directeur de recherche
Benoit Poitras	Membre du jury
Jean Ouellet	Membre externe du jury

Thèse acceptée le : 17 janvier 2008

## Sommaire

Récemment, des études ont suggéré que l'évaluation de la morphologie sacro-pelvienne était importante dans le suivi et le traitement des patients atteints de spondylolisthésis. Par ailleurs, d'autres études sur des sujets normaux ont montré que la morphologie sacro-pelvienne influence significativement l'équilibre sagittal de tout le rachis. Or, les mécanismes qui régulent cet équilibre spino-pelvien restent en grande partie inconnus chez les patients atteints de spondylolisthésis. De plus en ce moment, la majorité des cliniciens évaluent uniquement la déformation locale au niveau lombosacré, sans vraiment se soucier de la morphologie sacro-pelvienne ni de l'équilibre sagittal du rachis tout entier. Ce projet consiste donc à étudier les liens entre la morphologie sacro-pelvienne et l'équilibre sagittal spino-pelvien dans le spondylolisthésis développemental de l'enfant, en vue de développer un modèle postural décrivant les relations entre les différents segments anatomiques spino-pelviens. Cette thèse vise ainsi à mieux comprendre la posture autant chez les sujets normaux que chez ceux atteints de spondylolisthésis pour qu'ultimement, les stratégies de traitement puissent être adaptées afin d'obtenir une posture équilibrée.

Après avoir vérifié la validité et la reproductibilité des paramètres utilisés dans cette étude, nous avons premièrement étudié la morphologie sacro-pelvienne et l'équilibre spino-pelvien durant la croissance. Cette première étude a permis de documenter les changements dans la morphologie sacro-pelvienne et dans l'équilibre spino-pelvien durant la croissance. En particulier, cette étude a démontré que l'incidence pelvienne tend à augmenter de façon linéaire et régulière durant toute la période de croissance après l'âge de quatre ans. Elle suggère également que les mécanismes de régulation de l'équilibre spino-pelvien restent constants durant la croissance.

Dans une autre étude, nous avons vérifié que les différents segments anatomiques adjacents spino-pelviens sont corrélés entre eux et que leur interdépendance permet le maintien d'une posture équilibrée chez les sujets sains. Cette étude a mené à

l'élaboration d'un modèle postural préliminaire qui a ouvert la voie à l'introduction d'un modèle postural global pouvant être appliqué non seulement aux sujets normaux, mais également aux patients atteints de spondylolisthésis.

Dans l'étude finale, nous présentons le modèle postural global, en plus d'étudier l'équilibre spino-pelvien global dans le spondylolisthésis. Parmi les résultats majeurs de cette étude, nous avons observé le rôle prépondérant du bassin dans le maintien de l'équilibre sagittal global. En effet, nous avons remarqué que le bassin compense pour l'anomalie rachidienne présente dans le spondylolisthésis dans le but de maintenir un équilibre spino-pelvien relativement constant. Par ailleurs, nous avons montré à partir du modèle postural développé que la posture des sujets atteints de spondylolisthésis de bas-grade s'apparente à celle des sujets sains, ce qui n'est pas le cas des sujets atteints de spondylolisthésis de haut-grade. Pour ces derniers, les mécanismes de compensation peuvent être épuisés, de sorte que le concept d'interdépendance et de corrélation entre les différents segments adjacents spino-pelviens n'est plus valide. Plus spécifiquement, les relations entre les différents segments anatomiques adjacents spino-pelviens disparaissent principalement pour les sujets présentant un bassin rétroversé avec un sacrum verticalisé.

Concrètement, cinq recommandations ressortent de cette thèse. Premièrement, une technique de mesure assistée par ordinateur est recommandée pour évaluer les paramètres d'équilibre spino-pelvien à cause de la reproductibilité supérieure et de l'économie de temps qu'elle procure. Deuxièmement, une évaluation adéquate de l'équilibre sagittal global doit se faire en fonction des têtes fémorales plutôt que de se limiter au sacrum, afin de tenir compte de l'influence significative du bassin dans le maintien d'une posture équilibrée. Troisièmement, il est important d'évaluer spécifiquement l'équilibre sacro-pelvien (par la version pelvienne et la pente sacrée) dans le spondylolisthésis car il renseigne sur la capacité du patient à utiliser adéquatement ses mécanismes de compensation afin d'obtenir une posture équilibrée. Quatrièmement, cette étude suggère qu'il faut considérer fortement la réduction

chirurgicale du spondylolisthésis de haut-grade dans les cas de bassin rétroversé afin de restaurer un équilibre spino-pelvien relativement normal. Finalement, le modèle proposé pourrait s'avérer un outil important dans la comparaison des différents traitements dans les études futures, particulièrement dans le traitement du spondylolisthésis de haut-grade.

## Table des matières

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 - REVUE DE LA LITTÉRATURE.....</b>	<b>3</b>
1.1 ÉPIDÉMIOLOGIE.....	3
1.2 CLASSIFICATION.....	4
1.3 ÉTIOLOGIE DU SPONDYLOLISTHÉSIS DÉVELOPPEMENTAL LOMBOSACRÉ.....	7
1.3.1 <i>Prédisposition héréditaire</i> .....	7
1.3.2 <i>Traumatisme et facteurs biomécaniques</i> .....	8
1.3.3 <i>Morphologie sacro-pelvienne et équilibre spino-pelvien</i> .....	9
1.3.3.1 Population normale.....	9
1.3.3.2 Spondylolisthésis.....	12
1.3.4 <i>Développement osseux et anomalie des plaques de croissance</i> .....	24
1.3.5 <i>Dysplasie osseuse lombosacrée et anomalie des tissus mous</i> .....	25
1.3.6 <i>Théorie unifiée de la pathogenèse du spondylolisthésis développemental</i> .....	27
1.4 PROGRESSION DU SPONDYLOLISTHÉSIS.....	29
1.5 PRÉSENTATION CLINIQUE.....	31
1.6 EXAMENS RADIOGRAPHIQUES DE BASE.....	33
1.6.1 <i>Évaluation de la sévérité du spondylolisthésis</i> .....	34
1.6.2 <i>Évaluation de la dysplasie à L5 et S1</i> .....	38
1.6.3 <i>Évaluation de la morphologie et de l'orientation sacro-pelvienne</i> .....	39
1.6.4 <i>Évaluation de la géométrie rachidienne</i> .....	41
1.6.5 <i>Évaluation de l'équilibre sagittal global</i> .....	43
1.7 EXAMENS RADIOLOGIQUES COMPLÉMENTAIRES.....	47
1.8 TRAITEMENT DU SPONDYLOLISTHÉSIS.....	48
1.8.1 <i>Traitement non-chirurgical</i> .....	48
1.8.2 <i>Traitement chirurgical</i> .....	49
1.8.2.1 Spondylolyse et spondylolisthésis de bas-grade.....	49
1.8.2.2 Spondylolisthésis de haut-grade.....	50
1.8.2.3 Spondyloptose.....	52
1.8.2.4 Effet de la chirurgie sur l'équilibre spino-pelvien.....	53
<b>CHAPITRE 2 - OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES.....</b>	<b>54</b>
2.1 RÉSUMÉ DE LA PROBLÉMATIQUE.....	54
2.2 OBJECTIF GLOBAL.....	55
2.3 HYPOTHÈSES.....	55
2.4 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....	56
2.5 PRÉSENTATION DES ARTICLES.....	58
<b>CHAPITRE 3 – VALIDATION DES PARAMÈTRES SPINO-PELVIENS.....</b>	<b>60</b>
<b>CHAPITRE 4 – ÉVALUATION DE LA MORPHOLOGIE SACRO-PELVienne ET DE L'ÉQUILIBRE SPINO-PELVien DURANT LA CROISSANCE.....</b>	<b>90</b>
<b>CHAPITRE 5 – ÉVALUATION DES RELATIONS ENTRE LES SEGMENTS ANATOMIQUES ADJACENTS SPINO-PELVIENS.....</b>	<b>97</b>
<b>CHAPITRE 6 – ÉLABORATION D'UN MODÈLE POSTURAL DE L'ÉQUILIBRE SPINO-PELVien POUR LE SPONDYLOLISTHÉSIS.....</b>	<b>106</b>
<b>CHAPITRE 7 – DISCUSSION.....</b>	<b>144</b>
7.1 HYPOTHÈSE ET OBJECTIF 1.....	144

7.2	HYPOTHÈSE ET OBJECTIF 2 .....	148
7.3	HYPOTHÈSE ET OBJECTIF 3 .....	150
7.4	HYPOTHÈSE ET OBJECTIF 4 .....	153
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>		<b>159</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>		<b>163</b>
<b>ANNEXE .....</b>		<b>185</b>



**Liste des tableaux**

Tableau I – Classification du spondylolisthésis par Marchetti and Bartolozzi ..... 6

## Liste des figures

Figure 1. L'incidence pelvienne (PI) est définie par l'angle entre la ligne joignant le centre des têtes fémorales et le milieu du plateau supérieur de S1 et la ligne perpendiculaire au plateau supérieur de S1. La version pelvienne (PT) est décrite par l'angle entre la verticale (VRL) et la ligne joignant le centre des têtes fémorales et le milieu du plateau et le milieu du plateau supérieur de S1. La pente sacrée (SS) représente l'angle entre l'horizontale (HRL) et le plateau supérieur de S1. Géométriquement, le PI est égal à la somme du PT et du SS. (O'Brien et al., Medtronic Sofamor Danek 2004).....	10
Figure 2. Schéma présentant les corrélations statistiquement significatives entre les paramètres des régions anatomiques adjacentes. Les corrélations modérées ( $0.2 \leq r < 0.4$ ) et fortes ( $r \geq 0.4$ ) sont montrées par les flèches en pointillés et pleines, respectivement. (Berthonnaud et al., J Spinal Disord Tech 2005).....	11
Figure 3. L'incidence pelvienne (PI) est typiquement plus grande chez les sujets avec spondylolisthésis. En plus, l'incidence pelvienne tend à augmenter de façon linéaire avec la sévérité du spondylolisthésis.....	13
Figure 4. Deux mécanismes possibles dans la pathogenèse du spondylolisthésis en fonction de la morphologie sacro-pelvienne. A) Une incidence pelvienne haute associée à une pente sacrée élevée peut contribuer à une augmentation des contraintes de cisaillement sur le disque L5-S1 et à une tension accrue sur la pars interarticularis de L5. B) Une incidence pelvienne basse associée à une pente sacrée faible prédispose à un coincement répété des éléments postérieurs de L5 entre L4 et S1 durant les mouvements d'extension. (Roussouly et al., Spine 2006).....	15
Figure 5. Chez le sujet normal (à gauche), la pars interarticularis n'est pas coincée par les facettes de L4 et S1. Par contre, dans le spondylolyse (à droite), les facettes de L4 et S1 interfèrent avec la pars interarticularis de L5 et l'affaiblissent jusqu'à ce que se produise le spondylolyse. (Nathan, J Bone Joint Surg 1959).....	15
Figure 6. Deux sous-groupes de patients avec spondylolisthésis de bas-grade identifiés par analyse de classes K-means. Chaque patient peut être classé avec la formule donnée à partir des valeurs mesurées de pente sacrée et de version pelvienne. (Labelle et al., Canadian Spine Society 2006).....	16
Figure 7. Deux sous-groupes de patients avec spondylolisthésis de haut-grade. (Hresko et al., Spine 2007).....	16
Figure 8. Deux sous-groupes de patients avec spondylolisthésis de haut-grade identifiés par analyse de classes K-means. Chaque patient peut être classé avec la formule donnée à partir des valeurs mesurées de pente sacrée et de version pelvienne. (Hresko et al., Spine 2007).....	17
Figure 9. Ce graphique démontre les similitudes entre l'orientation pelvienne des patients avec spondylolisthésis de haut-grade de type haut SS/bas PT et les sujets normaux avec incidence pelvienne élevée. (Hresko et al., Spine 2007).....	18
Figure 10. Mesure de l'angle de la table sacrée entre le plateau supérieur et le bord postérieur de S1.	19
Figure 11. Comparaison de l'angle de la table sacrée entre les sujets normaux et les sujets avec spondylolisthésis. Des différences significatives sont retrouvées entre chaque groupe. (Wang et al., soumis à Spine, 2007).....	20
Figure 12. Déséquilibre postural antérieur chez un patient avec spondylolisthésis de haut-grade. ....	22
Figure 13. Mesure de la cunéiformisation de la vertèbre L5 à l'aide de l'index lombaire.....	26
Figure 14. Théorie unifiée de la pathogenèse du spondylolisthésis développemental.....	28
Figure 15. Mesure de la sévérité du spondylolisthésis à l'aide de la technique de Meyerding. (Meyerding, Surg Gynecol Obstet 1932).....	35
Figure 16. Mesure de la sévérité du spondylolisthésis par le pourcentage de glissement par rapport au diamètre antéro-postérieur du plateau supérieur de S1. (Taillard, Acta Orthop Scand 1954).....	35
Figure 17. Mesure de la cyphose lombosacrée avec A) l'angle de glissement ("slip angle") et B) l'angle lombosacrée de Dubouset ("Dubouset lumbosacral angle"). ....	36
Figure 18. Mesure de la cyphose lombosacrée avec A) l'angle lombosacrée SDSG ("SDSG lumbosacral angle") et B) l'angle lombosacrée dysplasique SDSG ("SDSG dysplastic lumbosacral angle").	37

Figure 19. Mesure de la surface des apophyses transverses à L5 sur la vue de Ferguson. (Molinari et al., Spine 1999).....	38
Figure 20. Technique de mesure du dôme sacré proposée par le SDSG. (O'Brien et al., Medtronic Sofamor Danek 2004).....	39
Figure 21. Mesure de l'incidence de L5 entre la perpendiculaire du plateau supérieur de L5 et la ligne joignant le centre des têtes fémorales et le milieu du plateau supérieur de L5. (O'Brien et al., Medtronic Sofamor Danek 2004) .....	40
Figure 22. Mesure de l'équilibre sagittal global à partir de C7 par rapport au coin postéro-supérieur du sacrum. (O'Brien et al., Medtronic Sofamor Danek 2004).....	44
Figure 23. Mesure de l'équilibre sagittal global par rapport au sacrum par la technique de l'axe sagittal vertical. (Gelb et al., Spine 1995).....	45
Figure 24. Mesure de l'équilibre sagittal global par rapport aux têtes fémorales à l'aide de la distance entre C7 et le milieu de la ligne joignant le centre des deux têtes fémorales (HA). (Jackson et al., Spine 1998).....	45
Figure 25. Mesure de l'équilibre sagittal global à l'aide de l'angle entre l'horizontale et la ligne joignant le centre du corps vertébral de T1 avec le centre du plateau supérieur de S1. (Roussouly et al., Spine 2006).....	46

**Liste des abréviations**

AP : antéro-postérieur

CG : centre de gravité

IRM : imagerie par résonance magnétique

LAT : latéral

PA : postéro-antérieur

PI : incidence pelvienne

PT : version pelvienne

SS : pente sacrée

SDSG : Spinal Deformity Study Group

SRS: Scoliosis Research Society

## Remerciements

Premièrement, je voudrais remercier mes co-directeurs de recherche, les Drs Hubert Labelle et Jacques de Guise pour la confiance qu'ils m'ont témoignée tout au long de ce doctorat. Ils ont contribué de façon inestimable à ma formation scientifique en vue d'une carrière de clinicien-chercheur.

Je tiens également à remercier le personnel du Laboratoire de recherche en Imagerie et Orthopédie affilié à l'École de Technologie Supérieure et en particulier Dominic Branchaud pour la conception du logiciel pour la mesure des paramètres. Je tiens également à remercier les personnes ayant contribué à la réalisation des articles ainsi que les membres du Spinal Deformity Study Group. Également, j'aimerais remercier les Drs Parent, Wang, Tanguay, Glavas et Pinel-Giroux, sans oublier Alexis Duval et Julie Joncas qui m'ont grandement aidé dans l'élaboration de la base de données radiologiques.

Ce travail de recherche a été financé par les Fonds de Recherche en Santé du Québec, par le programme MENTOR des Instituts de Recherche en Santé du Canada et par les Fonds de Recherche et d'Éducation en Orthopédie de Montréal.

Finalement et surtout, j'aimerais remercier chaleureusement Marie-Ève Fortin pour la compréhension, le support et la patience dont elle m'a fait preuve durant ce long cheminement.

## Introduction

Un spondylolyse implique un bris dans la pars interarticularis d'une vertèbre. Il peut être isolé ou associé à un spondylolisthésis. Un spondylolisthésis représente une translation d'une vertèbre par rapport à une vertèbre adjacente. Cette anomalie a été décrite originalement par Herbiniaux,<sup>82</sup> un obstétricien belge, en 1782. Un spondyloptose, la forme la plus sévère de spondylolisthésis, consiste en une translation complète d'une vertèbre par rapport à la vertèbre adjacente, faisant en sorte qu'il n'y a plus aucun lien entre le plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente et le plateau supérieur de la vertèbre sous-jacente. L'origine exacte du spondylolisthésis demeure inconnue, mais elle est présumée multifactorielle et implique des phénomènes héréditaire, traumatique, développemental, morphologique et biochimique.<sup>123</sup> Le plus souvent, les patients se présentent pour une lombalgie et à l'occasion, le spondylolisthésis peut progresser et mener à une atteinte neurologique de type radiculaire ou à un syndrome de queue de cheval.

Dans la majorité des cas, le spondylolisthésis est léger et un traitement conservateur est efficace. Pour les cas réfractaires au traitement conservateur ou pour les cas de spondylolisthésis sévère, une chirurgie peut devenir nécessaire. Près de 200 nouveaux patients avec spondylolisthésis sont vus chaque année à l'Hôpital Sainte-Justine et environ une vingtaine de ces patients requiert un traitement chirurgical.

Récemment, certaines études ont suggéré que l'évaluation de la morphologie sacro-pelvienne était importante dans le suivi et le traitement des patients atteints de spondylolisthésis.<sup>36,48,73,97,109,135,173,233</sup> Par ailleurs, d'autres études sur des sujets normaux ont montré que la morphologie sacro-pelvienne influence significativement l'équilibre sagittal de tout le rachis.<sup>13,96,116,135,173,227</sup> Or, les mécanismes qui régulent cet équilibre spino-pelvien restent en grande partie inconnus chez les patients atteints de spondylolisthésis. De plus en ce moment, la majorité des cliniciens évaluent uniquement la déformation locale au niveau lombosacré, sans vraiment se soucier de

la morphologie sacro-pelvienne ni de l'équilibre sagittal du rachis tout entier. Compte tenu qu'une posture équilibrée minimise les dépenses énergétiques et assure une meilleure biomécanique,<sup>13,42,49</sup> il est évident qu'une meilleure compréhension de l'équilibre sagittal spino-pelvien autant chez les sujets normaux que dans le spondylolisthesis nous permettrait dans le futur de mieux définir nos stratégies de traitement afin d'obtenir une posture équilibrée.

Ce projet consiste donc à étudier les liens entre la morphologie sacro-pelvienne et l'équilibre sagittal spino-pelvien dans le spondylolisthesis développemental de l'enfant, en vue de développer un modèle postural décrivant les relations entre les différents segments anatomiques spino-pelviens. Cette thèse vise à mieux comprendre la posture autant chez les sujets normaux que chez ceux atteints de spondylolisthesis pour qu'ultimement, les stratégies de traitement puissent être adaptées afin d'obtenir une posture équilibrée.

Cette thèse de doctorat comprend sept chapitres. Le premier comprend une revue de la littérature, alors que les hypothèses de travail et les objectifs sont énoncés au Chapitre 2. Le corps du mémoire contient les développements et résultats présentés sous forme d'articles. Le Chapitre 3 contient trois articles qui évaluent la reproductibilité des paramètres utilisés dans cette étude pour caractériser les différents segments spino-pelviens. Le Chapitre 4 évalue les changements dans les paramètres spino-pelviens observés durant la croissance. Le Chapitre 5 propose une ébauche de modèle postural obtenue à partir de l'analyse de l'équilibre spino-pelvien de sujets normaux. Le Chapitre 6 implémente le modèle initial et propose un modèle postural spécifiquement adapté au spondylolisthesis basé sur l'évaluation de l'équilibre sagittal global et des relations entre la géométrie des segments spino-pelviens adjacents. Finalement, une discussion de l'ensemble des résultats se trouve au Chapitre 7. Dans ce dernier chapitre, plusieurs recommandations sont également émises en vue de permettre la poursuite de ces travaux et d'en arriver ultimement à un algorithme de traitement optimal du spondylolisthesis.

# Chapitre 1 - Revue de la littérature

## 1.1 Épidémiologie

Le spondylolisthesis isthmique (avec spondylolyse) chez les enfants se retrouve principalement au niveau L5-S1 (87%) et plus rarement aux niveaux L4-L5 (10%) et L3-L4 (3%).<sup>51,182</sup> Aucun cas de spondylolyse à la naissance n'a été rapporté malgré que plusieurs auteurs aient tenté d'en trouver l'existence.<sup>58,61,155,182,213,221,235</sup> Dans une de ces études, Rowe et Roche<sup>182</sup> ont disséqué les rachis de 50 enfants mort-nés et n'ont trouvé aucun cas de spondylolyse. Dans une autre étude, Fredrickson et al.<sup>58</sup> ont révisé les radiographies en décubitus dorsal de 500 nouveaux-nés sans retrouver de cas de spondylolisthesis. Les cas les plus précoces de spondylolyse ont été découverts chez des enfants âgés de 6 semaines à 10 mois.<sup>20,213,221</sup> Par ailleurs, le cas le plus précoce de spondylolisthesis isthmique a été rapporté chez un enfant âgé de 15 semaines.<sup>20</sup>

Dans une étude prospective menée sur 500 enfants de 1<sup>ère</sup> année, Fredrickson et al.<sup>58</sup> ont montré une prévalence de spondylolyse de 4.4% à 6 ans, 5.2% à 12 ans, 5.6% à 14 ans et 6% à l'âge adulte. Les cas de spondylolyse sont plus communs chez les patients présentant une lombalgie.<sup>236</sup> Chez les sujets atteints de spondylolyse en jeune âge, un spondylolisthesis s'est développé subséquemment chez 68% des enfants à 6 ans et chez 74% chez les enfants à 18 ans.<sup>58</sup> De tous les sujets recrutés initialement dans l'étude de Fredrickson et al.,<sup>58</sup> Beutler et al.<sup>15</sup> ont évalué les 30 sujets présentant un spondylolyse (8 unilatéral, 22 bilatéral) et les ont suivis durant 45 ans. Les sujets avec un spondylolyse unilatéral n'ont pas développé de spondylolisthesis, contrairement à ceux atteints d'un spondylolyse bilatéral. Pour ces derniers, le taux de progression avait tendance à diminuer graduellement avec l'âge. La progression du spondylolisthesis n'était pas reliée à l'incidence de lombalgie, malgré la relation significative entre la sévérité du spondylolisthesis (degré de glissement) et la dégénérescence discale L5-S1. Globalement, la qualité de vie évaluée à l'aide des



scores SF-36 pour les sujets avec spondylolyse étaient (degré de glissement maximal de 38%) similaires à celle retrouvée dans la population générale au même âge.

La prévalence du spondylolyse est variable par rapport au sexe et à la race. Aux États-Unis, Rowe et Roche<sup>182</sup> ont observé une prévalence de 6.4% chez les hommes blancs, 2.3% chez les femmes blanches, 2.8% chez les hommes noirs et 1.1% chez les femmes noires. Le spondylolyse est beaucoup plus souvent retrouvé chez les Amérindiens et Eskimos.<sup>102,140,200,209,219</sup>

## **1.2 Classification**

Les deux classifications les plus utilisées pour le spondylolisthésis sont celles proposées par Wiltse et al.<sup>234</sup> et par Marchetti and Bartolozzi.<sup>133</sup> Wiltse et al.<sup>234</sup> ont en fait raffiné la classification décrite originalement par Newman et Stone<sup>155</sup> en classifiant le spondylolisthésis en cinq types. Le type I (dysplasique) implique une dysplasie congénitale du sacrum ou de l'arc postérieur de L5. Les patients avec un spina bifida de S1 ou de L5 sont compris dans ce groupe. Une lyse ou une élongation de la pars interarticularis peut tout de même se produire, habituellement plus tard. Dans le type II (isthmique), la lésion de base est une anomalie de la pars interarticularis qui se traduit par une lyse (type IIA), une élongation (type IIB) ou une fracture aiguë (type IIC). Les types IIA et IIB ont la même origine puisqu'elles sont toutes deux secondaires à une fracture de stress (fatigue) de la pars interarticularis. Par contre, dans le type IIB, des microfractures de stress répétées de la pars guérissent dans une position allongée. Lorsque des changements dysplasiques se produisent au niveau des vertèbres L5 ou S1, les types IIA et IIB sont difficiles à distinguer du type I avec une anomalie secondaire de la pars. Cependant, contrairement au type I, les changements dysplasiques retrouvés dans les types IIA et IIB sont secondaires. L'anomalie de la pars retrouvée dans les types IIA et IIB est présumément liée à des facteurs biomécaniques (particulièrement les mouvements répétitifs de flexion et extension du rachis) et est associée à une prédisposition héréditaire. À l'opposé pour le type I, l'anomalie de la pars est principalement secondaire au développement

congénital anormal de la pars interarticularis et/ou au stress anormal présent à la jonction lombosacrée secondairement à la dysplasie primaire lombosacrée. Le spondylolisthesis de type III (dégénératif) est secondaire à une arthrose dégénérative. Le type IV (traumatique) résulte d'une fracture aiguë des éléments postérieurs autres que la pars interarticularis. Finalement, le type V (pathologique) est associé à une destruction des éléments postérieurs due à une pathologie osseuse locale ou systémique.

Marchetti and Bartolozzi<sup>133</sup> (Tableau I) ont basé leur classification du spondylolisthesis en séparant les formes développementale et acquise, avec l'intention de proposer une classification en accord avec l'étiologie, le pronostic et le traitement du spondylolisthesis. Contrairement à la classification de Wiltse et al.,<sup>234</sup> ils ont décidé de ne pas classifier le spondylolisthesis isthmique dans une classe indépendante. Dans la classification de Marchetti and Bartolozzi,<sup>133</sup> les types I, IIA et IIB de la classification de Wiltse et al.<sup>234</sup> sont tous inclus dans le groupe de spondylolisthesis développemental. Le spondylolisthesis développemental est sous-divisé en deux types majeurs (bas- et haut-dysplasique), selon la sévérité des changements dysplasiques osseux présents à L5 et S1, et le risque de progression du spondylolisthesis. Marchetti and Bartolozzi<sup>133</sup> ont défini qualitativement le type haut-dysplasique par une cyphose lombosacrée significative, une vertèbre L5 trapézoïdale, une dysplasie des éléments postérieurs de L5 et S1, ainsi qu'une anomalie du plateau supérieur de S1. Le type bas-dysplasique est défini qualitativement comme étant associé à un profil lombosacré relativement normal, une vertèbre L5 rectangulaire, une préservation du plateau supérieur de S1, de même que l'absence de verticalisation du sacrum ou d'une hyperlordose. Même s'ils ont introduit le concept de spondylolisthesis bas- et haut-dysplasique, ils n'ont fourni aucun critère quantitatif pour différencier ces deux types. Le spondylolisthesis développemental est également différencié selon l'état de la pars articularis: avec spondylolyse ou avec pars allongée. Le spondylolisthesis acquis est dû soit à un trauma, à une chirurgie, à une pathologie ou à un processus dégénératif. La forme traumatique est due à une fracture aiguë ou

de stress. La forme traumatique secondaire à une fracture de stress est typique chez les jeunes athlètes<sup>25,55,83,92,120,138,206,211</sup> et peut, en théorie, être différenciée de la forme développementale avec spondylolyse par l'absence de changements dysplasiques impliquant l'os ou les tissus mous. Par contre, la distinction entre la forme traumatique impliquant la pars interarticularis et la forme développementale bas-dysplasique avec spondylolyse reste difficile voire impossible sans radiographies démontrant l'absence d'un défaut isthmique avant le(s) traumatisme(s).

Tableau I – Classification du spondylolisthésis par Marchetti and Bartolozzi

Développemental	Acquis
Haut-dysplasique	Traumatique
Avec spondylolyse	Fracture aiguë
Avec pars allongée	Fracture de stress
Bas-dysplasique	Post-opératoire
Avec spondylolyse	Par chirurgie directe
Avec pars allongée	Par chirurgie indirecte
	Pathologique
	Locale
	Systémique
	Dégénérative
	Primaire
	Secondaire

Récemment, Herman et Pizzutillo<sup>84</sup> ont combiné les éléments des classifications de Wiltse et al.<sup>234</sup> et de Marchetti and Bartolozzi,<sup>133</sup> et ont proposé une nouvelle classification se concentrant principalement sur le traitement non-chirurgical du spondylolisthésis. À l'opposé de la classification de Marchetti and Bartolozzi,<sup>133</sup> le groupe de spondylolisthésis développemental n'inclut pas les patients avec une pars allongée. De plus, ils n'ont pas classifié le spondylolisthésis développemental en fonction du degré de dysplasie. La contribution majeure de cette classification est de

clarifier les différences entre le spondylolisthésis traumatique et le spondylolisthésis développemental isthmique, et de guider le traitement non-chirurgical.

Pour terminer, mentionnons qu'aucune de ces classifications ne tient compte de la morphologie ni de l'équilibre sagittal spino-pelvien, alors que plusieurs études récentes suggèrent leur importance dans la pathogenèse et le traitement du spondylolisthésis.<sup>36,48,73,97,109,110,135,173,233</sup>

### **1.3 Étiologie du spondylolisthésis développemental lombosacré**

Divers facteurs héréditaires, traumatiques, développementaux, morphologiques et biochimiques ont déjà été suggérés dans la pathogenèse du spondylolisthésis chez l'enfant.<sup>123</sup> La vraie forme congénitale du spondylolisthésis (à ne pas confondre avec la cyphose lombosacrée congénitale) est très rare, alors qu'aucun cas de spondylolyse congénital n'a été rapporté chez le nouveau-né.<sup>58,155,213,221,235</sup> Cependant, une dysplasie ou un développement anormal des facettes lombosacrées peut se retrouver chez le nouveau-né.

#### **1.3.1 Prédisposition héréditaire**

Initialement, Wiltse<sup>237</sup> pensait que le spondylolisthésis était associé à une transmission autosomale récessive avec une expression variable. De nos jours, la majorité des auteurs<sup>79,243</sup> suggèrent plutôt une transmission autosomale dominante avec pénétrance incomplète. Il y a effectivement une augmentation de la prévalence de spondylolisthésis chez les membres immédiats de la famille des enfants atteints, allant de 19% à 69% selon les études.<sup>1,58,61,114,221,243</sup> Un spina bifida est également plus commun chez les membres de la famille immédiate des patients atteints de spondylolyse et de spondylolisthésis.<sup>1,114,243</sup> Tel que mentionné précédemment, un spondylolyse est également plus prévalent chez certains groupes ethniques.<sup>102,140,200,209,219</sup>

### 1.3.2 Traumatisme et facteurs biomécaniques

Le spondylolyse et le spondylolisthésis ont été observés uniquement chez les humains<sup>237</sup> et il n'existe pas de cas rapporté chez les sujets non ambulants.<sup>178</sup> Ces notions supportent l'importance des facteurs biomécaniques et de la position debout dans la pathogenèse du spondylolyse et du spondylolisthésis. Plusieurs auteurs<sup>54,89,112,159,162,238</sup> suggèrent que le spondylolyse est causé par une fracture de stress secondairement à des micro-traumatismes répétitifs. Dans le cas d'un spondylolisthésis sans spondylolyse, une élongation de la pars interarticularis peut être due à des micro-fractures répétées avec guérison subséquente de la fracture pendant que le complexe discal L5-S1 dégénère, permettant ainsi une translation antérieure de L5 par rapport à S1.<sup>71</sup>

Biomécaniquement, la pars interarticularis est la région la plus faible de l'arc vertébral postérieur.<sup>54,89,112</sup> Après avoir examiné 10 fœtus humains âgés de 8 à 20 semaines, Sagi et al.<sup>184</sup> ont suggéré que la présence d'un centre d'ossification fœtal originant de la région de la pars interarticularis dans les vertèbres lombaires peut mener à une ossification inhomogène de la pars et donc à la formation d'une région associée à une forte concentration de contraintes. Une pars interarticularis anatomiquement plus étroite pourrait également favoriser le développement d'un spondylolyse.<sup>37</sup> La pars interarticularis est soumise à une importante contrainte en cisaillement, en compression et en tension durant les mouvements de flexion et extension.<sup>46,54</sup> Par conséquent, il existe une prévalence accrue de spondylolyse et de spondylolisthésis chez certains athlètes évoluant dans des sports qui impliquent des mouvements répétitifs de flexion et extension, tels que la gymnastique,<sup>92,120</sup> l'haltérophilie<sup>25</sup> et le football américain.<sup>55,138</sup>

Le poids corporel transmis à la jonction lombosacrée est supporté par le disque L5-S1, les facettes L5-S1, les ligaments antérieurs et postérieurs, de même que les muscles, particulièrement le sacrospinalis et le multifidus. Dans des conditions normales, les facettes supportent la majorité des contraintes de cisaillement, alors que

le disque L5-S1, supporte la majorité de la compression à la jonction lombosacrée.<sup>71</sup> Dans le spondylolyse, les facettes sont non fonctionnelles et la majorité des contraintes en cisaillement sont transférées au disque L5-S1,<sup>89</sup> ce qui prédispose à la dégénérescence discale et au spondylolisthésis par la suite. Dans le cas d'un spondylolisthésis isthmique, la translation antérieure des colonnes antérieure et moyenne de la vertèbre L5 tend à distraire le déficit de la pars interarticularis puisque la colonne postérieure de L5 reste solidement attachée aux ligaments postérieurs et aux muscles érecteurs du rachis. Avec la progression du spondylolisthésis, le complexe discal s'affaiblit de plus en plus et les contraintes augmentent à la jonction lombosacrée.<sup>152</sup>

### **1.3.3 Morphologie sacro-pelvienne et équilibre spino-pelvien**

#### ***1.3.3.1 Population normale***

La morphologie et l'orientation sacro-pelviennes influencent la géométrie du rachis lombaire et par conséquent, les contraintes à la jonction lombosacrée. Le Spinal Deformity Study Group (SDSG)<sup>158</sup> recommande l'utilisation de l'incidence pelvienne (PI), de la version pelvienne (PT) et de la pente sacrée (SS) afin de caractériser la morphologie et l'orientation du bassin (Figure 1). L'incidence pelvienne<sup>49</sup> est un véritable paramètre morphologique spécifique à chaque individu qui n'est pas affecté par l'orientation du bassin, alors que la pente sacrée et la version pelvienne sont des paramètres positionnels qui dépendent de l'orientation du bassin. L'incidence pelvienne reste relativement constante durant l'âge adulte.<sup>131,135</sup> Chez les enfants normaux, la morphologie sacro-pelvienne reste peu documentée. Hanson et al.<sup>73</sup> ont évalué l'incidence pelvienne chez 20 contrôles pédiatriques mais n'ont pas pu analyser l'évolution avec l'âge. Deux études<sup>42,132</sup> ont investigué l'influence de l'âge sur l'incidence pelvienne pour les sujets normaux. Descamps et al.<sup>42</sup> suggèrent que l'incidence pelvienne reste relativement stable avant dix ans avant d'augmenter de façon significative durant l'adolescence pour atteindre sa valeur maximale à l'âge adulte. Malheureusement, ils n'ont pas évalué spécifiquement le lien entre l'âge et l'incidence pelvienne avec des études de corrélation. Au lieu, ils ont comparé

l'incidence pelvienne de différents groupes de patients groupés de façon arbitraire dans différents groupes d'âge. Il est donc impossible dans ce contexte de conclure de façon précise sur l'évolution de l'incidence pelvienne en fonction de l'âge. Mangione *et al.*<sup>132</sup> ont quant à eux montré que l'incidence pelvienne tendait à augmenter de façon linéaire durant l'enfance après l'acquisition de la marche. Par contre, ils n'ont pas documenté l'influence de l'âge sur l'incidence pelvienne durant l'adolescence, moment où l'augmentation de l'incidence pelvienne semble marquée.<sup>42</sup>

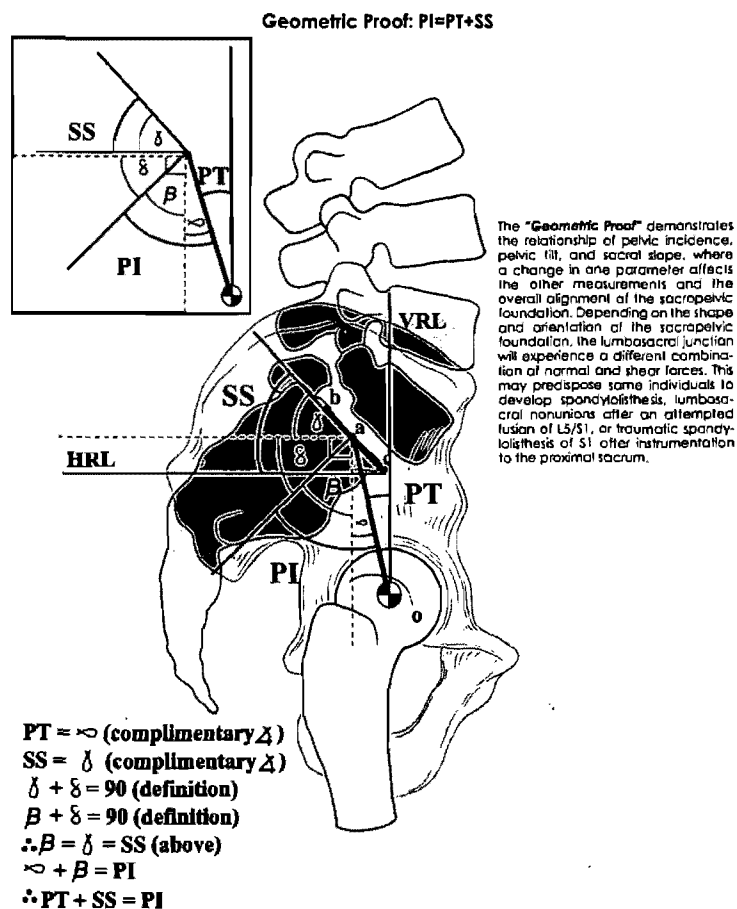


Figure 1. L'incidence pelvienne (PI) est définie par l'angle entre la ligne joignant le centre des têtes fémorales et le milieu du plateau supérieur de S1 et la ligne perpendiculaire au plateau supérieur de S1. La version pelvienne (PT) est décrite par l'angle entre la verticale (VRL) et la ligne joignant le centre des têtes fémorales et le milieu du plateau et le milieu du plateau supérieur de S1. La pente sacrée (SS) représente l'angle entre l'horizontale (HRL) et le plateau supérieur de S1. Géométriquement, le PI est égal à la somme du PT et du SS. (O'Brien *et al.*, Medtronic Sofamor Danek 2004)

Plusieurs études chez les adultes normaux ont montré que la morphologie sacro-pelvienne module significativement la géométrie du rachis lombaire.<sup>13,96,116,135,173,227</sup>

Cette interdépendance entre le rachis et le bassin résulterait en une posture stable et compensée, présumément pour minimiser la dépense énergétique.<sup>13,42,49</sup> Récemment, Berthonnaud et al.<sup>13</sup> ont proposé un concept d'interdépendance des segments anatomiques allant de la tête au bassin, dans lequel la forme et l'orientation de tous les segments anatomiques sont intimement liées et influencent les segments adjacents afin de maintenir une posture stable avec une dépense énergétique minimale (Figure 2). Conformément à cela, une modification dans la forme ou l'orientation d'un segment anatomique changera la forme et/ou l'orientation du segment adjacent du rachis ou du bassin. Ils n'ont toutefois pas analysé le lien avec l'équilibre sagittal global dans leur étude.

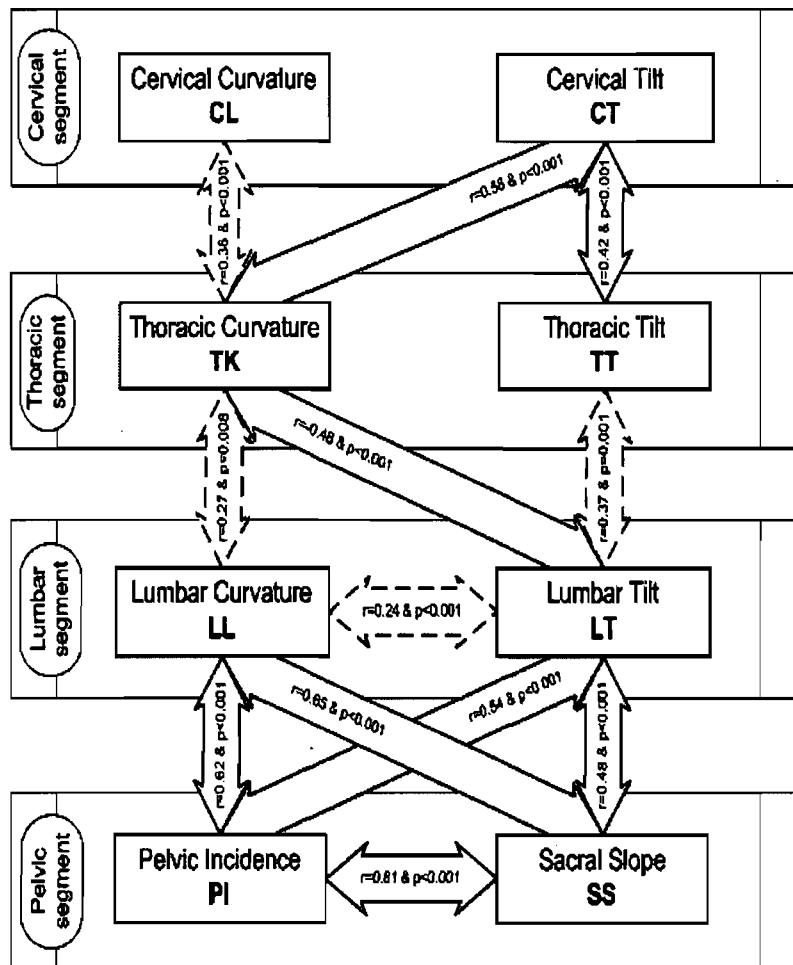


Figure 2. Schéma présentant les corrélations statistiquement significatives entre les paramètres des régions anatomiques adjacentes. Les corrélations modérées ( $0.2 \leq r < 0.4$ ) et fortes ( $r \geq 0.4$ ) sont montrées par les flèches en pointillés et pleines, respectivement. (Berthonnaud et al., J Spinal Disord Tech 2005)



Boulay et al.<sup>22</sup> ont par la suite confirmé les résultats de Berthonnaud et al.<sup>13</sup> sur le concept d'interdépendance du rachis thoracique au bassin. Cependant, il n'existe aucun modèle de la sorte chez la population pédiatrique normale en ce moment, ni pour le spondylolisthésis.

Pour mesurer l'équilibre sagittal global dans le plan sagittal, différentes techniques ont été proposées (c.f. section 1.6.5), le plus souvent à partir de radiographies latérales de tout le rachis et du bassin. Dans une vaste étude sur 300 adultes normaux, Vialle et al.<sup>227</sup> n'ont pas trouvé de corrélation importante entre les différents paramètres spino-pelviens et l'équilibre sagittal global mesuré par l'orientation de la ligne joignant T1 et S1 par rapport à la verticale. À l'opposé, Roussouly et al.<sup>181</sup> ont détecté une relation significative entre la lordose lombaire et l'équilibre sagittal global mesuré entre la ligne joignant T1 à S1 par rapport à la horizontale. Cependant, ils n'ont pas observé d'association entre l'équilibre sagittal global et les paramètres suivants: incidence pelvienne, pente sacrée, version pelvienne et cyphose thoracique.

Certains auteurs<sup>52,181</sup> critiquent ces techniques de mesure radiologiques car la position de la verticale à partir de C7 (ou T1) ne correspond pas nécessairement à la position du centre de gravité (CG) du corps qui ne varie que très peu dans la population normale ou atteinte de pathologie rachidienne.<sup>64</sup> Or, le maintien du CG dans une position adéquate permet de maintenir son équilibre tout en minimisant les dépenses énergétiques. Cependant, même si la distance antéro-postérieure (AP) entre C7 et le sacrum diffère de la distance AP entre le CG et le sacrum, ces distances sont corrélées chez les adultes normaux.<sup>52,181</sup> Malheureusement dans ces deux études, les auteurs n'ont pas indiqué s'il existait une relation significative entre la distance AP C7/têtes fémorales et la distance AP CG/têtes fémorales, même si il est connu que le CG est plus près des têtes fémorales que du sacrum.<sup>52</sup>

### ***1.3.3.2 Spondylolisthésis***

Par ailleurs, plusieurs études<sup>36,48,73,97,109,135,173,233</sup> ont démontré que la morphologie sacro-pelvienne diffère entre les sujets normaux et ceux atteints de spondylolisthésis.

Cette différence tend également à augmenter de façon linéaire avec le degré de sévérité du glissement.<sup>73,97,109</sup> Une étude réalisée par notre groupe de recherche a démontré que l'incidence pelvienne était significativement plus grande chez les patients atteints de spondylolisthésis développemental ( $71.6 \pm 7.7^\circ$ ) comparativement aux sujets contrôles ( $51.8 \pm 5.3^\circ$ ), et que l'incidence pelvienne était significativement corrélée à la pente sacrée et à la lordose lombaire (Figure 3).<sup>109</sup>

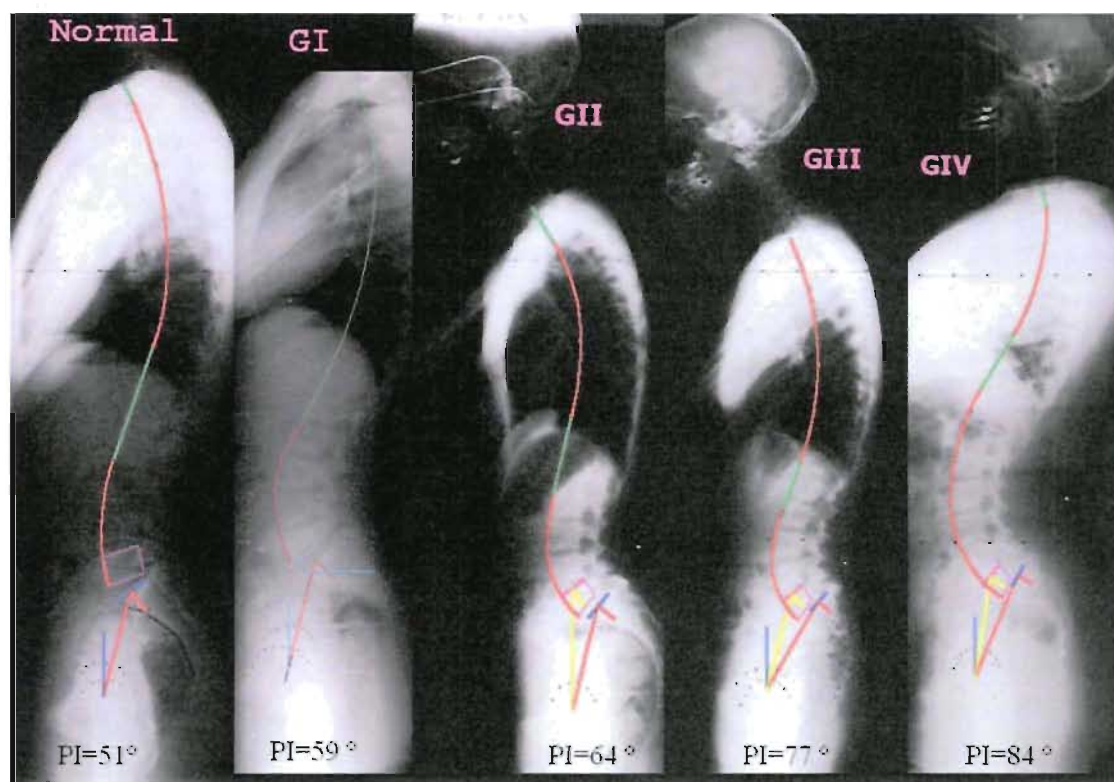


Figure 3. L'incidence pelvienne (PI) est typiquement plus grande chez les sujets avec spondylolisthésis. En plus, l'incidence pelvienne tend à augmenter de façon linéaire avec la sévérité du spondylolisthésis.

En se basant sur ces résultats, il semble que les patients présentant une morphologie sacro-pelvienne anormale (incidence pelvienne haute) soient prédisposés à des contraintes mécaniques altérées au niveau de la jonction lombosacrée et par conséquent à un risque accru de spondylolyse et de spondylolisthésis. Plus spécifiquement, une incidence pelvienne élevée associée à une pente sacrée élevée tend à accroître les contraintes de cisaillement au niveau du disque L5-S1 et à induire plus de tension sur les pars articularis à L5.<sup>89</sup> Par ailleurs, Roussouly et al.<sup>180</sup>

suggèrent deux mécanismes différents pour le spondylolisthésis isthmique de bas-grade (translation L5-S1 inférieure à 50%) en fonction de la géométrie sacro-pelvienne. Une incidence pelvienne élevée ainsi qu'une pente sacrée élevée ( $SS > 40^\circ$ ) augmenterait la contrainte de cisaillement sur le disque L5-S1 et induirait alors une tension accrue sur la pars interarticularis de L5 (Figure 4-A), alors que chez les sujets avec une incidence pelvienne et une pente sacrée plus basses ( $SS \leq 40^\circ$ ), le spondylolyse pourrait être secondaire au coincement répétitif des éléments postérieurs de L5 entre les facettes de L4 et S1 durant les mouvements d'extension, selon un mécanisme de type "casse-noisette" (Figure 4-B), originalement proposé par l'étude cadavérique de Nathan.<sup>153</sup> Ce dernier a en effet noté que chez la majorité des sujets avec spondylolyse, les facettes de L4 et S1 coinçaient la pars interarticularis entre elles, ce qui n'était pas le cas avec les sujets normaux (Figure 5). Par contre, Nathan<sup>153</sup> a aussi observé certains cas de spondylolyse qui n'étaient pas associés à ce mécanisme de type "casse-noisette" pour lesquels il n'avait pas d'explication. Similairement, Wiltse<sup>237</sup> rapporte que ce mécanisme de "casse-noisette" n'est pas présent chez les jeunes enfants lorsque le spondylolyse apparaît. Il se pourrait donc que les cas de spondylolyse rapportés par Nathan<sup>153</sup> et Wiltse<sup>237</sup> qui ne sont pas associés à un coincement de la pars interarticularis de L5 soient plutôt secondaires au mécanisme de cisaillement tel que suggéré par Roussouly et al.<sup>180</sup>

À partir d'analyses de classes ("cluster analysis") de type K-means, Labelle et al.<sup>111</sup> ont confirmé l'existence des deux sous-groupes distincts de patients avec spondylolisthésis développemental bas-grade originalement proposés par Roussouly et al.,<sup>180</sup> soit les types bas PI/bas SS (type casse-noisette ou "nutcracker") et haut PI/haut SS (type cisaillement ou "shear") (Figure 6). En fait, cette terminologie pourrait paraître quelque peu trompeuse car les patients de type bas PI/bas SS ont quand même des valeurs de PI et SS plus élevées que les enfants normaux en moyenne.<sup>126,128</sup> Donc, ce groupe reste quand même théoriquement prédisposé à présenter des contraintes de cisaillement accrues au niveau du disque L5-S1 et ainsi

plus de tension sur les pars articularis à L5 par rapport aux enfant normaux avec des PI et SS plus bas en moyenne.<sup>126,128</sup>

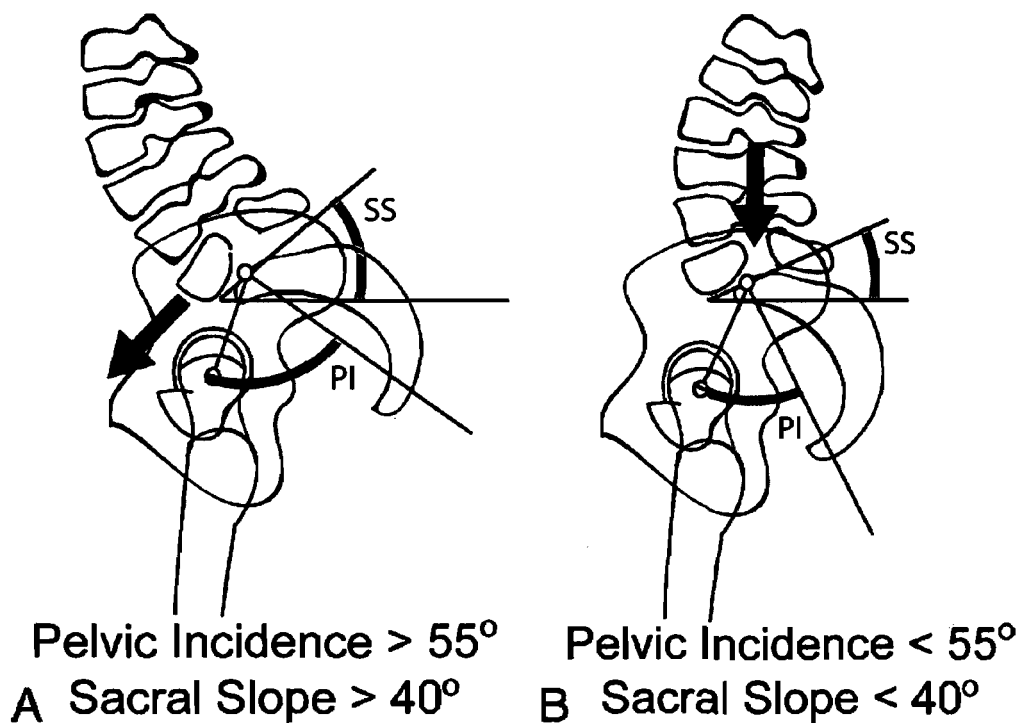


Figure 4. Deux mécanismes possibles dans la pathogenèse du spondylolisthésis en fonction de la morphologie sacro-pelvienne. A) Une incidence pelvienne haute associée à une pente sacrée élevée peut contribuer à une augmentation des contraintes de cisaillement sur le disque L5-S1 et à une tension accrue sur la pars interarticularis de L5. B) Une incidence pelvienne basse associée à une pente sacrée faible prédispose à un coincement répété des éléments postérieurs de L5 entre L4 et S1 durant les mouvements d'extension. (Roussouly et al., Spine 2006)

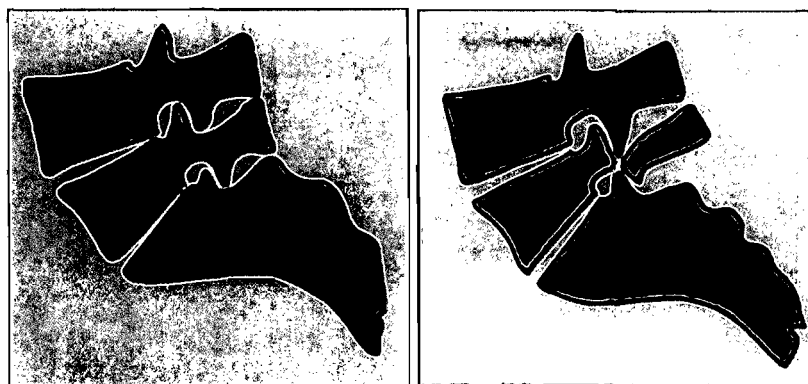


Figure 5. Chez le sujet normal (à gauche), la pars interarticularis n'est pas coincée par les facettes de L4 et S1. Par contre, dans le spondylolyse (à droite), les facettes de L4 et S1 interfèrent avec la pars interarticularis de L5 et l'affaiblissent jusqu'à ce que se produise le spondylolyse. (Nathan, J Bone Joint Surg 1959)

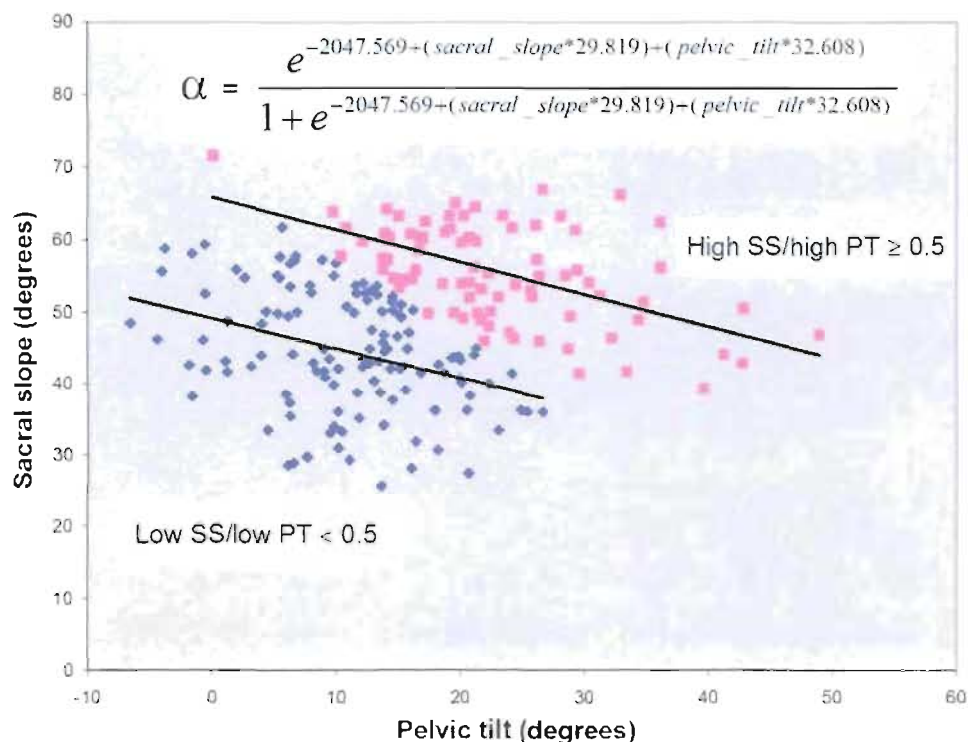


Figure 6. Deux sous-groupes de patients avec spondylolisthésis de bas-grade identifiés par analyse de classes K-means. Chaque patient peut être classé avec la formule donnée à partir des valeurs mesurées de pente sacrée et de version pelvienne. (Labelle et al., Canadian Spine Society 2006)

En ce qui a trait au spondylolisthésis de haut-grade (translation L5-S1 égale ou supérieure à 50%), Hresko et al.<sup>85</sup> ont également identifié par analyse de classes K-means deux sous-groupes de patients (Figure 7 et Figure 8).

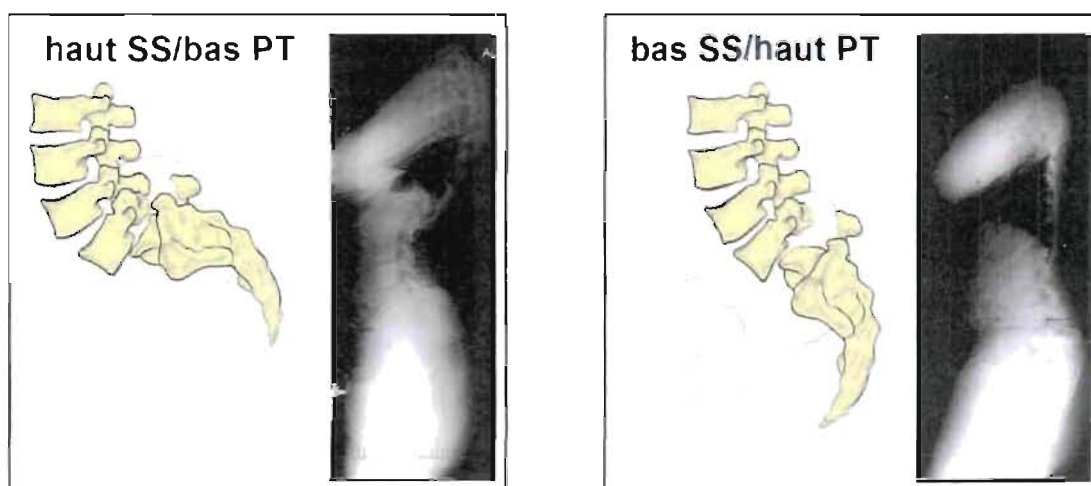


Figure 7. Deux sous-groupes de patients avec spondylolisthésis de haut-grade. (Hresko et al., Spine 2007)

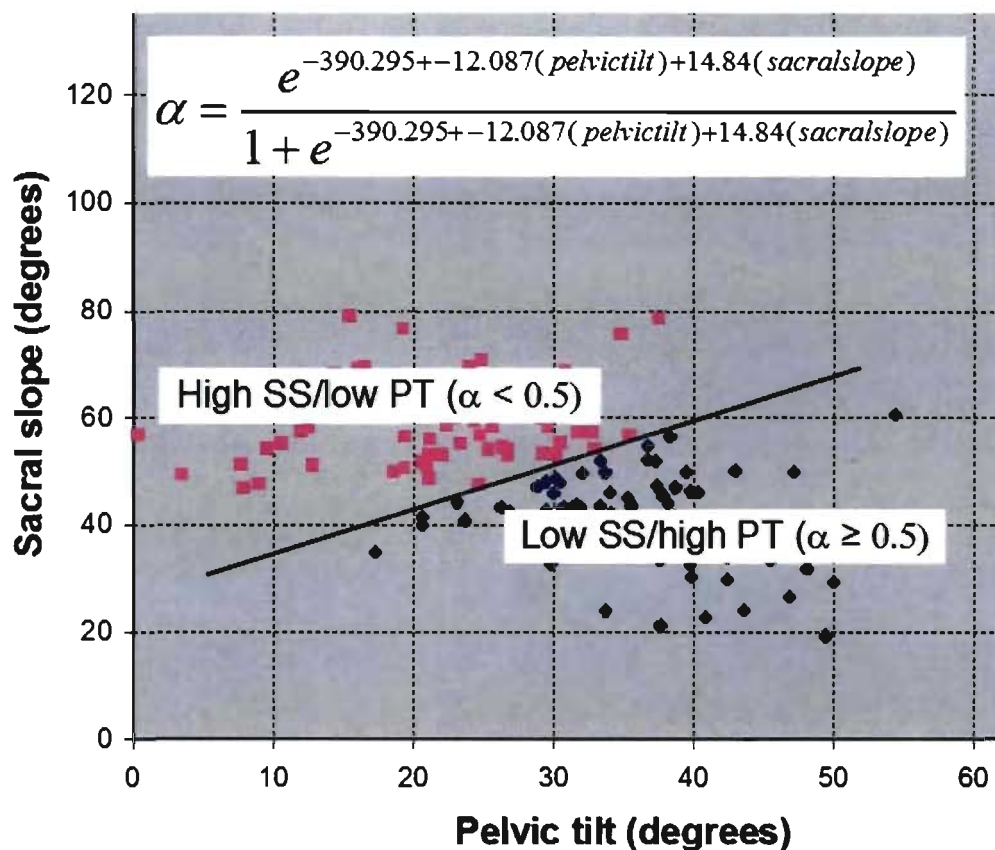


Figure 8. Deux sous-groupes de patients avec spondylolisthésis de haut-grade identifiés par analyse de classes K-means. Chaque patient peut être classé avec la formule donnée à partir des valeurs mesurées de pente sacrée et de version pelvienne. (Hresko et al., Spine 2007)

Le premier sous-groupe comprend ceux avec un équilibre sacro-pelvien relativement normal présentant une pente sacrée élevée ainsi qu'une version pelvienne basse (haut SS/bas PT). Fait à noter dans ce groupe, l'orientation sacro-pelvienne (SS et PT) est similaire à celle des sujets asymptomatiques pour un PI similairement élevé (Figure 9). Par contre, les sujets avec spondylolisthésis diffèrent avec les sujets normaux par une cyphose lombosacrée et une lordose lombaire augmentée. Le second sous-groupe inclut les patients avec un complexe sacro-pelvien déséquilibré secondaire à un bassin rétroversé et un sacrum verticalisé. Dans ce cas, la pente sacrée est basse alors que la version pelvienne est augmentée (bas SS/haut PT). Par ailleurs, il faut mentionner que jusqu'ici, la relation entre les deux types de spondylolisthésis bas-grade et les deux types de spondylolisthésis haut-grade reste totalement inconnue.

**Comparison of Pelvic Tilt and Sacral Slope in a) Patients with Spondylolisthesis and b) Normal Patients with Pelvic Incidence > 70 degrees**

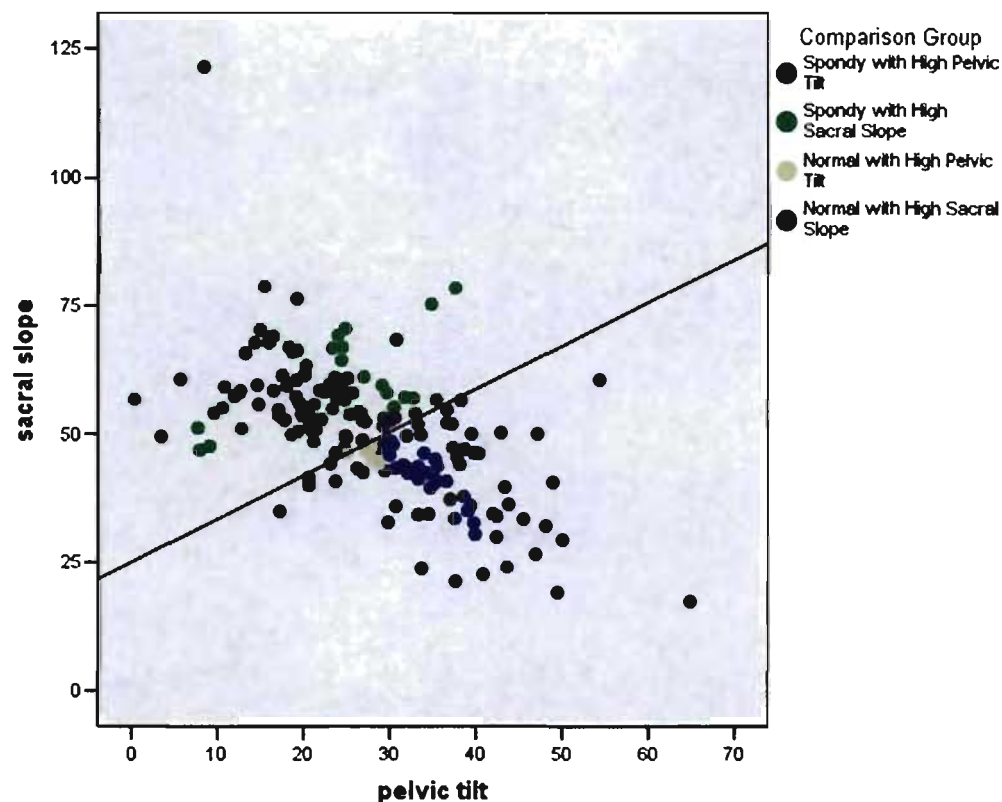


Figure 9. Ce graphique démontre les similitudes entre l'orientation pelvienne des patients avec spondylolisthésis de haut-grade de type haut SS/bas PT et les sujets normaux avec incidence pelvienne élevée. (Hresko et al., Spine 2007)

Finalement, Hresko et al.<sup>85</sup> proposent avec justesse que l'absence de consensus sur le traitement chirurgical du spondylolisthésis haut-grade est probablement liée au fait que les patients ne sont pas classés selon leur morphologie/orientation sacro-pelvienne. En d'autres termes, leurs conclusions suggèrent que les patients avec un spondylolisthésis de haut-grade forment un groupe hétérogène qui doit être pris en considération dans la planification chirurgicale, notamment pour la réduction.

Une anomalie de la morphologie sacrée a également été proposée dans la pathogenèse du spondylolisthésis. Inoue et al.<sup>91</sup> ont étudié 367 patients atteints de spondylolyse et ont remarqué une augmentation du risque de progression chez ceux présentant un angle de la table sacrée (Figure 10) diminué. En utilisant ce même paramètre,

Whitesides Jr et al.<sup>233</sup> ont observé une forte association entre l'angle de la table sacrée et la présence d'un spondylolyse sur des spécimens cadavériques de deux populations distinctes connues pour une incidence élevée de spondylolisthésis isthmique. Ces auteurs suggèrent un rôle de l'angle de la table sacrée dans l'étiologie du spondylolyse, pour lequel un petit angle de la table sacrée engendrerait plus de contraintes de cisaillement sur le disque L5-S1, causant ainsi une tendance accrue pour le glissement lombosacré et le remodelage du sacrum.

### Sacral table angle



Figure 10. Mesure de l'angle de la table sacrée entre le plateau supérieur et le bord postérieur de S1.

Récemment, notre équipe de recherche a comparé l'angle de la table sacrée entre 115 sujets normaux et 131 sujets avec spondylolisthésis (91 bas-grade et 40 haut-grade).<sup>232</sup> Nous avons pu confirmer que l'angle de la table sacrée est effectivement différent dans le spondylolisthésis et que cette différence tend à augmenter avec la sévérité du spondylolisthésis (Figure 11).

D'autres anomalies de la morphologie sacrée potentiellement impliquées dans la progression du spondylolisthésis ont aussi été documentées.<sup>5,135</sup> Antoniadis et al.<sup>5</sup> ont observé qu'une augmentation de la cyphose sacrée était associée à une augmentation de la pente sacrée, de la lordose lombaire et du degré de glissement chez 45 patients avec spondylolisthésis. Ils suggèrent qu'une augmentation de la cyphose sacrée est secondaire à un déplacement antérieur du centre de gravité sous l'effet de la



translation de L5 sur S1. Ces forces anormales générées antérieurement au niveau des physes sacrées chez l'enfant provoqueraient une cyphose progressive du sacrum en accord avec le principe de Hueter-Volkman. Marty et al.,<sup>135</sup> quant à eux, ont montré des différences en ce qui concerne la morphologie des vertèbres S1 et S2, entre un groupe de 39 sujets atteints de spondylolisthésis et un groupe de 44 jeunes adultes normaux. Par contre, les groupes n'étaient pas comparables en âge, alors que le groupe spondylolisthésis était plus âgé en moyenne (30 vs 24 ans) avec une plage plus étendue (13-67 vs 19-28 ans).

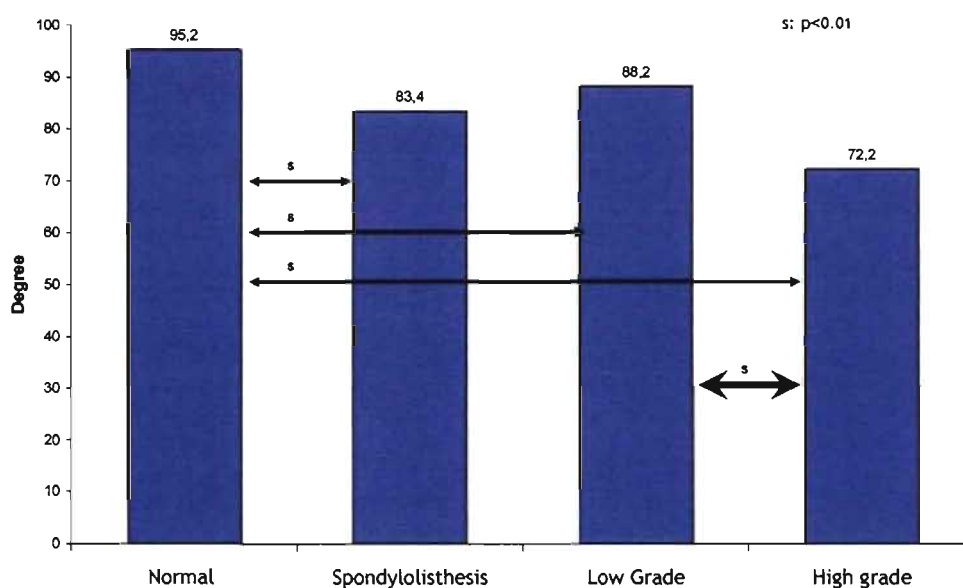


Figure 11. Comparaison de l'angle de la table sacrée entre les sujets normaux et les sujets avec spondylolisthésis. Des différences significatives sont retrouvées entre chaque groupe. (Wang et al., soumis à Spine, 2007)

En résumé, la variabilité dans la morphologie sacro-pelvienne suggère que les caractéristiques des contraintes biomécaniques pourraient différer d'un patient à l'autre. Conséquemment, il est probable que l'équilibre sacro-pelvien spécifique à chaque patient doit être considéré dans l'évaluation du risque de progression et dans la planification chirurgicale. Malgré cela, il reste qu'aucune étude jusqu'à présent ne permet de déterminer précisément si les anomalies observées sont primaires et étiologiques, ou si elles sont secondaires au remodelage du sacrum ou du bassin et non reliées à la progression du spondylolisthésis. Pour répondre à cette question, il

faudrait suivre de façon prospective une importante cohorte d'enfants normaux pour déterminer s'ils développent ou non un spondylolyse/spondylolisthesis. Par contre, cette méthodologie n'est pas justifiable de nos jours pour des raisons éthiques liées à la prise de radiographies sur des enfants normaux. Huang et al.<sup>88</sup> ont bien tenté d'évaluer la valeur prédictive de l'incidence pelvienne sur la progression du spondylolisthesis isthmique à l'aide d'une étude rétrospective sur 36 patients ayant subi une fusion lombosacrée postérieure. En comparant les patients ayant progressé ou non durant le suivi avant la chirurgie, ils ont remarqué que l'incidence pelvienne était similaire dans ces deux groupes. Ils proposent alors que l'incidence pelvienne ne peut prédire la progression du spondylolisthesis. Par contre, plusieurs éléments méthodologiques poussent à douter des conclusions de cet article. Premièrement, ceux-ci n'ont pas défini précisément leurs critères pour différencier les patients ayant progressé ou non. Deuxièmement, il faut savoir que tous les patients qu'ils ont étudiés avaient déjà subi au préalable une progression de leur spondylolisthesis avant de se présenter chez le médecin. Finalement, puisque tous les patients ont été opérés, il est impossible de savoir avec certitude si les patients qu'ils ont classés comme n'ayant pas progressé auraient plutôt progressé sans la chirurgie. Par ailleurs, cette étude n'a été effectuée que sur un nombre limité de sujets et ne permet pas du tout de savoir si l'incidence pelvienne est un facteur étiologique qui contribue à l'initiation du spondylolisthesis.

Avec une progression du spondylolisthesis, une modification de la lordose lombaire peut également survenir dans le but de compenser pour le déséquilibre local lombosacré. En association avec la magnitude de l'incidence pelvienne, il y a habituellement une augmentation de la lordose lombaire<sup>109</sup> afin de préserver le centre de gravité au-dessus des hanches et ainsi maintenir une posture équilibrée. Ce mécanisme de compensation se fait en augmentant la lordose segmentaire intervertébrale et/ou en recrutant plus de segments vertébraux dans la région lordotique. Lorsque ce mécanisme de compensation est épuisé, le patient peut alors présenter un déséquilibre postural sagittal, le plus souvent antérieur (Figure 12).

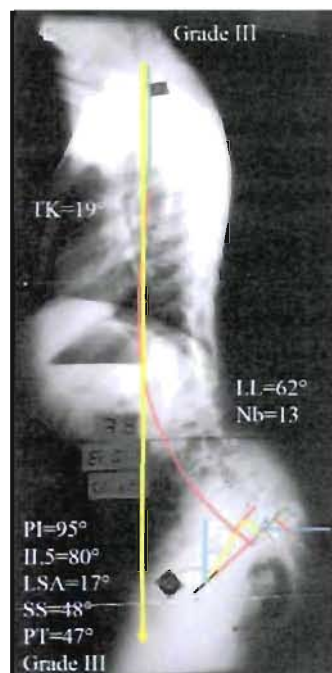


Figure 12. Déséquilibre postural antérieur chez un patient avec spondylolisthésis de haut-grade.

Rajnic et al.<sup>173</sup> ont comparé le profil sagittal et la morphologie sacro-pelvienne de 30 adultes normaux avec 48 adultes atteints de spondylolisthésis (45 de bas-grade et 3 de haut-grade). Ils ont mesuré l'orientation sagittale du rachis de C2 à L5 et de T1 à S1 par rapport à la verticale et n'ont pas observé de différence significative entre les deux groupes, malgré des différences significatives observées au niveau de la morphologie et de l'orientation sacro-pelvienne, ainsi qu'au niveau de la lordose lombaire. Ils n'ont par ailleurs trouvé aucune relation significative entre les paramètres sacro-pelviens (morphologie ou orientation sacro-pelvienne) ou rachidiens (cyphose thoracique ou lordose lombaire) et les mesures d'orientation sagittale du rachis. Jackson et al.<sup>97</sup> ont étudié le profil sagittal de 75 adultes normaux (âge moyen : 39 ans ; intervalle : 20-63 ans) et de 75 patients majoritairement adultes (âge moyen : 44 ans ; intervalle : 14-78 ans) atteints de spondylolisthésis isthmique (66 de bas-grade et 9 de haut-grade). Fait à noter, les groupes étaient différents par rapport à l'âge. L'équilibre sagittal global a été mesuré à l'aide de quatre paramètres avec la technique de fil à plomb entre les repères anatomiques suivants (c.f. section 1.6.5) : 1) C7 vs centre des têtes fémorales, 2) T4 vs centre des têtes fémorales, 3) T4 vs S1 et 4) T4 vs L4. Comme pour Rajnic

et al.,<sup>173</sup> les auteurs n'ont observé aucune différence significative dans la mesure de l'équilibre sagittal global entre les sujets normaux et les sujets avec spondylolisthésis, malgré que la morphologie et l'orientation sacro-pelvienne, de même que la lordose lombaire différaient entre les deux groupes. La mesure de l'équilibre sagittal global n'était reliée à aucun paramètre local sacro-pelvien (morphologie ou orientation sacro-pelvienne) ou rachidien (cyphose thoracique ou lordose lombaire), sauf de façon modérée ( $r=-0.32$ ,  $p=0.005$ ) avec la distance entre le centre des têtes fémorales et le coin postéro-supérieur de S1 et ce, seulement pour les sujets normaux. Selon leurs critères (c.f. section 1.6.5), trois des 75 patients avec spondylolisthésis présentaient une posture non congruente (i.e. différente de la population normale). Seulement un de ces patients présentait une posture dite non compensée où T4 se projetait en avant de L4. Parmi les faiblesses de ces études, il faut mentionner que leurs cohortes ne comportaient que très peu de patients avec spondylolisthésis de haut-grade, alors qu'en pratique, ce sont surtout ces patients qui présentent des problèmes posturaux. Par ailleurs, il est à noter que ces deux études portent sur des sujets adultes et qu'il n'existe encore aucune étude similaire pour les sujets pédiatriques.

Récemment, Vialle et al.<sup>230</sup> ont comparé 244 adolescents et jeunes adultes atteints de spondylolisthésis lombosacré développemental avec 300 adultes normaux. Ils ont observé des différences significatives pour tous les paramètres considérés dont l'incidence pelvienne, la pente sacrée, la version pelvienne, la cyphose thoracique et la lordose lombaire. L'équilibre sagittal global (angle entre la verticale et la ligne joignant T1 et le centre des têtes fémorales) était aussi différent, mais cette différence était de moins de  $2.5^\circ$  en moyenne. En fait, le résultat qui paraît le plus intéressant est que l'écart-type pour cette valeur était presque deux fois plus élevé dans le spondylolisthésis. Les auteurs mentionnent aussi que les patients avec spondylolisthésis utilisaient la même "stratégie d'équilibre sagittal" que les sujets normaux, puisque les corrélations entre les paramètres mesurés sont similaires. Ils insistent par ailleurs sur l'importance de la cyphose lombosacrée dans la pathogenèse du spondylolisthésis en soulignant sa relation significative avec le degré de

glissement. Ils suggèrent également que le déséquilibre “local” à la jonction lombosacrée est compensé par les segments mobiles adjacents du reste du rachis et par l’orientation du bassin, ce qui résulte en un équilibre sagittal satisfaisant du tronc. Malgré l’apport significatif de cette étude, trois limites majeures marquent cette étude. Premièrement, leur groupe contrôle n’est pas comparable au niveau de l’âge (14 vs 35 ans en moyenne), même s’il est suggéré que les paramètres rachidiens et sacro-pelviens varient durant la croissance.<sup>31,42,132,231</sup> Mais plus important encore, ils statuent que les sujets normaux et avec spondylolisthésis utilisent la même “stratégie d’équilibre sagittal”, alors que l’équilibre sagittal global diffère de façon significative entre les deux groupes. Par ailleurs, ils n’ont pas tenu compte de l’étude récente de Hresko et al.<sup>85</sup> dans laquelle les auteurs décrivent la distinction entre deux sous-types de sujets avec spondylolisthésis de haut grade qui semblent présenter des mécanismes posturaux et un équilibre sagittal global différents.

#### **1.3.4 Développement osseux et anomalie des plaques de croissance**

Le risque de progression du spondylolisthésis est le plus élevé durant la croissance<sup>16,58,188,194</sup> et diminue après l’atteinte de la maturité osseuse.<sup>15,58,148,239</sup> Chez l’enfant, des contraintes anormales à la jonction lombosacrée peuvent mener à un remodelage osseux au niveau de la plaque de croissance, contribuant alors à la progression du spondylolisthésis par un phénomène similaire à la maladie de Blount.<sup>244</sup> Farfan et al.<sup>54</sup> croient que le lien entre le disque intervertébral et la plaque de croissance est plus fort que le lien entre la plaque de croissance et le corps vertébral proprement dit. Dans ce cas, ils postulent que le spondylolisthésis se produit entre la plaque de croissance et le corps vertébral. Pour appuyer leur hypothèse, ils citent les arguments suivants: 1) l’âge pour lequel l’incidence du spondylolisthésis est le plus élevée correspond à l’âge pour lequel l’incidence des glissements épiphysaires est le plus élevé, 2) la formation osseuse à la partie antérieure et la résorption osseuse à la partie postérieure du plateau sacré sont similaires au processus de remodelage observé dans le glissement épiphysaire, et 3) l’absence de dégénérescence discale significative initialement. De façon similaire, Ikata et al.<sup>90</sup> proposent aussi que le glissement se produit de façon prédominante entre la plaque de croissance et l’os

sous-jacent durant la croissance. Plusieurs autres études<sup>100,105,186,187</sup> supportent aussi l'idée d'une faiblesse au niveau de la plaque de croissance comme un mécanisme important dans la progression du spondylolisthésis. Takahashi et al.,<sup>214</sup> quant à eux, suggèrent qu'une anomalie de la portion antéro-supérieure du sacrum est reliée à la progression du spondylolisthésis.

### 1.3.5 Dysplasie osseuse lombosacrée et anomalie des tissus mous

Wiltse et al.,<sup>234</sup> dans leur classification, ont déjà reconnu l'importance de la dysplasie lombosacrée dans la pathogenèse du spondylolisthésis. À cet effet, ils ont défini le type dysplasique pour lequel il existe une dysplasie et une faiblesse congénitales de l'arc postérieur de L5 ou S1. À l'opposé, Marchetti et Bartolozzi<sup>133</sup> ont introduit le concept de dysplasie dans un contexte développemental plutôt que congénital. À cet effet, il a été démontré que le spondylolyse tend à perturber subséquemment la croissance des facettes et ainsi induire une dysplasie des facettes.<sup>143</sup> Dans l'article original de Marchetti et Bartolozzi,<sup>133</sup> ceux-ci expliquent de façon qualitative les caractéristiques entre les types bas- et haut-dysplasiques sans donner de critère quantitatif pour les différencier. Selon eux, un patient possédant les caractéristiques haut-dysplasiques (cyphose lombosacrée significative, vertèbre L5 trapézoïdale, dysplasie des éléments postérieurs de L5 et S1, et anomalie du plateau supérieur de S1) serait plus à risque de subir une progression de son spondylolisthésis.

Un degré variable de dysplasie des éléments postérieurs, tel qu'un spina bifida occulta, une aplasie/dysplasie des facettes et/ou des lames, est très fréquent dans le spondylolisthésis et affecte le phénomène de rétention des éléments postérieurs ("posterior bony hook/catch") à la jonction lombosacrée.<sup>36,58</sup> Curylo et al.<sup>36</sup> ont observé 62% de cas avec dysplasie des éléments postérieurs chez les patients avec spondylolyse, comparativement à 100% pour Yue et al.<sup>244</sup> Fredrickson et al.<sup>58</sup> ont montré que 92% des enfants avec spondylolyse présentaient aussi un spina bifida occulta, contrairement à 23% chez les adultes normaux.<sup>57</sup> De son côté, Wiltse estime qu'un spina bifida est environ 13 fois plus fréquent chez les sujets avec spondylolyse.<sup>237</sup>

La colonne antérieure du rachis peut également être dysplasique à L5 et au sacrum. Une cunéiformisation de la vertèbre L5, le plus souvent évaluée à l'aide de l'index lombaire (Figure 13),<sup>222</sup> peut être présente. Alors que la normale pour l'index lombaire se situe à environ 0.9,<sup>114,222</sup> la moyenne pour les sujets atteints de spondylolisthésis est inférieure à 0.8.<sup>5,222,244</sup> Yue et al.,<sup>244</sup> dans leur évaluation de 27 patients atteints de spondyloptose, ont remarqué que 14 patients (51.9%) présentaient hors de tout doute une cunéiformisation de L5 avec un index lombaire inférieur à 0.8, alors que 7 patients (25.9%) ne présentaient pas de cunéiformisation de L5 (index lombaire supérieur à 0.9). Ces résultats, associés au fait que la cunéiformisation de L5 n'est pas présente avant l'apparition du spondylolyse,<sup>58,237</sup> tendent à confirmer que la cunéiformisation de L5 est secondaire et ne contribue ni à la cause, ni à la progression du spondylolisthésis, contrairement à ce que pensait Taillard.<sup>212</sup>

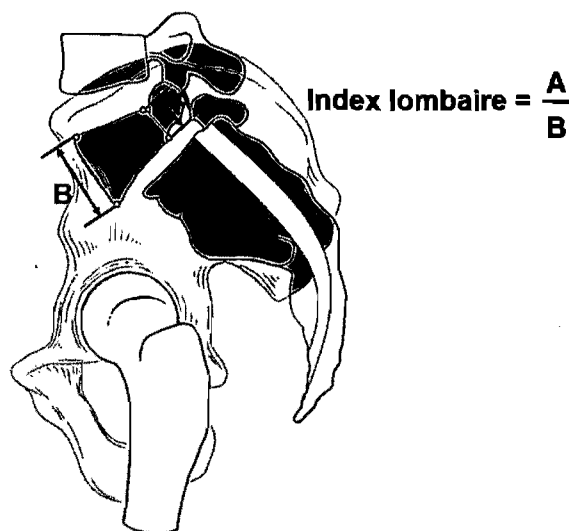


Figure 13. Mesure de la cunéiformisation de la vertèbre L5 à l'aide de l'index lombaire.

La dysplasie du plateau supérieur de S1 est un autre élément important à considérer dans le spondylolisthésis.<sup>110</sup> Cette dysplasie sacrée peut prendre plusieurs formes, telles que décrites par Vialle et al.<sup>228</sup> dans leur classification: Grade 0, aucune convexité; Grade 1, convexité modérée et centrale; et Grade 2, convexité haute et antérieure. Le plus souvent, la dysplasie du plateau sacré est définie comme étant un dôme sacré. La majorité des auteurs<sup>16,60,88,90,194,237</sup> s'entendent pour dire que la

présence d'un dôme sacré est un processus secondaire au spondylolyse ou au spondylolisthésis. Wiltse<sup>237</sup> pense que le dôme sacré est secondaire à une rétroversion du bassin causant la verticalisation du sacrum. Même si le dôme sacré n'est pas la cause originelle du spondylolisthésis, plusieurs auteurs<sup>122,133,149,244</sup> pensent que le dôme sacré est un facteur important dans la progression du spondylolisthésis. En particulier, Yue et al.,<sup>244</sup> après avoir analysé les détails anatomiques de 27 patients atteints de spondyloptose, ont noté que la présence d'un dôme sacré constituait la seule caractéristique anatomique retrouvée universellement chez tous les patients. Dès lors, ils suggèrent que le dôme sacré est un élément indispensable à la progression du spondylolisthésis vers le spondyloptose. Cependant, il reste que la difficulté majeure associée à l'étude de l'influence du dôme sacré sur la progression du spondylolisthésis réside dans le fait qu'il n'existe encore aucun consensus dans la littérature sur la façon d'évaluer le dôme sacré afin de déterminer s'il y a présence d'un dôme sacré ou non.

Une anomalie du tissu conjonctif associée à une laxité ligamentaire ou à un désordre osseux peut aussi prédisposer au spondylolisthésis. Des cas de spondylolisthésis ou de spondyloptose ont été rapportés dans certaines anomalies du tissu conjonctif telles que le syndrome de Marfan,<sup>176,204,215,240</sup> le syndrome Ehler-Danlos<sup>154</sup> et l'ostéogenèse imparfaite.<sup>9,174</sup>

### **1.3.6 Théorie unifiée de la pathogenèse du spondylolisthésis développemental**

L'étiologie exacte du spondylolisthésis développemental reste encore inconnue mais elle est le plus probablement multifactorielle. Cette section présente un schéma (Figure 14) sur la pathogenèse du spondylolisthésis qui tente d'unifier les différentes anomalies rapportées dans les sections précédentes. Tel que mentionné dans la section 1.2, cette thèse considère que le spondylolisthésis développemental inclut les formes développementale et traumatique impliquant une fracture de stress de la pars interarticularis décrites par Marchetti et Bartolozzi,<sup>133</sup> de même que les types dysplasique et isthmique définis par Wiltse et al.<sup>234</sup> Chez les athlètes<sup>25,55,83,92,120,138,206,211</sup> pour qui une fracture de stress de la pars interarticularis



est présumément la cause du spondylyse, les facteurs prédisposants proposés en haut à gauche du schéma sont moins importants, alors que facteurs suggérés en haut à droite prédominent. En contrepartie, chez les enfants qui ne sont pas impliqués dans des activités connues à risque, les facteurs prédisposants décrits en haut à gauche sont prédominants dans l'initiation du défaut isthmique. Dès que le défaut isthmique apparaît, le spondylolisthésis peut progresser de façon plus ou moins importante, selon l'influence des différents éléments présentés dans la portion cyclique.

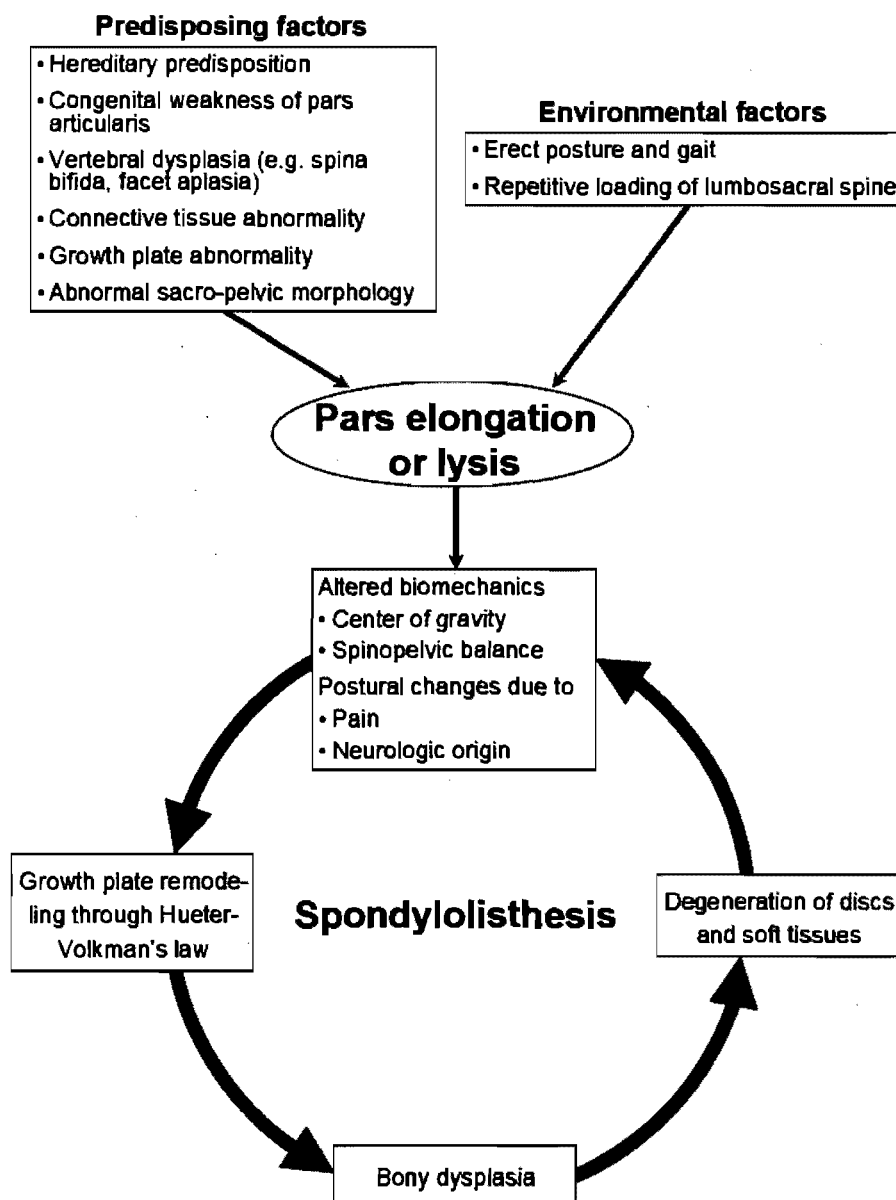


Figure 14. Théorie unifiée de la pathogénèse du spondylolisthésis développemental.

#### **1.4 Progression du spondylolisthésis**

Blackburne et Velikas<sup>16</sup> ont étudié 142 enfants avec spondylolisthésis dysplasique ou isthmique avec des degrés variables de glissement, de 0 (spondylolyse) à 100%. Des 79 patients suivis durant au moins un an, le spondylolisthésis a progressé d'au moins 10% pour 12 d'entre eux. Aucun cas avec un glissement initial inférieur à 30% n'a progressé. Par ailleurs, la progression du spondylolisthésis avait tendance à survenir durant la poussée de croissance et tous les patients ayant progressé présentaient une dysplasie des éléments postérieurs.

Pour leur part Fredrickson et al.<sup>58</sup> confirment les trouvailles de Blackburne et Velikas<sup>16</sup> concernant le faible risque de progression du spondylolisthésis de bas-grade avec moins de 30% de glissement. Les cas de progression sont survenus principalement durant la puberté, alors qu'aucun cas de progression n'a été documenté après 18 ans. Le risque exact de progression est cependant difficile à établir précisément à partir de leur étude pour deux raisons. Premièrement, ils ont pris des radiographies en position couchée, ce qui a tendance à minimiser le degré de glissement par rapport aux clichés debout. Deuxièmement, leurs résultats sont très mal présentés, rendant leur interprétation imprécise.

Frennered et al.<sup>60</sup> ont rapporté l'histoire naturelle de 47 patients atteints de spondylolisthésis isthmique de bas-grade sur une période moyenne de 7 ans. Seulement deux patients du groupe (4%) ont progressé, alors que les sept patients avec un glissement initial supérieur à 30% n'ont pas progressé. Ils ne rapportent pas de corrélation significative entre la progression et les caractéristiques à la présentation initiale, telles que l'âge, le sexe, le degré de glissement, la cyphose lombosacrée, la hauteur discale L5-S1, l'index lombaire ou le dôme sacré. Cependant, la valeur de leur étude statistique est limitée par le nombre très limité de patients ayant progressé, soit seulement deux sur 47. Saraste<sup>189</sup> a suivi sur une durée minimale de 20 ans 255 sujets atteints de spondylolyse bilatéral. Seulement 5% des patients ont progressé de

façon significative. Ils n'ont pas observé de corrélation entre la progression du spondylolisthésis et l'âge à la présentation ou le degré initial de spondylolisthésis.

Beutler et al.<sup>15</sup> ont poursuivi l'étude de Fredrickson et al.<sup>58</sup> pour évaluer sur une période d'environ 45 ans 30 sujets avec spondylolyse. Des 22 sujets avec spondylolyse bilatéral, aucune guérison spontanée du spondylolyse n'a été notée. Quatre n'ont jamais développé de spondylolisthésis et le pourcentage maximal de glissement parmi les autres patients était de 39%. Le taux de progression avait tendance à diminuer avec l'âge après la puberté. Il n'y avait pas de relation entre la progression du spondylolisthésis et le pourcentage de glissement initial, l'âge au moment du glissement initial, ou la cyphose lombosacrée initiale. Fait à noter, ils n'ont pas trouvé d'association entre la progression du glissement et l'incidence de lombalgie. De plus, les scores SF-36 chez les sujets étudiés étaient similaires à ceux retrouvés dans la population générale au même âge. Par ailleurs, ils ont évalué la dégénérescence discale chez tous les patients à l'aide de IRM. Ils ont remarqué qu'un glissement supérieur à 15% était toujours associé à une dégénérescence modérée ou sévère du disque L5-S1. Ils ont aussi observé une relation significative entre le degré de dégénérescence discale L5-S1 et le pourcentage de glissement mais pas entre la dégénérescence discale L5-S1 et la prévalence de lombalgie.

De façon surprenante, Sairyo et al.<sup>188</sup> ont publié des résultats très différents des autres études effectuées sur la progression du spondylolisthésis de bas-grade. Ils rapportent ainsi une progression chez 19 des 69 sujets étudiés (28%). Cette disparité par rapport aux études antérieures semble être due à un critère plus libéral de progression. En effet, ils considèrent que le spondylolisthésis a progressé si le pourcentage de glissement a augmenté de 5% seulement, alors que certains suggèrent qu'idéalement un minimum de 20% de translation soit requis pour être significatif.<sup>39</sup> Ils ont également observé que le spondylolisthésis avait tendance à progresser principalement lorsque le rachis lombaire est immature, tel qu'évalué à l'aide de l'état de l'épiphyse vertébrale.

En ce qui concerne le spondylolisthésis de haut-grade, l'histoire naturelle reste en grande partie inconnue puisque la majorité de ces patients subiront un traitement chirurgical. Harris et Weinstein<sup>75</sup> ont suivi 11 patients atteints de spondylolisthésis de haut-grade sur une période moyenne de 18 ans. Ils soulèvent la difficulté de déterminer avec précision si il y a eu progression ou non chez ces patients à partir des radiographies, mais estiment que seulement trois de ces patients ont subi une progression de leur spondylolisthésis. Quatre patients sont demeurés asymptomatiques durant le suivi, six avaient des symptômes légers et seulement un présentait des symptômes assez sévères pour l'obliger à modifier son emploi. Cinq des patients présentaient des symptômes neurologiques discrets sans évidence de trouble sphinctérien.

En résumé, différents facteurs de risque de progression du spondylolisthésis ont été proposés dans la littérature, tels que le sexe féminin,<sup>58</sup> la présentation à un âge précoce,<sup>188,194</sup> la sévérité du glissement à la présentation,<sup>16,60,194</sup> la poussée de croissance,<sup>16,58,114</sup> l'absence d'un spondylolyse,<sup>58,139</sup> la cyphose lombosacrée,<sup>23,26,47</sup> et la dysplasie osseuse,<sup>16,36</sup> sans toutefois qu'il y ait de consensus clair. Il semble donc qu'il y a d'autres éléments importants qui ne sont pas pris en considération dans les études effectuées. Par exemple, il n'existe jusqu'à présent aucune étude fiable ayant statué sur l'influence de la morphologie et de l'équilibre spino-pelvien dans la progression du spondylolisthésis (c.f. section 1.3.3).

### **1.5 Présentation clinique**

La majorité des sujets avec un spondylolyse ou un spondylolisthésis de bas-grade sont asymptomatiques. Tel que décrit par Marchetti et Bartolozzi,<sup>133</sup> ceux avec un spondylolisthésis développemental haut-dysplasique deviennent souvent symptomatiques durant l'adolescence et sont à risque de progresser durant la poussée de croissance. À l'opposé, les sujets atteints d'un spondylolisthésis bas-dysplasique tendent à se présenter à l'âge adulte et sont moins à risque de progression.

La douleur est la principale raison de consultation des enfants atteints de spondylolyse ou de spondylolisthésis.<sup>123</sup> Elle est typiquement localisée à la jonction lombosacrée et peut irradier aux fesses et à la région postérieure des cuisses. Selon Lenke et Bridwell,<sup>118</sup> la douleur serait due initialement à un malalignement spino-pelvien et à une biomécanique altérée, sans données à l'appui par contre. Saraste et al.<sup>189,190</sup> ont observé une incidence augmentée de lombalgie reliée à un degré de glissement élevé, à un index lombaire bas, à une dégénérescence discale et à un spondylolisthésis à L4-L5. Ils suggèrent aussi que la dégénérescence discale est plus fréquente que dans la population générale. À l'opposé, Beutler et al.<sup>15</sup> ne rapportent pas de lien entre la dégénérescence discale à L5-S1 et la prévalence de lombalgie alors qu'ils ont observé une relation significative entre le degré de dénégescence discale L5-S1 et le pourcentage de glissement. De plus, ils mentionnent que le taux de dégénérescence discale est comparable à celui retrouvé dans la population normale asymptomatique du même âge.

Certains patients, particulièrement ceux avec un spondylolisthésis de haut-grade, peuvent présenter des symptômes neurologiques, le plus souvent radiculaires. La compression radiculaire peut être causée par une sténose foraminale ou du recessus latéral, par du tissu fibrocartilagineux autour de la lésion isthmique, par compression entre l'apophyse transverse de L5 et l'aileron sacré, ou par une hernie discale. Une sténose centrale secondaire au spondylolisthésis peut aussi provoquer un syndrome de queue de cheval ou des problèmes sphinctériens. Les patients avec une dysplasie des éléments postérieurs sans spondylolyse sont typiquement plus à risque de présenter des symptômes neurologiques puisque le canal spinal de L5 demeure fermé. À l'opposé, un déficit neurologique est moins fréquent dans le spondylolisthésis isthmique puisque la séparation entre les éléments antérieurs et postérieurs de L5 permet plus d'espace pour le contenu dural.

À l'évaluation clinique, une attention particulière doit être prise pour évaluer si le patient présente des signes compatibles avec un syndrome génétique ou une anomalie

du tissu conjonctif. Les sujets avec un spondylolyse seulement apparaissent habituellement normaux, alors que ceux avec un spondylolisthésis présentent généralement une lordose lombaire augmentée et à l'occasion un abdomen et des fesses proéminents. Avec un spondylolisthésis sévère, le tronc apparaît raccourci puisque la distance entre la cage thoracique et les crêtes iliaques diminue. Afin de compenser pour la translation antérieure de L5 et donc, du centre de gravité, certains patients vont compenser par une flexion des hanches et des genoux, adoptant ainsi la position décrite par Phalen et Dickson.<sup>164</sup> Une déformation scoliothique peut être observée et peut être secondaire à une tension/compression radiculaire et/ou à un spasme musculaire (scoliose antalgique ou sciatique), à un glissement asymétrique dans le plan frontal (scoliose olisthétique) ou à une véritable scoliose idiopathique.<sup>47,121,136,167</sup> La palpation du dos peut révéler une marche d'escalier à la jonction lombosacrée.

Les sujets symptomatiques présentent généralement des amplitudes de mouvement restreintes du rachis et des ischio-jambiers courts. Des ischio-jambiers courts peuvent être secondaires à la contracture en flexion des genoux chez certains patients<sup>86</sup> ou à la tension ou compression radiculaire à L5 ou S1.<sup>8,164</sup> La manœuvre SLR ("straight-leg raising") et le signe de Lasègue sont habituellement positifs chez les patients avec une tension radiculaire à L5 ou S1.<sup>8,164</sup> L'évaluation des sphincters est également importante, notamment avec la suspicion d'un syndrome de queue de cheval.

### **1.6 Examens radiographiques de base**

Des radiographies simples du rachis lombosacré en position debout devraient être obtenues initialement dans l'investigation du spondylolyse et du spondylolisthésis. Une investigation radiologique complète comprend des vues antéro-postérieure (AP), latérale (LAT) et obliques. La vue AP peut démontrer la présence d'un spina bifida occulta et une dysplasie des éléments postérieurs. La vue LAT montre la sévérité du spondylolisthésis et permet souvent l'identification d'un spondylolyse, de même que l'anatomie de L5, du sacrum et du bassin. Les vues obliques montrent souvent de

façon plus précise le spondylolyse, tel que décrit par le signe du chien écossais (“scotty dog sign”). Une vue AP de Ferguson, prise parallèlement au disque L5-S1, peut également être ajoutée afin d’obtenir une vue coronale de L5 et améliorer la visualisation des pédicules et des apophyses transverses de L5, de même que du sacrum. Cette vue permet également de mieux évaluer la masse de fusion après la chirurgie.<sup>119</sup> Des radiographies postéro-antérieure (PA) et LAT sur longues cassettes montrant tout le rachis, le bassin et les têtes fémorales sont également utiles afin d’évaluer l’équilibre coronal et sagittal global du rachis. Sur la vue PA, toute déformation scoliotique est également notée.

### 1.6.1 Évaluation de la sévérité du spondylolisthésis

La méthode la plus souvent utilisée pour évaluer la sévérité du spondylolisthésis est la technique de Meyerding<sup>141</sup> dans laquelle les grades I, II, III et IV correspondent à des translations égale ou inférieure à 25%, 50%, 75% et 100%, respectivement (Figure 15). Le grade 0 peut être utilisé lorsqu’il y a spondylolyse sans évidence de spondylolisthésis, alors que le grade V représente un spondyloptose.<sup>158</sup> Un spondylolisthésis de grade 0, I ou II est considéré de bas-grade alors qu’un spondylolisthésis de grade III, IV ou V est considéré de haut-grade. La reproductibilité de la technique de Meyerding est excellente, avec des valeurs kappa de 0.79 et 0.78 pour les reproductibilités intra- et inter-observateur, respectivement.<sup>216</sup> Le pourcentage de glissement décrit par Taillard<sup>212</sup> peut aussi être employé pour donner une mesure plus précise de la translation de L5 par rapport à S1 (Figure 16). Dans ce cas, un spondylolisthésis de moins de 50% de glissement est considéré de bas-grade alors qu’un spondylolisthésis de 50% ou plus est considéré de haut-grade. Danielson et al.<sup>38</sup> estiment que le pourcentage de glissement peut varier de  $\pm 15\%$  avec les variations de positionnement et que la variation intra- et inter-observateur peut atteindre  $\pm 16\%$ . Par contre, Timon et al.<sup>216</sup> ont montré que la reproductibilité intra- et inter-observateur pour la mesure du pourcentage de glissement était excellente, avec des coefficients de corrélation intraclasses de 0.94 et 0.89, respectivement.

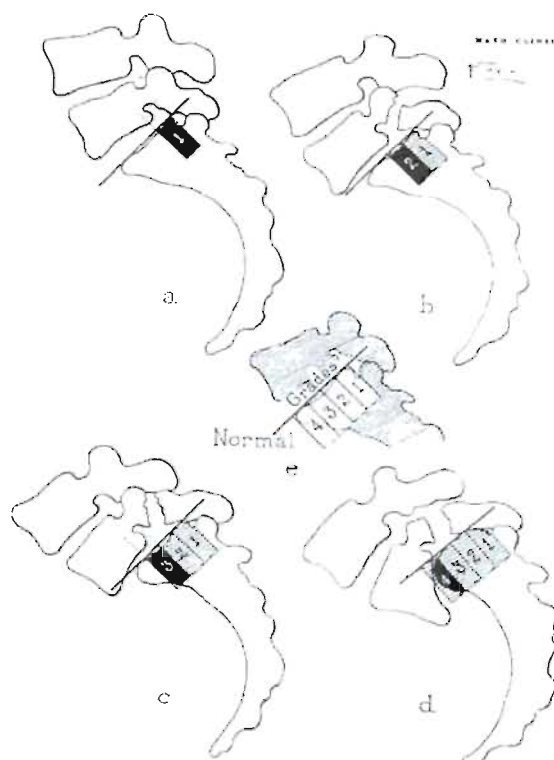


Figure 15. Mesure de la sévérité du spondylolisthésis à l'aide de la technique de Meyerding. (Meyerding, Surg Gynecol Obstet 1932)

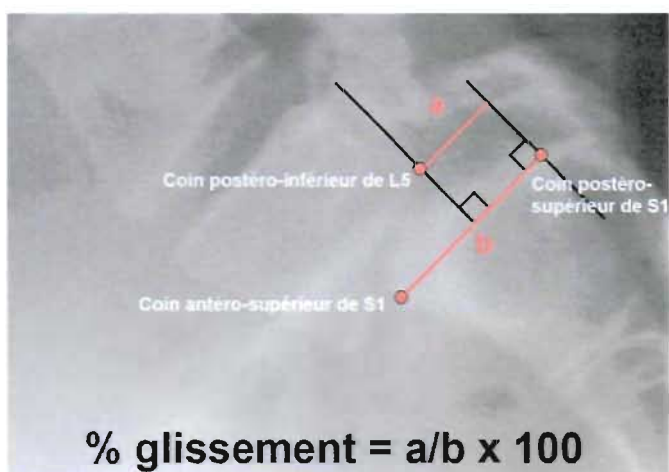


Figure 16. Mesure de la sévérité du spondylolisthésis par le pourcentage de glissement par rapport au diamètre antéro-postérieur du plateau supérieur de S1. (Taillard, Acta Orthop Scand 1954)

Un autre concept communément utilisé pour mesurer le spondylolisthésis est l'évaluation de la cyphose lombosacrée. Compte tenu des changements dysplasiques observés à L5 et S1, plusieurs techniques ont été proposées. L'angle de glissement



(slip angle)<sup>23</sup> exprime la relation entre L5 et le sacrum, telle que mesurée par l'angle entre une ligne parallèle au plateau inférieur de L5 et une ligne perpendiculaire au bord postérieur du sacrum (Figure 17-A). L'angle de glissement normal est lordotique entre  $-10^{\circ}$  et  $0^{\circ}$ ,<sup>86</sup> alors qu'il est neutre ou cyphotique dans le spondylolisthésis. Puisque le plateau inférieur de L5 est souvent irrégulier secondairement au remodelage, l'angle lombosacré proposé par Dubousset<sup>47</sup> (normale entre  $90^{\circ}$  et  $110^{\circ}$ ) peut aussi être mesuré à partir du plateau supérieur de L5 et du bord postérieur du sacrum (Figure 17-B). Pour sa part, le SDSG propose l'utilisation de l'angle entre le plateau supérieur de S1 et le plateau inférieur de L5 afin de mesurer la cyphose lombosacrée (Figure 18-A).<sup>158</sup> La normale pour cet angle est d'environ  $14 \pm 1.5^{\circ}$  en lordose.<sup>241</sup> Lorsque le remodelage est significatif à la jonction lombosacrée, résultant en un dôme sacré et une cunéiformisation de L5, le SDSG suggère plutôt la mesure de l'angle entre les plateaux supérieurs de L5 et S1 (Figure 18-B).<sup>158</sup>

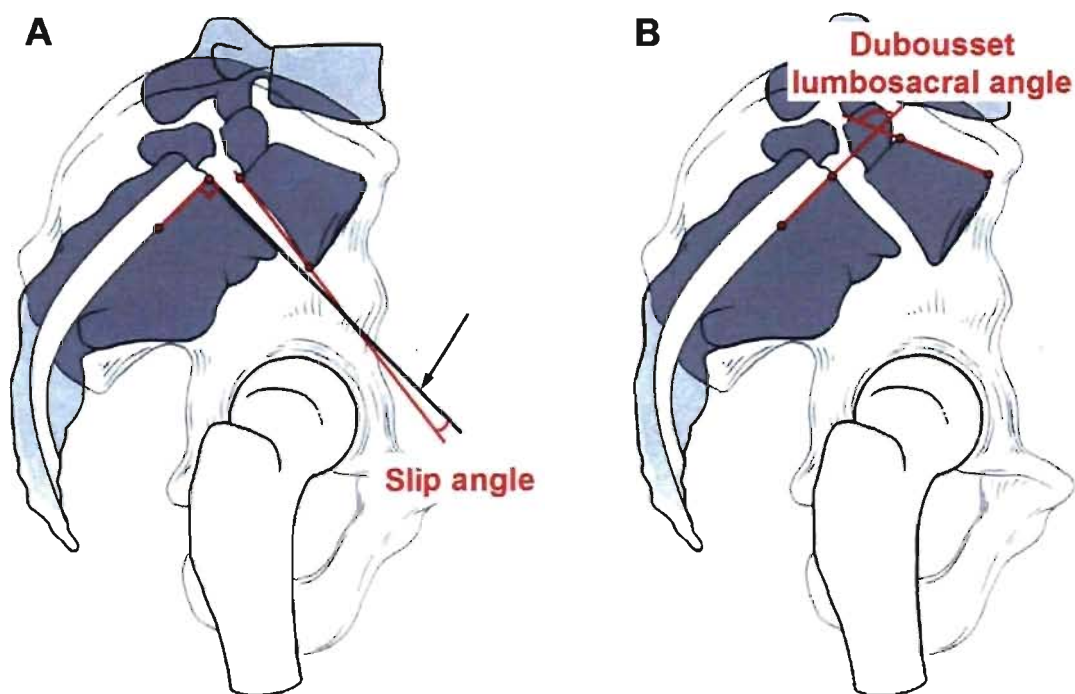


Figure 17. Mesure de la cyphose lombosacrée avec A) l'angle de glissement ("slip angle") et B) l'angle lombosacré de Dubousset ("Dubousset lumbosacral angle").

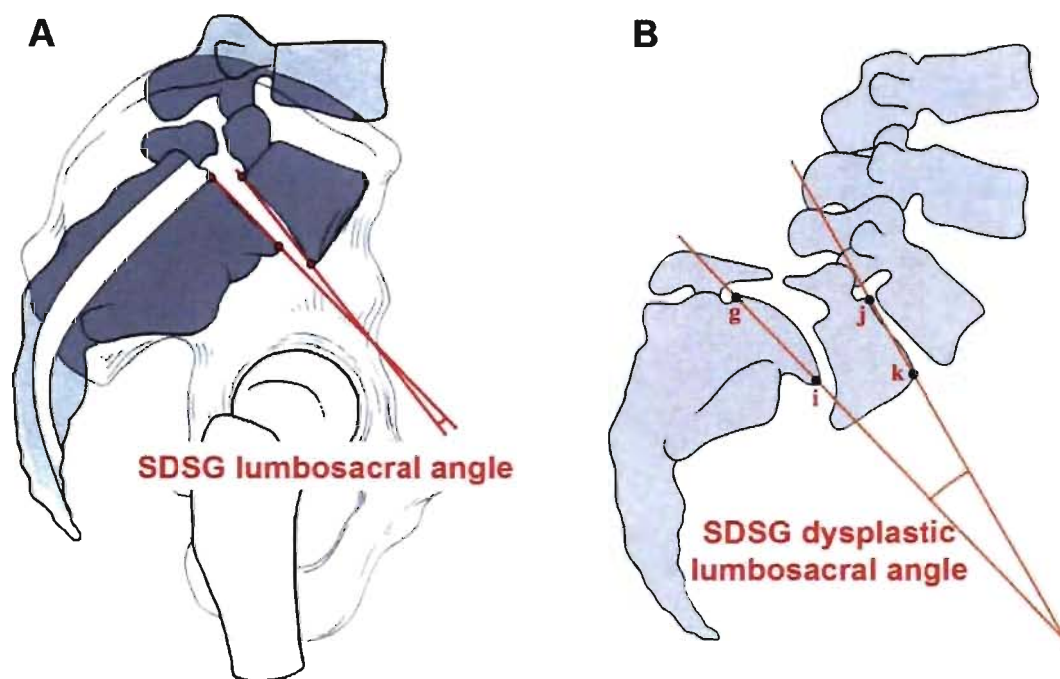


Figure 18. Mesure de la cyphose lombosacrée avec A) l'angle lombosacré SDSG ("SDSG lumbosacral angle") et B) l'angle lombosacré dysplasique SDSG ("SDSG dysplastic lumbosacral angle").

Timon et al.<sup>216</sup> ont évalué la reproductibilité de quatre techniques de mesure de la cyphose lombosacrée dans le spondylolisthésis: l'angle de glissement, l'angle lombosacré de Dubousset, l'angle de cyphose (entre le plateau supérieur de L5 et le plateau inférieur de S1) et la rotation sagittale (entre le mur postérieur de S1 et le mur antérieur de L5). Cependant, ils n'ont pas évalué les techniques proposées par le SDSG. Ils ont observé une excellente reproductibilité intra-observateur pour les quatre paramètres testés (ICCs entre 0.73 et 0.92). Par contre, la reproductibilité inter-observateur était moins élevée. Alors qu'elle était bonne pour l'angle de glissement (ICC=0.57), l'angle de cyphose (ICC=0.45) et la rotation sagittale (ICC=0.60), la reproductibilité inter-observateur était pauvre pour l'angle lombosacré de Dubousset (ICC=0.08). Ce dernier résultat est suspect puisqu'on pourrait s'attendre à ce que la reproductibilité de l'angle lombosacré de Dubousset soit au moins équivalente à l'angle de glissement puisque la seule différence technique concerne l'identification du plateau supérieur de L5 qui est plus facile à identifier que le plateau inférieur de L5

qui peut être dysplasique. Par ailleurs, leur étude a été réalisée principalement sur des sujets avec un spondylolisthésis de bas-grade, ce qui limite la portée de leur conclusion pour le spondylolisthésis de haut-grade.

### 1.6.2 Évaluation de la dysplasie à L5 et S1

La dysplasie des éléments postérieurs peut être évaluée sur les radiographies AP et LAT. De façon qualitative, la dysplasie des lames, des facettes, de la pars interarticularis et la présence d'un spina bifida peuvent être notées. La surface des apophyses transverses à L5 peut être mesurée sur la vue AP de Ferguson (Figure 19), tel que proposé par Molinari et al.<sup>144</sup> Cette valeur a été démontrée comme étant importante au point de vue pronostique dans le traitement chirurgical des spondylolisthésis de haut-grade.<sup>144</sup>

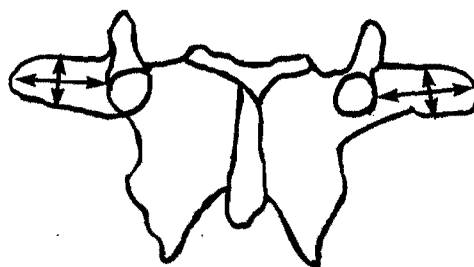


Figure 19. Mesure de la surface des apophyses transverses à L5 sur la vue de Ferguson. (Molinari et al., Spine 1999)

En antérieur, la dysplasie à L5 est le plus souvent mesurée à partir de l'index lombaire (Figure 13).<sup>222</sup> La reproductibilité intra- et inter-observateur de ce paramètre est relativement bonne, avec des ICCs de 0.51 et 0.41, respectivement.<sup>216</sup> En ce qui a trait au dôme sacré, le SDSG propose de mesurer le pourcentage de hauteur du dôme par rapport à la longueur sagittale du plateau sacré (Figure 20).<sup>158</sup> Récemment, Mac-Thiong et al.<sup>130</sup> ont évalué la reproductibilité et la validité clinique de cette technique. La reproductibilité intra- et inter-observateur était excellente, avec des ICCs à 0.91 et 0.88, respectivement. Par ailleurs, ils suggèrent un critère de 25% pour différencier entre un dôme significatif et un dôme non significatif au point de vue clinique.

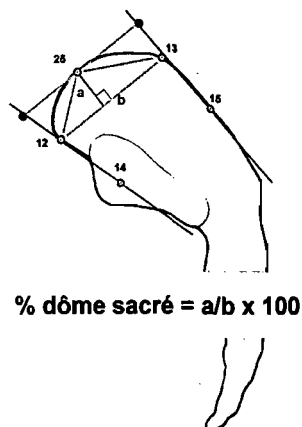


Figure 20. Technique de mesure du dôme sacré proposée par le SDSG. (O'Brien et al., Medtronic Sofamor Danek 2004)

### 1.6.3 Évaluation de la morphologie et de l'orientation sacro-pelvienne

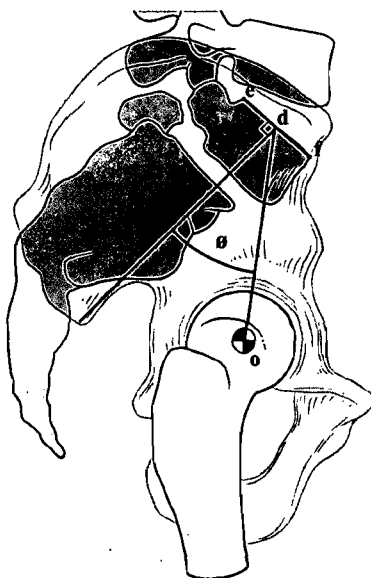
During et al.<sup>48</sup> ont été les premiers à suggérer l'évaluation de la morphologie sacro-pelvienne dans les pathologies rachidiennes à partir de la radiographie LAT. Ils ont décrit l'angle pelvisacré représenté par l'angle entre la tangente au plateau sacré et la ligne joignant le centre des têtes fémorales au centre du plateau sacré. Plus tard, Duval-Beaupère et al.<sup>49</sup> ont introduit l'incidence pelvienne (Figure 1) qui est en fait l'angle complémentaire de l'angle pelvisacré de During et al.<sup>48</sup> Jackson et al.<sup>95</sup> ont ensuite proposé la mesure de la lordose pelvienne entre la tangente au plateau sacré et la ligne joignant le centre des têtes fémorales et le coin postéro-supérieur de S1. Jackson et al.<sup>97</sup> ont récemment démontré que la reproductibilité était similaire pour les trois techniques décrites pour la mesure de la morphologie sacro-pelvienne. La reproductibilité de la mesure d'incidence pelvienne a été démontrée comme étant excellente autant avec la technique manuelle que la technique assistée par ordinateur<sup>14,175</sup> et ce, même pour les sujets avec un spondylolisthésis de haut-grade.<sup>229</sup> Boulay et al.<sup>21</sup> ont même démontré que la mesure radiologique de l'incidence pelvienne reproduisait fidèlement la mesure anatomique réelle.

La radiographie LAT peut aussi être utilisée pour évaluer la morphologie sacrée. Parmi les plus utilisés, citons l'angle de table sacré<sup>91</sup> (Figure 10), la cyphose sacrée,<sup>5</sup> et les paramètres sacrés décrits par Marty et al.<sup>135</sup> (angle sacré, angle sacro-coccygéen,

angle S1 supérieur et angle S2 inférieur). Cependant, ces paramètres restent encore peu connus puisque leur pertinence clinique et leur reproductibilité restent encore à déterminer.

Pour évaluer l'orientation sacro-pelvienne dans la vue LAT, les paramètres les plus utilisés sont la pente sacrée et la version pelvienne (Figure 1). L'avantage principal de ces deux mesures est que la somme arithmétique de ces deux paramètres égalent l'incidence pelvienne. Des études publiées<sup>14,175</sup> ont aussi rapporté une excellente reproductibilité pour ces deux mesures.

Récemment, la mesure de l'incidence de L5 (Figure 21) a été proposée dans l'évaluation postopératoire des patients atteints de spondylolisthésis de haut-grade.<sup>110,179</sup> Labelle et al.<sup>110</sup> suggèrent qu'après la chirurgie, puisque L5 est fusionnée au sacrum, celle-ci devient partie intégrante du bassin et l'incidence de L5 devient alors un paramètre morphologique fixe similaire à l'incidence pelvienne. Cependant, la pertinence clinique de cet indice par rapport à la mesure de la cyphose lombosacrée reste encore à prouver.



The L5-Coxolumbar Angle ( $\theta$ ) in concept is similar to pelvic incidence. However, unlike pelvic incidence, which is a fixed anatomic relationship between the sacrum and the acetabulum, the L5-Coxolumbar Angle is subject to change, being influenced by the position in space of the mobile L5 vertebra. It is defined as the angle subtended between the "L5 radius" ( $d$ ) and a line perpendicular to the superior L5 endplate ( $a$ ) drawn from its center ( $c$ ).

Figure 21. Mesure de l'incidence de L5 entre la perpendiculaire du plateau supérieur de L5 et la ligne joignant le centre des têtes fémorales et le milieu du plateau supérieur de L5. (O'Brien et al., Medtronic Sofamor Danek 2004)

#### 1.6.4 Évaluation de la géométrie rachidienne

La géométrie rachidienne peut être évaluée à partir des vues PA et LAT longue cassette montrant tout le rachis et le bassin. Sur la vue PA, la présence d'une scoliose est mesurée à l'aide de l'angle de Cobb.<sup>32</sup> Sur la vue LAT, la cyphose thoracique et la lordose lombaire sont mesurées, habituellement avec la technique modifiée de Cobb. Le plus souvent, la cyphose thoracique et la lordose lombaire sont mesurées à partir de vertèbres limites pré-sélectionnées (technique contrainte). Par contre, il existe une grande variabilité dans la littérature et pas de consensus clair en ce qui concerne le niveau des vertèbres limites. La mesure de la cyphose thoracique a été rapportée avec différentes vertèbres limites, telles que T1-T12,<sup>70,76,93</sup> T2-T12,<sup>158</sup> T3-T12,<sup>12,225</sup> T4-T12,<sup>41,172,175</sup> ou T5-T12,<sup>103</sup> tandis que la lordose lombaire a été rapportée avec les niveaux T12-L5,<sup>168</sup> T12-S1,<sup>77,106,158,168,225</sup> L1-L5,<sup>12,41,77,168</sup> L1-S1,<sup>70,93,168</sup> ou L2-S1.<sup>56</sup>

Certains auteurs<sup>205,231</sup> utilisent plutôt une technique non contrainte dans laquelle la vertèbre limite dans la région thoracolombaire n'est pas fixe, mais correspond à la vertèbre la plus inclinée, comme dans le concept originalement proposé par Cobb<sup>32</sup> pour mesurer la scoliose. Cette technique donne l'avantage de considérer la variabilité de longueur dans les segments cyphotique et lordotique. En effet, comme l'ont montré Vaz et al.<sup>224</sup> dans la population normale, le nombre de vertèbres comprises dans les segments cyphotique et lordotique du rachis peuvent varier de façon significative. Les techniques contrainte et non contrainte n'ont jamais été comparées entre elles dans la littérature. La variabilité usuelle de la technique de Cobb modifiée est d'environ 5° à 10°.<sup>30,168</sup> Un des inconvénients majeurs de la technique de Cobb modifiée est que la valeur mesurée reflète uniquement l'orientation des plateaux des vertèbres limites plutôt que la géométrie globale de la courbure évaluée, ce qui fait que deux courbures complètement différentes peuvent donner la même valeur d'angle de Cobb.<sup>201,205,210,231</sup> La technique de Cobb modifiée est toutefois avantageuse puisqu'elle est simple à utiliser, facile à interpréter et permet de mesurer des angles segmentaires au niveaux désirés.

Récemment, il a été suggéré de modéliser le profil sagittal à l'aide de formes géométriques afin d'obtenir une meilleure représentation de la forme globale de la courbure, contrairement à la technique de Cobb modifiée. Berthonnaud et al.<sup>14</sup> ont proposé la technique des cercles tangents dans laquelle la cyphose thoracique et la lordose lombaire sont modélisées par deux arcs de cercles tangents à l'apex de la courbure. Cette technique donne comme résultat une valeur angulaire unique de cyphose et de lordose. Par contre, la corrélation avec la valeur de l'angle de Cobb n'a jamais été évaluée dans la littérature. La technique des cercles tangents donne une excellente reproductibilité intra- et inter-observateur avec des ICCs qui se situent entre 0.92 et 0.99.<sup>14</sup> Par contre dans cette dernière étude,<sup>14</sup> les contours des vertèbres étaient pré-marqués avant de procéder aux mesures, ce qui a certainement contribué à obtenir une reproductibilité plus élevée que ce qu'elle est en réalité. Aucune étude dans la littérature n'a directement comparé la reproductibilité de cette technique avec celle de Cobb modifiée. Par rapport à la technique de Cobb modifiée, cette technique prend en considération la forme globale de la courbure. Par contre, elle requiert l'utilisation d'un ordinateur et devient inutilisable lorsqu'il y a un bris dans la continuité de la courbure rachidienne, par exemple dans le spondylolisthésis lorsqu'on veut mesurer la lordose lombaire jusqu'à S1. Une modélisation des courbures par des ellipses a également été proposée.<sup>78</sup> Cette technique est plus précise encore mais elle est difficile à utiliser cliniquement à cause de sa complexité. Pour décrire une courbure, cette technique requiert plusieurs paramètres difficiles à interpréter, ce qui la rend peu attrayante au point de vue clinique.

Peu d'études ont documenté les courbures sagittales dans la population pédiatrique normale. Vedantam et al.<sup>225</sup> ont analysé le profil sagittal de 88 adolescents sans déformation rachidienne (âge moyen: 13±8 ans; intervalle: 10-18 ans) et ont rapporté une cyphose thoracique (T3 à T12) moyenne de 38±10° et une lordose lombaire (T12 à S1) moyenne de 64±10°. Cil et al.<sup>31</sup> ont évalué le profil sagittal de 151 enfants sans pathologie rachidienne âgés de 3 à 15 ans. Ils ont divisé les enfants en quatre groupes d'âge choisis de façon arbitraire. À l'aide d'analyse de variance (ANOVA), ils ont

remarqué que la cyphose thoracique (T1 à T12) et la lordose lombaire (L1 à S1) différaient entre les groupes, et semblaient augmenter avec l'âge. Cependant, ils n'ont pas effectué de tests post-hoc afin de déterminer précisément quels groupes différaient entre eux et n'ont pas fait d'étude de corrélation avec l'âge non plus. Auparavant, Voutsinas et MacEwen<sup>231</sup> avaient aussi étudié le profil sagittal chez 670 sujets normaux de 5 à 20 ans. Après avoir divisé les sujets en trois groupes d'âge de cinq ans, ils ont remarqué une tendance pour la cyphose thoracique et la lordose lombaire à augmenter avec l'âge. La cyphose et la lordose ont été mesurées à l'aide d'une technique non-contrainte pour laquelle seule la limite inférieure de la lordose était fixe à S1. Toutefois, aucune étude de corrélation n'a été réalisée.

### 1.6.5 Évaluation de l'équilibre sagittal global

Sur la vue PA, l'équilibre coronal est évalué par la distance horizontale entre la verticale tracée à partir du centre de C7 et S1. Sur la vue LAT, l'équilibre sagittal global est habituellement mesuré par la position de la verticale tracée à partir du centre de C7 par rapport à S1 ou aux têtes fémorales. La mesure par rapport au coin postéro-supérieur de S1 (Figure 22) est la plus utilisée et est celle recommandée par le SDSG<sup>158</sup> et par la Scoliosis Research Society (SRS).<sup>104</sup> Le plus souvent, la verticale à partir de C7 devrait tomber environ dans un intervalle de 2 cm devant ou derrière le coin postéro-supérieur de S1.<sup>104</sup> Une technique similaire (le "sagittal vertical axis") utilise plutôt le coin antéro-supérieur de S1 (Figure 23).<sup>65</sup> Afin de prendre en considération l'équilibre sacro-pelvien, Jackson et al.<sup>94</sup> ont mesuré l'équilibre sagittal global entre C7 et le centre des têtes fémorales (Figure 24).

Dans le document fourni par la SRS,<sup>104</sup> les auteurs définissent une terminologie relative à l'équilibre sagittal. Une posture équilibrée correspond au maintien d'une posture debout sans l'aide de support externe (e.g. canne, marchette), contrairement à une posture déséquilibrée pour laquelle une aide externe est requise. Dans le contexte d'une posture équilibrée, ils décrivent trois situations. Premièrement, ils décrivent la posture congruente (ou normale) pour laquelle la lordose cervicale, la cyphose thoracique et la lordose lombaire sont proportionnelles et pour laquelle la verticale à



C7 tombe à plus ou moins 2 cm devant ou derrière le coin postéro-supérieur de S1. Deuxièmement, ils définissent la posture incongruente (mais compensée) pour laquelle une des courbures sagittales du rachis est disproportionnée par rapport aux autres. Par contre, la mesure de l'équilibre sagittal entre C7 et S1 reste normale compte tenu d'une compensation du bassin, des hanches, des genoux et des segments rachidiens normaux. Dans la dernière situation d'une posture équilibrée, celle-ci peut être "décompensée" si les mécanismes de compensation ne permettent pas à la mesure du fil à plomb de tomber à l'intérieur de 2 cm du coin postéro-supérieur de S1. Afin de raffiner la terminologie de la SRS sur les différentes postures, Jackson et al.<sup>96</sup> ont proposé quatre critères précis basés sur des observations sur l'alignement sagittal de 75 adultes sains. Par contre, il n'est pas démontré que ces observations statistiques soient vraiment corrélées avec des notions et situations cliniques claires.

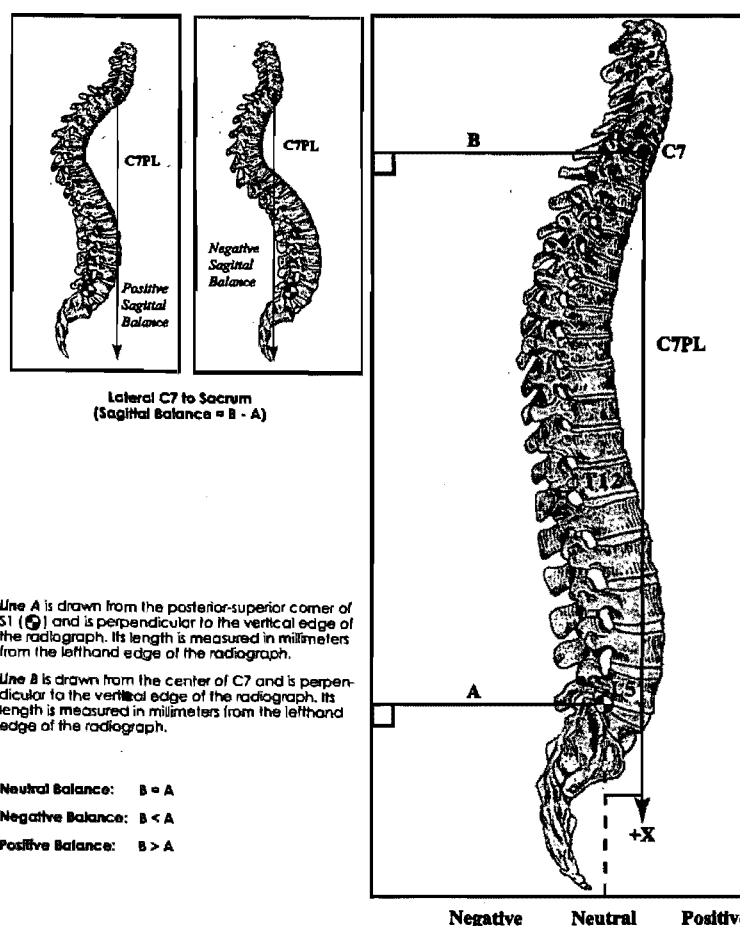


Figure 22. Mesure de l'équilibre sagittal global à partir de C7 par rapport au coin postéro-supérieur du sacrum. (O'Brien et al., Medtronic Sofamor Danek 2004)

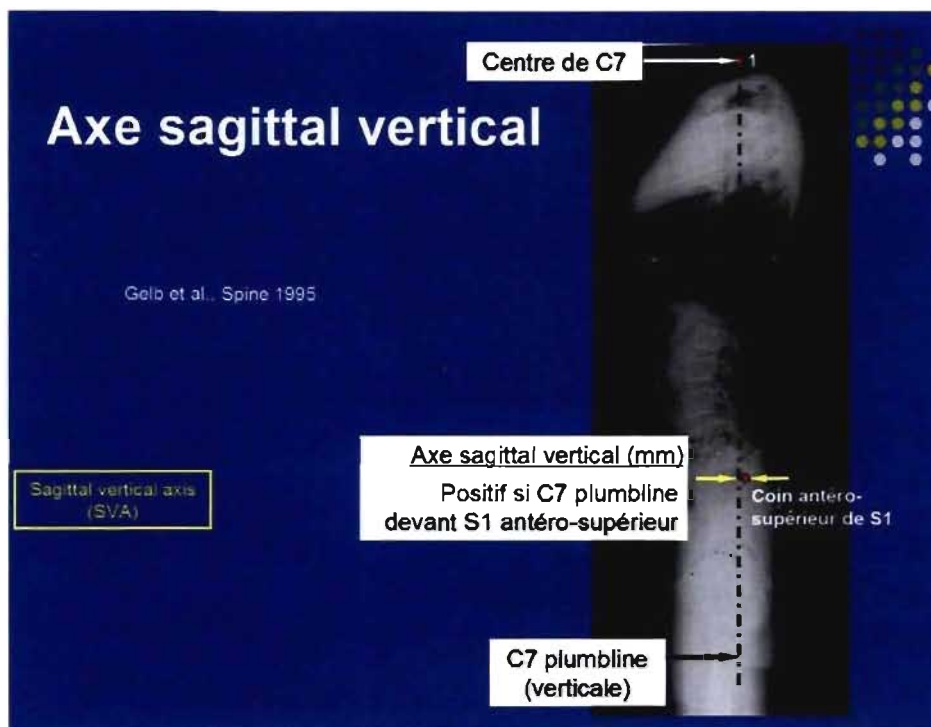


Figure 23. Mesure de l'équilibre sagittal global par rapport au sacrum par la technique de l'axe sagittal vertical. (Gelb et al., Spine 1995)

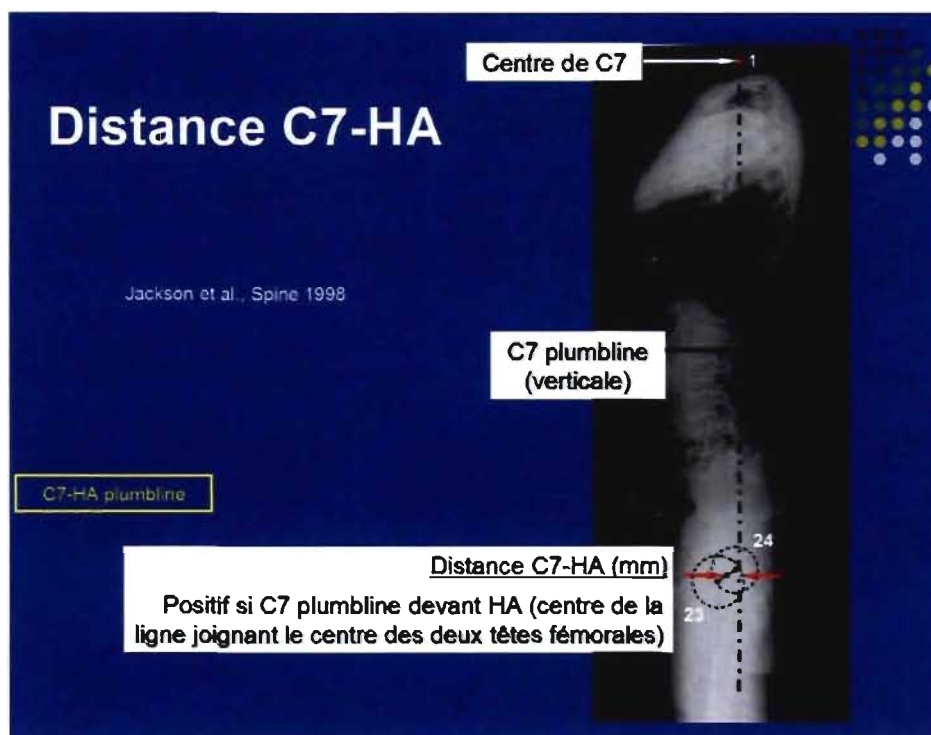


Figure 24. Mesure de l'équilibre sagittal global par rapport aux têtes fémorales à l'aide de la distance entre C7 et le milieu de la ligne joignant le centre des deux têtes fémorales (HA). (Jackson et al., Spine 1998)

Compte tenu de la variation importante dans la mesure de l'équilibre sagittal entre C7 et S1, certains auteurs<sup>173,181</sup> préfèrent mesurer l'angulation de la droite reliant C7 (ou T1) et S1 afin d'obtenir une valeur avec une variabilité plus faible (Figure 25). En fait, le concept reste le même dans le sens où on mesure quand même la relation entre C7 (ou T1) et S1, mais dans ce cas, la valeur est "normalisée" sur la hauteur du rachis, ce qui va nécessairement diminuer la valeur de l'écart-type. De façon similaire, Vialle et al.<sup>227</sup> mesurent l'angle entre la verticale et la ligne joignant le centre des têtes fémorales et T1.

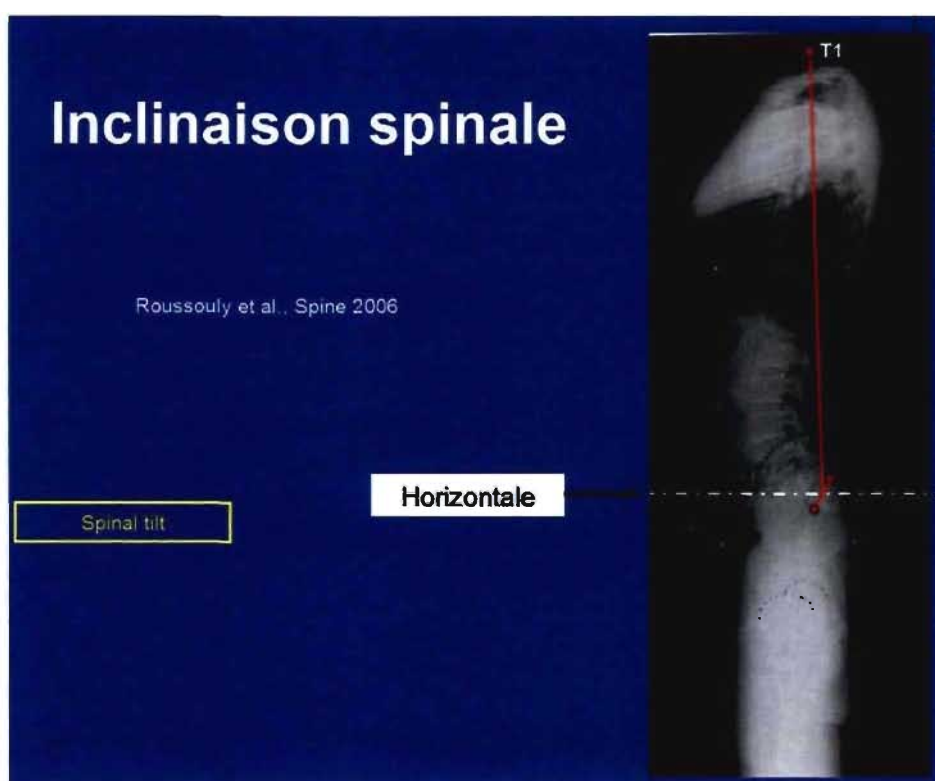


Figure 25. Mesure de l'équilibre sagittal global à l'aide de l'angle entre l'horizontale et la ligne joignant le centre du corps vertébral de T1 avec le centre du plateau supérieur de S1. (Roussouly et al., Spine 2006)

Tel que discuté dans la section 1.3.3.1, certains auteurs<sup>52,181</sup> critiquent ces techniques de mesure radiologiques car la position de la verticale à partir de C7 (ou T1) ne correspond pas nécessairement à la position du CG du corps, même si elles sont corrélées pour les adultes normaux. Roussouly et al.<sup>181</sup> suggèrent que la mesure de l'inclinaison spinale pourrait être plus efficace pour représenter la position du CG

(Figure 25). D'autres auteurs<sup>172,175,227</sup> préfèrent mesurer l'équilibre sagittal en prenant comme référence la vertèbre T9. Cette technique est basée sur les travaux de Duval-Beaupère et al.<sup>49</sup> dans lesquels ils ont évalué le centre de masse de multiples tranches corporelles de la tête aux hanches. Ceux-ci ont observé que le centre de masse global au-dessus des hanches se situait le plus souvent en avant de T9. Par contre, les mesures de Duval-Beaupère et al.<sup>49</sup> ont été prises en position couchée et n'incluent pas la masse des membres inférieurs, deux éléments qui sont considérés dans l'évaluation du CG. Par ailleurs, il n'existe pas d'étude ayant analysé la corrélation entre la position du CG et les mesures radiographiques d'équilibre sagittal à partir de T9 ou par rapport aux têtes fémorales.

### **1.7 Examens radiologiques complémentaires**

Un CT scan peut être utile pour évaluer la dysplasie des éléments postérieurs, particulièrement lorsqu'aucun spondylolyse n'est observé sur les radiographies simples.<sup>68</sup> Des images par CT scan sont inestimables en pré-opératoire afin d'évaluer les structures osseuses à la jonction lombosacrée et le degré de sténose spinale. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) peut être demandée en présence d'atteinte neurologique pour identifier la cauda equina ou les racines nerveuses et pour évaluer les anomalies médullaires telles qu'une moelle insérée basse ou un lipôme du filum terminale. Dans un spondylolisthésis de haut-grade, une IRM pré-opératoire est recommandée dans le but d'évaluer les structures neurologiques ainsi que l'état des disques intervertébraux.

La cartographie osseuse peut s'avérer utile pour différencier une fracture aiguë de la pars interarticularis d'une fracture de longue date.<sup>124</sup> Elle peut également aider à distinguer les patients avec une nonunion établie du spondylolyse de ceux pour qui une guérison est encore possible et qui pourraient bénéficier d'un traitement conservateur par immobilisation.<sup>223</sup> Le SPECT ("single photon emission tomography") pourrait être encore plus sensible et spécifique que la cartographie osseuse dans la détection d'un spondylolyse.<sup>11,34,125</sup>

## **1.8 Traitement du spondylolisthesis**

### **1.8.1 Traitement non-chirurgical**

Le traitement non chirurgical demeure le traitement de choix dans les spondylolisthesis de bas-grade, avec de bons ou excellents résultats chez la majorité des patients.<sup>60,196</sup> Les individus asymptomatiques avec une découverte fortuite d'un spondylolyse ou d'un spondylolisthesis bas-dysplasique de bas-grade ne nécessite aucun traitement particulier ni restriction dans les activités. Les enfants présentant un spondylolisthesis développemental devrait subir des radiographies répétées jusqu'à maturité osseuse. La fréquence des radiographies peut être augmentée lorsque l'enfant devient symptomatique.

Le traitement non chirurgical des symptômes aigus comprend principalement du repos, de la physiothérapie (renforcement musculaire lombaire et abdominal), des étirements des ischio-jambiers, des anti-inflammatoires non-stéroïdiens et des analgésiques au besoin. Les patients qui présentent une captation accrue à la cartographie osseuse au niveau des pars interarticularis peuvent parfois subir une guérison de leur spondylolyse suite au traitement par corset.<sup>206,208,211</sup> Shipley et al.<sup>197</sup> suggèrent qu'un échec de guérison de la pars interarticularis serait possiblement dû à la présence de liquide synovial provenant des articulations facettaires adjacentes.

Un corset antilordotique (lordose neutre) peut donner des bons ou excellents résultats chez la majorité des patients avec un spondylolisthesis de bas-grade,<sup>10,44,166,208</sup> contrairement aux patients avec un spondylolisthesis de haut-grade.<sup>166</sup> L'immobilisation plâtrée a également été utilisée avec succès pour traiter le spondylolyse aigu.<sup>47</sup> Un corset peut aussi être proposé à certains patients symptomatiques atteints de spondylolyse chronique afin de réduire la douleur.<sup>47</sup>

Dans la littérature, il n'existe aucune étude sur le lien entre la morphologie sacro-pelvienne et le résultat du traitement non chirurgical. Il n'existe pas non plus d'étude sur l'équilibre sagittal global durant le traitement par corset pour le spondylolisthésis.

## 1.8.2 Traitement chirurgical

### 1.8.2.1 *Spondylolyse et spondylolisthésis de bas-grade*

Dans le spondylolyse avec un spondylolisthésis absent ou minime, une réparation directe de la pars interarticularis avec greffe osseuse peut être considérée<sup>28,101,218,242</sup> afin de préserver la mobilité du rachis et prévenir les contraintes additionnelles aux niveaux adjacents.<sup>142</sup> De bons résultats peuvent être envisagés chez les patients bien sélectionnés.<sup>6,24,28,67,98,101,161,177,242</sup> Le défaut de la pars devrait être inférieur à 3 mm ou 4 mm.<sup>28</sup> Les patients les mieux adaptés pour cette technique sont ceux qui ont moins de 30 ans et qui présentent une lombalgie incapacitante malgré un traitement conservateur adéquat, avec un soulagement temporaire de la douleur après une infiltration de la pars, des disques normaux et une hypercaptation à la cartographie osseuse.<sup>157,242</sup> Une réparation d'un spondylolyse chronique avec une cartographie osseuse négative peut également être bénéfique dans certains cas, à condition que les disques soient normaux à l'IRM. Cependant, une récente étude<sup>192</sup> ne semble pas montrer de bénéfice significatif des techniques de réparation directe de la pars interarticularis par rapport à la fusion in situ. Par contre, il y a une faiblesse considérable dans cette étude rétrospective puisque les indications chirurgicales n'étaient pas définies, alors qu'une sélection méticuleuse des patients est indispensable pour le succès des techniques de réparation directe de la pars.

Dans le spondylolisthésis de bas-grade, la fusion in situ postéro-latérale avec ou sans instrumentation représente le traitement chirurgical de choix. Elle donne des résultats prédictibles quant au taux de fusion (plus de 80%) et au soulagement de la douleur (plus de 75% de soulagement) et ce, avec une morbidité minimale.<sup>18,60,80,156,226</sup> L'addition d'une instrumentation n'a pas démontré qu'elle augmentait le taux de

fusion ou le résultat fonctionnel,<sup>146</sup> mais permet une mobilisation plus précoce sans corset.

### ***1.8.2.2 Spondylolisthesis de haut-grade***

Certains auteurs ont obtenu des résultats satisfaisants avec la fusion postérolatérale in situ pour le spondylolisthesis de haut-grade, mais le résultat reste souvent imprévisible et le risque de pseudarthrose ou de progression peut être aussi élevé que 50% dans certaines études.<sup>23,69,75,99,119,144,170,195,207</sup> Lorsqu'une fusion in situ postérolatérale est effectuée, l'extension proximale de la fusion à L4 est recommandée dans le but d'éviter de placer la masse de fusion sous tension.<sup>69,86</sup> Newton et Johnston<sup>156</sup> ont trouvé que la qualité de la fusion était corrélée avec le résultat fonctionnel et qu'un mauvais résultat était plus fréquent lorsque la cyphose lombosacrée était sévère. De plus, les patients avec une dysplasie significative des éléments postérieurs ou avec des petites apophyses transverses à L4 et L5 pourraient être des mauvais candidats pour une fusion in situ seulement, principalement à cause de la surface réduite pour la fusion postérolatérale.<sup>144</sup> Molinari et al.<sup>144</sup> ont observé que la dimension des apophyses transverses de L4 et L5 deviennent critiques lorsque leur surface mesurée à partir de la vue AP de Ferguson est inférieure à 2 cm<sup>2</sup>.

Afin de minimiser le risque de pseudarthrose et de progression associées à la fusion postérolatérale in situ, différentes techniques ont été proposées. La fusion antérieure in situ isolée a été tenté mais résulte en un risque de pseudarthrose plus élevé lorsque comparé à la fusion circonférentielle.<sup>122,150</sup> Dans une étude avec suivi de plus de 10 ans comparant trois techniques de fusion in situ pour spondylolisthesis pédiatrique de haut-grade, Helenius et al.<sup>81</sup> ont montré que la fusion circonférentielle donnait de meilleurs résultats que la fusion postérolatérale seule ou la fusion antérieure seule au point de vue clinique, radiologique et qualité de vie. Par contre, le groupe ayant subi une fusion circonférentielle présentait en moyenne un spondylolisthesis plus sévère avant la chirurgie, ce qui constitue un biais important pour cette étude.

La nécessité de réduire le spondylolisthesis de haut-grade reste controversée. La réduction d'un spondylolisthesis de haut-grade présente plusieurs avantages potentiels par rapport à la fusion in situ.<sup>27</sup> Premièrement, elle permet une décompression directe des structures neurologiques en réduisant la sténose spinale et foraminale.<sup>185</sup> Deuxièmement, elle corrige la cyphose lombosacrée, permettant ainsi une amélioration de l'équilibre sagittal spino-pelvien, de la démarche, de la biomécanique et de l'apparence physique. Troisièmement, la réduction peut favoriser les propriétés biomécaniques reliées à la fusion en diminuant la tension dans la masse de fusion. Finalement, la réduction peut prévenir le risque de syndrome de queue de cheval en postopératoire immédiat. Il n'existe que peu d'évidence dans la littérature supportant les avantages théoriques de la réduction dans le spondylolisthesis de haut-grade. Par contre, la majorité des chirurgiens pensent que la réduction doit être fortement considérée chez les patients pédiatriques avec spondylolisthesis de haut-grade lorsque la cyphose lombosacrée est marquée.<sup>134</sup> Récemment, Poussa et al.<sup>171</sup> ont tenté d'évaluer la pertinence à long terme de la réduction du spondylolisthesis de haut-grade dans une étude rétrospective sur 22 patients. La moitié des patients ont subi une réduction partielle de leur spondylolisthesis avec une fusion circonférentielle et une instrumentation postérieure alors que l'autre moitié ont subi une fusion in situ antérieure ou postérolatérale sans instrumentation. Les auteurs rapportent une meilleure qualité de vie et moins de dégénérescence discale sus-jacente à l'IRM avec la fusion in situ. Toutefois, plusieurs éléments limitent la validité de leur étude en plus du petit nombre de patients impliqués dans l'étude. Premièrement, il existe un biais de sélection des patients compte tenu qu'il n'y avait pas de critères de sélection initialement définis pour chaque technique. Deuxièmement, la sévérité du spondylolisthesis était plus importante avant la chirurgie dans le groupe avec réduction, ce qui peut expliquer les résultats inférieurs concernant la qualité de vie. Troisièmement, puisque c'est une étude rétrospective, il n'y a aucune information pré-opératoire sur la qualité de vie ou sur l'état des disques intervertébraux afin de comparer avec les valeurs post-opératoires. Finalement, la qualité de la réduction dans cette étude est inférieure à ce qui est rapporté dans la littérature actuelle.



Présentement, plusieurs chirurgiens<sup>4,19,134,144,145</sup> suggèrent la nécessité d'une fusion circonférentielle lorsqu'une réduction est effectuée parce qu'elle procure une meilleure distribution des charges ("load sharing") à la jonction lombosacrée, une stabilité accrue et une surface élargie pour la fusion. La plupart des chirurgiens préfèrent étendre proximale la fusion et la fixation à L4 lorsqu'une réduction est effectuée,<sup>108,144,199</sup> même si des résultats satisfaisants ont aussi été obtenus avec une fixation proximale à L5 dans certaines études.<sup>53,74,183,199</sup> De plus, la protection des vis sacrées à l'aide de vis iliaques est généralement recommandée après la réduction même si un support antérieur est utilisé, dans le but de diminuer le risque de bris d'instrumentation.<sup>107,144,199</sup> Même si les cages intervertébrales et les vis iliaques augmentent toutes deux la rigidité de façon multidirectionnelle à la jonction lombosacrée,<sup>35</sup> des essais biomécaniques ont montré que les vis iliaques sont plus résistantes que les cages intervertébrales. En outre, il a été démontré que biomécaniquement l'installation d'une cage ajoute peu à la solidité des vis iliaques.<sup>35</sup> Un support antérieur ne semble donc pas requis pour tous les cas, notamment lorsqu'une fixation iliaque est utilisée et que l'équilibre spino-pelvien et la biomécanique sont restaurés après la réduction. Conformément à cela, Dubousset<sup>47</sup> recommande l'ajout d'un support antérieur à la fusion postérieure uniquement lorsque l'angle lombosacré reste inférieur à 100° après la réduction.

### ***1.8.2.3 Spondyloptose***

Dans les cas de spondyloptose, trois options ont le plus souvent été proposées : 1) une décompression postérieure, une fusion antérieure à l'aide d'un péroné inséré par voie postérieure et une fusion in situ postéro-latérale,<sup>17,203</sup> 2) une décompression postérieure avec une réduction instrumentée graduelle et une fusion postérolatérale,<sup>2,50</sup> et 3) une vertébrotomie de L5 avec réduction et fusion de L4 au sacrum.<sup>62,63,117</sup> Toutes ces options de traitement peuvent être associées à des complications majeures, incluant des atteintes motrices et sensitives ou un syndrome de queue de cheval.

#### ***1.8.2.4 Effet de la chirurgie sur l'équilibre spino-pelvien***

Labelle et al.<sup>108</sup> ont étudié rétrospectivement l'alignement spino-pelvien et le résultat chirurgical de 66 patients atteints de spondylolisthésis développemental et traités par réduction partielle et fusion postérolatérale. L'incidence pelvienne est restée inchangée après la chirurgie, mais la pente sacrée a augmenté et la version pelvienne a diminué significativement après la chirurgie. Le pourcentage de glissement, l'incidence à L5, la cyphose lombosacrée et la lordose lombaire ont diminué de façon marquée suite au traitement chirurgical. La cyphose thoracique a subi une légère mais significative hausse de 3°. En comparant les patients qui ont bien évolué (groupe A, 59 patients) et ceux pour qui le résultat était moins bon (groupe B, 7 patients), les auteurs ont noté les différences suivantes: 1) le pourcentage de glissement pré-opératoire était plus sévère dans le groupe B de 16° en moyenne et 2) le pourcentage de glissement, l'incidence à L5 et la cyphose lombosacrée post-opératoires étaient plus sévères dans le groupe B. Malgré deux limites importantes (petit nombre de patients dans le groupe B et pourcentage de glissement différent en pré-opératoire), cette étude est la première à documenter les changements dans l'équilibre sacro-pelvien secondaires à la chirurgie et suggère l'importance de la correction de la cyphose lombosacrée.

Pour leur part, Sailhan et al.<sup>185</sup> ont évalué rétrospectivement 41 patients opérés par réduction, instrumentation et fusion postérieure ou combinée sans décompression pour un spondylolisthésis de haut-grade. Contrairement à Labelle et al.,<sup>108</sup> la pente sacrée et la version pelvienne n'ont pas subi de changement significatif suite à la chirurgie, même si leur cohorte semblait présenter des caractéristiques similaires en pré- et post-opératoire concernant le pourcentage de glissement, la cyphose lombosacrée et l'incidence à L5.

Finalement, il n'existe pas d'étude dans la littérature ayant évalué l'équilibre spino-pelvien global ou le CG des patients opérés pour un spondylolisthésis.

## Chapitre 2 - Objectifs et hypothèses

### 2.1 Résumé de la problématique

Durant les dernières années, certaines études<sup>13,96,116,135,173,227</sup> ont montré que la morphologie sacro-pelvienne chez les adultes normaux influence non seulement le rachis lombosacré qui lui est intimement lié, mais également tout le rachis et par conséquent, la posture globale des individus. Or, le maintien d'une posture équilibrée (avec un équilibre sagittal global adéquat) permet de minimiser les dépenses énergétiques.<sup>13,42,49</sup>

Par ailleurs, plusieurs auteurs<sup>36,48,73,97,109,135,173,233</sup> suggèrent un lien entre la morphologie sacro-pelvienne et le spondylolisthesis développemental. De façon surprenante, il n'existe que très peu d'informations sur le lien entre la morphologie sacro-pelvienne et l'équilibre sagittal global chez ces patients. Par conséquent, les mécanismes qui régulent cet équilibre spino-pelvien restent en grande partie inconnus dans le spondylolisthesis. En particulier, nous ne savons pas encore en ce moment si l'évaluation de l'équilibre global chez nos patients est importante en pratique ou s'il est suffisant d'évaluer localement les régions lombosacrée et sacro-pelvienne. De plus, parmi tous les paramètres sacro-pelviens proposés, nous ne savons même pas lesquels sont vraiment pertinents cliniquement dans l'évaluation du spondylolisthesis. C'est pourquoi la majorité des cliniciens préfèrent encore évaluer uniquement la déformation locale du spondylolisthesis au niveau lombosacré, sans vraiment tenir compte de la morphologie sacro-pelvienne ni de l'équilibre sagittal du rachis dans le suivi et le traitement des patients. Pour pouvoir répondre à toutes ces questions, il faudrait bien comprendre le lien entre toutes les composantes des segments adjacents spino-pelviens (c.f. thoraco-lombo-sacro-pelviens) et donc l'équilibre sagittal global. De cette façon, nous serions aussi en mesure de déterminer pourquoi certains patients se présentent avec un déséquilibre postural et d'autres pas. En outre, une meilleure compréhension de l'équilibre sagittal, autant chez les sujets normaux que dans le

spondylolisthésis nous permettrait dans le futur de mieux définir nos stratégies de traitement dans le but d'obtenir une posture équilibrée.

## **2.2 Objectif global**

Puisque les connaissances actuelles sont très limitées au sujet du lien entre la morphologie sacro-pelvienne et l'équilibre sagittal spino-pelvien, ce projet vise principalement à développer un modèle postural du spondylolisthésis en décrivant les relations qui existent entre les différents segments anatomiques spino-pelviens. En d'autres termes, cette thèse vise à étudier les relations spino-pelviennes dans le plan sagittal autant chez les sujets normaux que ceux atteints de spondylolisthésis pour qu'ultimement, les stratégies de traitement puissent être adaptées afin d'obtenir une posture équilibrée.

## **2.3 Hypothèses**

Plusieurs hypothèses doivent être vérifiées successivement avant d'obtenir un modèle fiable pouvant décrire l'équilibre spino-pelvien sagittal dans le spondylolisthésis pédiatrique.

Hypothèse 1 : Les mesures radiologiques spino-pelviennes sagittales sont suffisamment fiables et reproductibles pour évaluer les différents segments anatomiques spino-pelviens.

Hypothèse 2 : L'équilibre spino-pelvien demeure constant durant la croissance.

Hypothèse 3 : L'équilibre spino-pelvien dépend de l'interdépendance entre les segments anatomiques adjacents spino-pelviens.

Hypothèse 4 : L'équilibre spino-pelvien est différent entre les sujets sains et ceux atteints de spondylolisthésis.

## **2.4 Objectifs spécifiques**

Les paragraphes suivants décrivent les objectifs spécifiques qui seront traités dans les articles afin de vérifier les hypothèses correspondantes.

Objectif 1 : Validation des paramètres utilisés pour évaluer les segments spino-pelviens.

Certains paramètres spino-pelviens ont déjà été évalués dans la littérature. D'autres paramètres n'ont par contre pas été évalués de façon rigoureuse. Puisque différentes techniques d'évaluation de cyphose thoracique et de lordose lombaire sont utilisées dans cette thèse, il faut premièrement s'assurer que les mesures soient significativement corrélées entre elles. Deuxièmement, les différentes techniques de mesure de la cyphose lombosacrée utilisées dans la littérature sont comparées. Il est important de s'assurer que la reproductibilité de ces paramètres est adéquate autant pour les sujets normaux que pour les sujets présentant un spondylolisthésis léger ou sévère. Pour vérifier l'hypothèse 1, les paramètres utilisés doivent démontrer une excellente reproductibilité intra- et inter-observateur, avec des coefficients de corrélation intra-classe (ICC) supérieurs à 0.75.<sup>198</sup>

Objectif 2 : Évaluation de la morphologie sacro-pelvienne et de l'équilibre spino-pelvien durant la croissance.

Les changements dans la morphologie sacro-pelvienne et dans l'équilibre spino-pelvien durant la croissance demeurent mal documentés dans la littérature. Cet objectif vise donc à évaluer les changements posturaux qui se produisent durant la croissance chez les enfants normaux. Cette partie est indispensable pour mieux comprendre de quelle façon l'enfant fait pour maintenir une posture équilibrée malgré les changements morphologiques importants subis durant la croissance. Pour vérifier l'hypothèse 2, il faut montrer que les différents paramètres spino-pelviens varient de façon linéaire en fonction de l'âge sans bris évident dans leur progression. Au niveau statistique, des coefficients de corrélation entre les différents paramètres spino-pelviens et l'âge seront calculés selon un seuil de signification de 0.01 compte tenu

des nombreux tests effectués.

Objectif 3 : Évaluation des relations entre les segments anatomiques adjacents spino-pelviens.

Selon la troisième hypothèse, chaque étage du rachis thoraco-lombo-sacré et du bassin est relié à son segment anatomique adjacent afin de donner une posture équilibrée. Pour vérifier cette hypothèse, il faut donc premièrement déterminer les paramètres à sélectionner pour évaluer les différents étages du rachis thoracolumbosacré et du bassin. Par la suite, il faut évaluer les liens entre tous les étages adjacents avant de proposer un modèle postural sagittal. Les coefficients de corrélation seront interprétés selon un seuil de signification statistique de 0.01, compte tenu des nombreux tests effectués. Par ailleurs, la signification clinique des corrélations sera évaluée à partir des recommandations de Cohen<sup>33</sup> pour les études cliniques:  $\geq 0.5$  pour une forte corrélation,  $\geq 0.3$  pour une corrélation modérée, et  $\geq 0.1$  pour une corrélation faible. Dans le modèle postural, pour être considérés comme étant significatifs au point de vue clinique, les coefficients de corrélation devront donc être égaux ou supérieurs à 0.3, et être significatifs au point de vue statistique.

Objectif 4 : Élaboration d'un modèle postural de l'équilibre spino-pelvien pour le spondylolisthésis.

Afin d'atteindre cet objectif relié à l'hypothèse 4, il faut comparer l'équilibre spino-pelvien global et les différents paramètres spino-pelviens entre les sujets atteints de spondylolisthésis et les sujets normaux. Premièrement, l'équilibre spino-pelvien global est évalué selon un modèle postural optimisé permettant d'incorporer la déformation lombosacrée retrouvée dans le spondylolisthésis. Après avoir appliqué le modèle postural aux sujets sains et aux sujets atteints de spondylolisthésis, une analyse est faite afin de comparer les corrélations issues du modèle postural pour chaque groupe. À l'aide d'une technique similaire à celle utilisée pour l'objectif 3, les différents coefficients de corrélation décrivant les relations entre les segments adjacents spino-pelviens sont jugés significatifs cliniquement et statistiquement<sup>33</sup> si

les coefficients de corrélations trouvés sont égaux ou supérieurs à 0.3, selon un seuil de signification de 0.01.

## **2.5 Présentation des articles**

Trois articles sont inclus dans le Chapitre 3 qui vise à vérifier la fiabilité des paramètres utilisés (hypothèse 1 et objectif 1). Dans les deux premiers articles, les techniques de mesure de la cyphose thoracique et de la lordose lombaire sont évaluées. Dans le troisième article, les différentes techniques proposées pour mesurer la cyphose lombosacrée sont comparées afin de déterminer leur reproductibilité.

Dans le Chapitre 4, une étude de l'évolution des différents paramètres spino-pelviens en fonction de l'âge est effectuée. En accord avec l'hypothèse 2 et l'objectif 2, l'article présenté permet de mieux comprendre comment les paramètres spino-pelviens évoluent en fonction des changements morphologiques subis durant la croissance. Cette partie est également indispensable afin de démontrer qu'il est important dans cette étude de comparer les patients atteints de spondylolisthésis avec des sujets normaux d'âge similaire, contrairement à ce qui a été fait jusqu'ici dans la littérature, afin de prendre en considération les modifications qui surviennent durant la croissance.

Le Chapitre 5 contient un article visant à évaluer les relations entre les segments anatomiques adjacents spino-pelviens (objectif 3). Conformément à l'hypothèse 3, cet article réalisé sur des sujets normaux est effectué afin de confirmer qu'il existe effectivement des relations significatives entre les différents étages spino-pelviens. Cet article permet en plus de dresser une ébauche de modèle postural à appliquer aux sujets avec spondylolisthésis.

Le dernier chapitre (Chapitre 6) constitue le cœur de cette thèse. L'article présenté implémente le modèle postural issu du Chapitre 5 et propose un modèle postural global à partir des corrélations entre les segments adjacents spino-pelviens, en accord

avec l'hypothèse 3 et l'objectif 3. De plus, cet article répond à l'objectif 4 relatif à l'hypothèse 4, en évaluant la relation entre la géométrie de chaque segment spino-pelvien et donc l'équilibre spino-pelvien global, autant pour les sujets normaux que pour ceux atteints de spondylolisthésis.



### **Chapitre 3 – Validation des paramètres spino-pelviens**

Trois articles composent ce chapitre. Les deux premiers articles évaluent les techniques de mesure de la cyphose thoracique et de la lordose lombaire, et sont déjà publiés. Le troisième article, qui compare les différentes techniques de mesure de la cyphose lombosacrée, a été soumis à la revue *European Spine Journal* récemment. Une copie conforme de ces trois articles se retrouve dans les pages suivantes. Les tables et figures relatives au troisième article sont situées à la fin du chapitre.

*Eur Spine J* 2007;16:1325-1331

**Comparison between constrained and non-constrained Cobb techniques  
for the assessment of thoracic kyphosis and lumbar lordosis**

Mac-Thiong J-M, Pinel-Giroux F-M, de Guise JA, Labelle H

*J Spinal Disord Tech* 2006;19:507-512

**Computerized assessment of sagittal curvatures of the spine.  
Comparison between Cobb and tangent circles techniques**

Pinel-Giroux F-M, Mac-Thiong J-M, de Guise JA, Berthonnaud É, Labelle H

Soumis à *European Spine Journal* le 17 mars 2008

**Assessment of lumbosacral kyphosis in spondylolisthesis: a computer  
assisted reliability study of six measurement techniques**

Glavas P, Mac-Thiong J-M, Parent S, de Guise JA, Labelle H

## Comparison between constrained and non-constrained Cobb techniques for the assessment of thoracic kyphosis and lumbar lordosis

Jean-Marc Mac-Thiong · Fanny-Maud Pinel-Giroux ·  
 Jacques A. de Guise · Hubert Labelle

Received: 17 May 2006 / Revised: 23 August 2006 / Accepted: 11 January 2007 / Published online: 11 April 2007  
 © Springer-Verlag 2007

**Abstract** Sagittal curvatures of the spine can be assessed using the constrained or non-constrained Cobb techniques. However, there is no study that specifically compares these two techniques. The objective of this study is to assess the reproducibility and clinical relevance of the non-constrained Cobb technique (non-constrained limit vertebrae) compared to the constrained Cobb technique (constrained limit vertebrae). Standing sagittal radiographs of the spine of ten adolescents with idiopathic scoliosis, ten adolescents with spondylolisthesis and ten normal adolescents were selected. Thoracic kyphosis (TK) and lumbar lordosis (LL) were measured twice by three observers using both constrained and non-constrained Cobb techniques. Pearson's correlation coefficients, as well as intra- and inter-observer intra-class correlation coefficients (ICC) were calculated. Inter-observer ICCs were similar for TK and LL with

both techniques, ranging from 0.84 to 0.89. Intra-observer ICCs for both techniques were between 0.74 and 0.92 for TK, while they were between 0.87 and 0.97 for LL. The two techniques were highly correlated for the measurement of the TK ( $r = 0.96$ ) and LL ( $r = 0.94$ ). Computer-assisted assessment of the sagittal profile using the non-constrained Cobb technique provides excellent reproducibility. As opposed to the constrained Cobb technique, the non-constrained Cobb technique takes into account the variability in the level of transition between the TK and LL. However, adequate use of this technique requires accurate identification of the limit vertebrae in the thoracolumbar spine. Consequently, a computer-assisted technique is recommended when using the non-constrained Cobb technique.

**Keywords** Lumbar lordosis · Thoracic kyphosis · Posture · Reproducibility · Radiographic analysis · Sagittal balance · Spine

A reviewer's comment on this paper is available at  
<http://dx.doi.org/10.1007/00586-007-0315-0>.

J.-M. Mac-Thiong (✉) · H. Labelle  
 Department of Orthopaedics, Hopital Sainte-Justine,  
 3175 Cote-Sainte-Catherine, Montreal,  
 Quebec H3T 1C5, Canada  
 e-mail: [REDACTED]

J.-M. Mac-Thiong · F.-M. Pinel-Giroux ·  
 H. Labelle  
 Department of Surgery,  
 University of Montreal,  
 Montreal, QC, Canada

J. A. de Guise  
 Ecole de Technologie Superieure,  
 Automated Production Engineering,  
 Montreal, QC, Canada

### Introduction

The modified Cobb technique, inspired from the technique originally developed by Cobb [2] to assess the magnitude of scoliosis, is the most widely used technique to evaluate the thoracic kyphosis (TK) and lumbar lordosis (LL) from sagittal radiographs. The use of constrained limit vertebrae (constrained Cobb technique) is most commonly used. However, there is a high variability in the literature concerning the level of the limit vertebrae selected to measure constrained TK and LL. TK values have been reported using various constrained levels such as T1–T12 [6, 7, 10], T2–T12

[12], T3–T12 [1, 20] and T4–T12 [3, 15, 16]. LL has been measured from T12–L5 [13], T12–S1 [8, 11–13, 20], L1–L5 [1, 3, 8, 13], L1–S1 [6, 10, 13] and L2–S1 [5]. Up to now, there is no consensus in the literature on the optimal limit vertebrae to select for the measurement of constrained TK and LL.

Some authors [18, 21] have also used a non-constrained level for the limit vertebra in the thoracolumbar spine (non-constrained Cobb technique), which corresponds to the most tilted vertebra that separates the TK and LL. This vertebra is therefore used as the lower limit vertebra for the measurement of the TK and as the upper limit vertebra for the measurement of the LL, and allows the measurement of the maximal Cobb angle for TK and LL. This concept is in accordance with the original technique developed by Cobb [2], for which the limit vertebrae correspond to the most tilted vertebrae for the measurement of scoliosis on frontal plane radiographs. Also, as opposed to the constrained Cobb technique, the non-constrained Cobb technique allows complete evaluation of the entire kyphotic and lordotic segments of the spine because it takes into account the variability in length of the TK and LL. Accordingly, Vaz et al. [19] have shown that for normal individuals, the number of kyphotic and lordotic vertebral units can vary significantly.

Although there are some theoretical advantages to the use of the non-constrained Cobb technique, recent data have shown a poor inter-observer reproducibility for the manual selection of end vertebrae for scoliosis measurements [14] and suggests that the situation may be the same for sagittal plane measurements. The constrained method remains the most popular and there is no evidence in the literature confirming that measurements obtained with both techniques are comparable. This study introduces a computer-assisted technique for the assessment of TK and LL. It also compares the reproducibility and clinical relevance of the constrained and non-constrained Cobb techniques. These two techniques are evaluated for normal adolescents, as well as for subjects with adolescent idiopathic scoliosis (AIS) and with developmental spondylolisthesis.

### Materials and methods

The study design was based on the recommendations of Harrison et al. [8] intended to standardize reliability studies for measurements of radiographic parameters. Accordingly, the current study involves

30 radiographs, three observers and two measuring sessions.

### Sample description

Standing lateral radiographs of the spine of ten normal subjects, ten subjects with AIS and ten subjects with L5–S1 developmental spondylolisthesis were randomly selected. None of the patients included in this study had a history or clinical signs of hip, pelvic or lower limb disorder. All radiographs were denormalized and were taken under the same conditions: in an upright position, with the upper limbs in the fists-on-clavicle position, and the hips and knees fully extended [4, 9]. The left lateral radiographs were taken on 30 × 90 cm digital cassettes, ensuring that the two femoral heads and part of the cervical spine were included. All radiographs were stored in digital format for the measurement process.

The mean age for the normal group (6 girls, 4 boys) was  $14.6 \pm 3.5$  years. There were eight girls and two boys with AIS, and the mean age in this group was  $15.1 \pm 3.6$  years. All subjects with AIS presented a double structural thoracic and lumbar curve pattern. The mean Cobb angle for the major scoliotic curve was  $56.4 \pm 13.1^\circ$  (range  $36.7^\circ$ – $78.7^\circ$ ). As for subjects with spondylolisthesis, there were six girls and four boys, and the mean age was  $14.2 \pm 4.0$  years. This group was composed of four subjects with Meyerding grade 1 slip, three with grade 2 slip, two with grade 3 slip and one with grade 4 slip.

### Measurement technique

Two techniques of measurement were used to assess the TK and LL: the constrained Cobb technique and the non-constrained Cobb technique. All digital radiographs were assessed using the SpineView software (Surgiview, France) [11, 12]. Although only digital radiographs are used in our institution, images scanned from standard radiographs can also be used with the software. As requested by the software, all observers trace a best-fit line of all vertebral endplates from the superior endplate of T1 to the superior endplate of S1 on each measured radiograph (Fig. 1). Digitization of all vertebral endplates allows subsequent calculation of both the constrained and non-constrained techniques. In the current study, the constrained and non-constrained Cobb values were extracted from the same digitization process (from T1 to S1) on each radiograph. About 3 min is required to identify all vertebral endplates. The software

**Fig. 1** Measurements using the SpineView software. All vertebral endplates from T1 to S1 are identified by the user. Then, the software automatically provides the orientation of all identified vertebral endplates with respect to the horizontal in a new window. These data can then be copied and processed in any software in order to calculate the constrained and non constrained Cobb angle between any two vertebral endplates

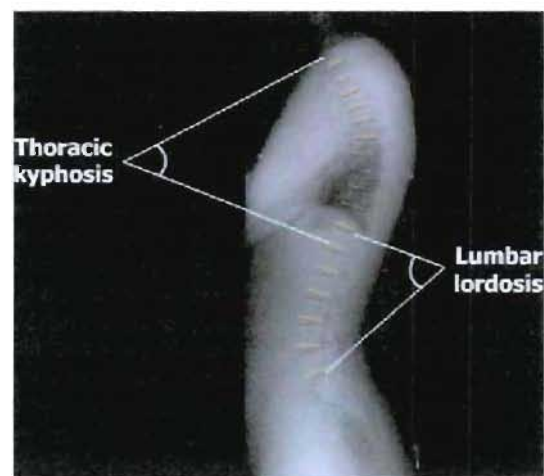


automatically provides the orientation of all identified vertebral endplates with respect to the horizontal (Fig. 1), so that a Cobb angle can be calculated between any two vertebral endplates. For the current study, calculation of constrained and non-constrained Cobb angles based on the orientation of the vertebral endplates was performed by one of the authors using another software (Microsoft Excel, Microsoft Corporation, USA).

For each subject, the TK and the LL were measured using both the constrained and the non-constrained Cobb techniques from the orientation of the vertebral endplates automatically provided by the software. For the constrained Cobb technique, the TK was measured between the superior endplate of T1 and the inferior endplate of T12, while the LL was measured between the superior endplate of L1 and the superior endplate of S1.

To assess the TK using the non-constrained Cobb technique (Fig. 2), all Cobb angles between the superior endplate of T1 and the inferior endplate of T2 to L5 were calculated, because the level of the most tilted vertebra separating the TK and LL is not known a priori. The maximum Cobb angle value corresponds to the TK value for the non-constrained Cobb technique. Similarly, all Cobb angles between the superior endplate of S1 and the superior endplate of T1 to L5 were calculated. The maximum Cobb angle value corresponds to the LL value for the non-constrained Cobb technique. The lower limit vertebra of the TK was always the same as the upper limit vertebra of the LL in the current study. In cases where the limit vertebrae are different, we recommend that the TK and LL be measured using the same limit vertebra that is associated with the maximal value for the sum of the TK and LL. For example, if the most tilted inferior

endplate is T11 and the most tilted superior endplate is T12, then TK and LL are measured sequentially for T11 and T12. First using the T11 limit vertebra, the TK value measured between the superior endplate of T1 and the inferior endplate of T11 is summed with the LL value measured between the superior endplate of T11 and the superior endplate of S1. Then, the same process is done using T12 as the limit vertebra. The proper limit vertebra (with the proper TK and LL values) is that for which the sum of the TK and LL is maximum. The computer-assisted technique is different from the



**Fig. 2** In the non-constrained Cobb technique, the lumbar lordosis is assessed from the superior endplate of S1 to the superior endplate of the most tilted vertebra in the thoracolumbar region, while the thoracic kyphosis is assessed from the superior endplate of T1 to the inferior endplate of the most tilted vertebra in the thoracolumbar region

conventional manual technique in which the clinician has to select himself the limit vertebra.

Measurement of the TK and LL, using the constrained and non-constrained Cobb techniques was performed by three observers having different levels of experience (an experienced spine surgeon, an orthopedic resident and a medical student). The three observers assessed the TK and LL for all 30 subjects using both techniques in order to evaluate the inter-observer reproducibility of each technique. Assessment of the TK and LL was repeated one week later by each observer, in order to assess the intra-observer reproducibility of the constrained and non-constrained Cobb techniques.

#### Data analysis

The mean values and standard deviations for TK and LL were calculated for each technique. Pearson's correlation studies between the two techniques and comparisons using paired Student *t* tests were also performed. As an error analysis, mean absolute differences of observers' measurements were also assessed, with the associated 95% confidence interval. All these previous results were determined from the data of the first acquisition session only. Correlation between the two acquisition sessions was assessed using Pearson's coefficient. Finally, the intra- and inter-observer reproducibility of each technique was calculated using single measure intra-class correlation coefficient (ICC) with a two-way random effects model (absolute agreement definition). The inter-observer ICC was calculated from the data of the first acquisition session only. The intra-observer ICC was calculated for each observer from the data of the two acquisition sessions. The level of significance was set at 0.05.

#### Results

Mean values and standard deviations for TK and LL, as well as mean absolute differences of observers' measurements and the associated 95% confidence

**Table 1** Measurement of thoracic kyphosis using the constrained and non-constrained Cobb techniques

Measuring technique	Thoracic kyphosis ( $\pm$ standard deviation)	Mean absolute difference of three observers	Confidence interval (95%)
Non-constrained Cobb	39.9 $\pm$ 12.0°	4.5°	2.6°–6.4°
Constrained Cobb	34.7 $\pm$ 12.4°	5.2°	3.4°–6.9°

**Table 2** Measurement of lumbar lordosis using the constrained and non-constrained Cobb techniques

Measuring technique	Lumbar lordosis ( $\pm$ standard deviation)	Mean absolute difference of three observers	Confidence interval (95%)
Non-constrained Cobb	68.1 $\pm$ 16.7°	3.4°	1.8°–5.0°
Constrained Cobb	61.6 $\pm$ 13.9°	3.7°	2.3°–5.1°

interval are presented in Tables 1 and 2, respectively. The non-constrained Cobb technique gave significantly higher values of TK ( $P < 10^{-22}$ ) and LL ( $P < 10^{-15}$ ), but they were strongly correlated with those obtained with the constrained Cobb technique for TK ( $r = 0.96$ ) and for LL (0.94). Both techniques provided similar strong correlation coefficients between the two acquisition sessions. The correlation coefficient for LL measurements between the two acquisition sessions was 0.93 and 0.94 for the constrained and non-constrained Cobb techniques, respectively. It was 0.84 and 0.84 for the constrained and non-constrained measurement of the TK, respectively.

Table 3 and 4 present the results from the reproducibility study, indicating that both techniques provide similar intra- and inter-observer reproducibility. Concerning the intra-observer reproducibility, there is no obvious relationship with the observer's clinical experience. Intra-observer ICCs varied between 0.74 and 0.92 for the measurement of TK, while they were between 0.87 and 0.97 for the measurement of LL. Globally, intra-observer ICCs were higher for the measurement of LL. Inter-observer ICCs were

**Table 3** Intra-observer reproducibility of the constrained and non-constrained Cobb techniques for each observer based on intra-class correlation coefficients (95% confidence interval)

Measuring technique	Thoracic kyphosis			Lumbar lordosis		
	Observer 1	Observer 2	Observer 3	Observer 1	Observer 2	Observer 3
Non-constrained Cobb	0.74 (0.49–0.87)	0.90 (0.79–0.95)	0.92 (0.84–0.96)	0.97 (0.94–0.99)	0.97 (0.93–0.98)	0.90 (0.80–0.95)
Constrained Cobb	0.80 (0.60–0.90)	0.81 (0.65–0.91)	0.92 (0.83–0.96)	0.95 (0.90–0.98)	0.96 (0.91–0.98)	0.87 (0.72–0.94)

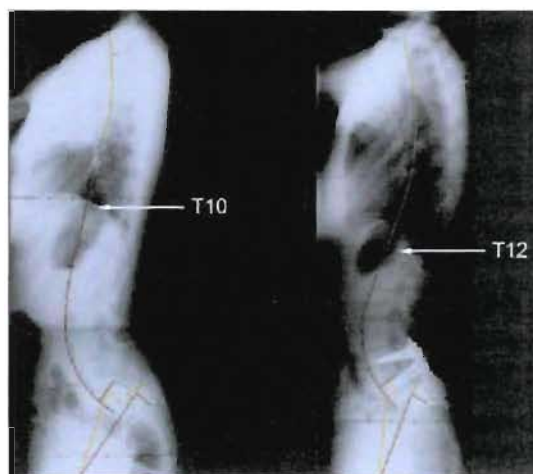
**Table 4** Inter-observer reproducibility of the constrained and non-constrained Cobb techniques based on intra-class correlation coefficients (95% confidence interval)

Measuring technique	Thoracic kyphosis	Lumbar lordosis
Non-constrained Cobb	0.89 (0.80–0.94)	0.87 (0.75–0.93)
Constrained Cobb	0.84 (0.74–0.92)	0.84 (0.70–0.92)

similar for TK and LL, ranging from 0.84 to 0.89. For the measurement of LL, inter-observer ICCs were lower than intra-observer ICCs, while there was no particular relationship between intra- and inter-observer ICCs for the measurement of TK.

### Discussion

As previously suggested by Vaz et al. [19], the level of transition between the TK and LL can vary widely in the normal young adult population. In their study population, they reported that the length of the spinal kyphotic segment varied between 6 and 13 vertebrae, while the lordotic segment spanned between 1 to 6 vertebrae. Treatment of spinal disorders, such as spondylolisthesis, can also have a significant effect on the length of the TK and LL (Fig. 3). This is the reason why the use of the non-constrained Cobb technique can be appealing. On the opposite side, the constrained Cobb technique does not always allow to assess the entire kyphotic and lordotic segments of the spine,



**Fig. 3** Pre- and post-operative lateral radiographs of a patient with developmental spondylolisthesis. Pre-operatively, the patient has a kyphotic segment that spans from T1 to T10 and a lordotic segment from T10 to S1. Post-operatively, the kyphosis is from T1 to T12 and the lordosis is from T12 to S1

such as for cases where part of the kyphotic segment extends into the lumbar spine or vice versa. This explains why the non-constrained Cobb technique consistently gave higher mean values than the constrained Cobb technique for TK and LL, but there was nevertheless a strong correlation between both techniques, confirming that measurements with the non constrained Cobb technique vary in the same fashion as with the constrained Cobb technique.

The present study specifically evaluated if the reproducibility of the non-constrained Cobb technique was similar to that of the constrained Cobb technique. Based on Shrout and Fleiss criteria for reproducibility testing (poor, ICC < 0.40; fair to good, ICC 0.40 to 0.75; excellent, ICC > 0.75) [17], intra- and inter-observer reproducibility was excellent for both techniques. Harrison et al. [7, 8] obtained even higher ICCs (between 0.94 and 0.99) for the constrained Cobb technique in their reproducibility study on adult subjects. The authors believe that this is related to the fact that the current study included subjects with AIS and spondylolisthesis, in addition to normal adolescents. Identification of vertebral endplates is more difficult in pediatric than in adult subjects. Accurate identification of vertebral endplates is also more difficult in subjects with AIS because vertebrae are superimposed and rotated when viewed on the lateral radiograph. This is particularly true for AIS subjects in this study because they all had a double structural thoracic and lumbar curve pattern. As for subjects with high-grade spondylolisthesis, remodeling and doming of S1 adds to the complexity of accurately identifying the S1 upper endplate.

For both constrained and non-constrained Cobb techniques, intra-observer reproducibility appeared slightly better for the measurement of LL than for the measurement of TK. This may be due to the decreased visibility of the thoracic spine, which can be associated with inadequate identification or digitization of T1.

One main concern related to the use of the non-constrained Cobb technique is the accurate identification of the most inclined vertebra that separates the TK and the LL. As reported by Potter et al. [14] for coronal radiographs of scoliotic spines, manual identification of the end vertebrae can be difficult and highly dependent on observer experience. Accordingly, they have shown that this task can be associated with poor inter-observer reliability (Kappa correlation coefficient of 0.3) despite high intra-observer reliability (Kappa correlation coefficient between 0.69 and 0.88). We believe that this problem could have been even worse in the current study since identification of the most tilted vertebrae is more difficult on lateral radiographs due to poorer visibility of anatomical landmarks. On

the contrary, our results demonstrate that observer experience has no obvious influence on the intra-observer reproducibility for the non-constrained Cobb technique. In addition, we found no discrepancy between the intra- and inter-observer reproducibility, which is in sharp contrast with the results of Potter et al. [14]. We believe these findings are mainly explained by the use of a computer-assisted technique in the present study, which ensured more accurate and reproducible identification of the most inclined vertebra for the non-constrained Cobb technique. The conventional manual technique [18, 21] can be associated with significant errors because the clinician calculates the TK and LL based on a limit vertebra that appears to be the most inclined vertebra that separates the TK and LL. As suggested by Potter et al. [14], inter-observer discrepancy with the conventional technique is related to the "level of ambiguity" that occurs when two or more vertebrae have a similar orientation. In this situation, each clinician tends to use his own judgment and experience to select the limit vertebra. Each clinician will tend to reproduce his personal method of selecting the limit vertebra, thereby resulting in good intra-observer reproducibility. However, different clinicians will have different methods of selecting the limit vertebra, so that the inter-observer reproducibility can be worse. The computer-assisted technique eliminates this "level of ambiguity" because the user digitizes all vertebral endplates and the software automatically calculates their orientation with respect to a horizontal line. Since the orientation of all vertebral endplates is provided by the software, it becomes easy to identify the proper limit vertebra.

Therefore, the authors strongly recommend a computer-assisted technique when using the non-constrained Cobb technique. Although this process can be more time-consuming than the manual method, it provides adequate intra- and inter-observer reproducibility for the measurement of TK and LL. While all vertebral endplates from T1 to S1 were digitized in this study, the time required to accurately identify the most tilted vertebra could be minimized if only a limited number of vertebrae in the thoracolumbar segment were digitized. The software could also be easily implemented in order to automatically calculate the maximal Cobb angle after the identification of the vertebral endplates, without the need of post-processing the data as in the current study. Alternatively for those who already use a digital radiograph system allowing on-screen angular measurements, the user could sequentially measure the TK and LL using different limit vertebrae (for example the three most

inclined vertebrae selected visually) in order to obtain the maximal TK and LL values.

## Conclusion

This study demonstrates that the reproducibility of the non-constrained Cobb technique is similar to that of the more widely used constrained Cobb technique. However, as opposed to the constrained Cobb technique, the non-constrained Cobb technique has the important advantage of taking into account the variability in the level of transition between the TK and LL, thus allowing a better evaluation of the full magnitude of the sagittal curves of the spine. A computer-assisted technique is however recommended when using the non-constrained Cobb technique in order to ensure adequate intra- and inter-observer reproducibility.

**Acknowledgments** The authors sincerely thank Surgiview (Paris, France) for providing the Spineview software.

## References

- Bernhardt M, Bridwell KH (1989) Segmental analysis of the sagittal plane alignment of the normal thoracic and lumbar spines and thoracolumbar junction. *Spine* 14:717–721
- Cobb JR (1948) Outline for the study of scoliosis. *Instr Course Lect* 5:261–275
- de Jonge T, Dubouset J, Illés T (2002) Sagittal plane correction in idiopathic scoliosis. *Spine* 27:754–761
- Faro FD, Marks MC, Pawelek J et al (2004) Evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 29:2284–2289
- Fernand R, Fox DE (1985) Evaluation of lumbar lordosis: a prospective and retrospective study. *Spine* 10:799–803
- Hammerberg EM, Wood KB (2003) Sagittal profile of the elderly. *J Spinal Disord* 16:44–50
- Harrison DE, Cailliet R, Harrison DD et al (2001) Reliability of centroid, Cobb, and posterior tangent methods: which to choose for analysis of thoracic kyphosis. *Spine* 26:E227–E234
- Harrison DE, Harrison DD, Cailliet R et al (2001) Radiographic analysis of lumbar lordosis: centroid, Cobb, TRALL, and Harrison posterior tangent methods. *Spine* 26:E235–E242
- Horton WC, Brown CW, Bridwell KH et al (2005) Is there an optimal patient stance for obtaining a lateral 36° radiograph? *Spine* 30:427–433
- Jackson RP, McManus AC (1994) Radiographic analysis of sagittal plane alignment and balance in standing volunteers and patients with low back pain matched for age, sex and size. A prospective controlled clinical study. *Spine* 14:1611–1618
- Korovessis P, Dimas A, Iliopoulos P et al (2002) Correlative analysis of lateral vertebral radiographic variables and medical outcomes study short-form health survey. *J Spinal Disord* 15:384–390
- O'Brien MF, Kuklo TR, Blanke KM et al (2004) Spinal deformity study group. Radiographic measurement manual. Medtronic Sofamor Danek, USA

13. Polly DW Jr, Kilkelly FX, McHale KA et al (1996) Measurement of lumbar lordosis: evaluation of intraobserver, interobserver, and technique variability. *Spine* 21:1530–1535
14. Potter BK, Rosner MK, Lehman Jr RA et al (2005) Reliability of end, neutral and stable vertebrae identification in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 30:1658–1663
15. Rajnics P, Pomero V, Templier A et al (2001) Computer-assisted assessment of spinal sagittal plane radiographs. *J Spinal Disord* 14:135–142
16. Rillardon L, Levassor N, Guigui P et al (2003) Validation of a tool to measure pelvic and spinal parameters of sagittal balance. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 89:218–227
17. Shrout PE, Fleiss JL (1979) Intraclass correlation: uses in assessing rater reliability. *Psychol Bull* 86:420–428
18. Stagnara P, De Mauroy JC, Dran G et al (1982) Reciprocal angulation of vertebral bodies in the sagittal plane: approach to references for the evolution of kyphosis and lordosis. *Spine* 7:335–342
19. Vaz G, Rousouly P, Berthounaud E et al (2002) Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J* 11:80–87
20. Vedantam R, Lenke LG, Keeney JA et al (1998) Comparison of standing sagittal spinal alignment in asymptomatic adolescents and adults. *Spine* 23:211–215
21. Voutsinas SA, MacEwen GD (1986) Sagittal profiles of the spine. *Clin Orthop* 210:235–242



# Computerized Assessment of Sagittal Curvatures of the Spine

## Comparison Between Cobb and Tangent Circles Techniques

Fanny-Maud Pinel-Giroux,\*† Jean-Marc Mac-Thiong, MD,\*† Jacques A. de Guise, PhD,‡  
Éric Berthonnaud,§ and Hubert Labelle, MD\*†

**Objective:** The tangent circles technique has been proposed as an alternative to the Cobb angle technique to assess sagittal curves of the spine. However, it has never been compared directly to the Cobb technique. This study compares the reproducibility and clinical relevance of the maximum Cobb angle and tangent circles techniques.

**Method:** Standing sagittal radiographs of the spine of 10 adolescents with idiopathic scoliosis, 10 adolescents with spondylolisthesis, and 10 healthy adolescents were used. Thoracic kyphosis (TK) and lumbar lordosis (LL) were measured by 3 observers using the maximum Cobb angle and the tangent circles techniques. Intra- and interobserver intraclass correlation coefficients (ICCs) were calculated.

**Result:** Intra- and interobserver ICCs for TK were 0.88 and 0.85, respectively, for the maximum Cobb angle technique, and 0.94 and 0.83, respectively, for the tangent circles technique. Intra- and interobserver ICCs for LL were 0.97 and 0.77, respectively, for the maximum Cobb angle technique, and 0.88 and 0.94, respectively, for the tangent circles technique. The 2 techniques were highly correlated for the measurement of the TK ( $r = 0.93$ ) and LL ( $r = 0.88$ ).

**Conclusion:** Both techniques provide excellent intra- and interobserver reproducibility. Tangent circles technique may be a good alternative to the Cobb angle technique because it allows the evaluation of the global geometry of sagittal spinal curves, especially when there is limited visibility of bony structures on radiographs.

**Key Words:** lumbar lordosis, thoracic kyphosis, posture, reproducibility, radiographic analysis, sagittal balance, spine

(*J Spinal Disord Tech* 2006;19:507-512)

Various studies<sup>1-5</sup> have tried to establish the normal range of values for lumbar lordosis (LL) and thoracic kyphosis (TK). These parameters are important in the maintenance of an adequate sagittal balance of the spine.<sup>6</sup> Spinal disorders such as spondylolisthesis and idiopathic scoliosis can modify the sagittal curvatures of the spine and affect their relationships. The Cobb angle technique, which is adapted from the original method developed by Cobb<sup>7</sup> for measuring scoliotic curvatures in the coronal plane, is the most widely used technique. However, this technique is criticized because it uses the vertebral end plates as a reference for the measurements, and these landmarks are often difficult to identify properly.<sup>8</sup> In addition, the posterior aspect of superior vertebral end plates often presents a ridge that distorts the normally flat surface of the end plate,<sup>9</sup> which may increase the variability during identification of superior vertebral end plates. Moreover, the Cobb angle only reflects the orientation of the vertebral end plates rather than the global geometry of the curve itself, so that 2 markedly different curves may have the same Cobb angle.<sup>2,4,10,11</sup> The variability of this technique has been evaluated at approximately 5 degrees to 10 degrees.<sup>9,12</sup>

The centroid and the posterior tangent techniques have been proposed as alternatives to the Cobb angle technique.<sup>13,14</sup> However, although these 2 techniques provide slightly improved intra- and interobserver variability, they still present the same disadvantages as the Cobb technique because they use only the end vertebrae as references to determine the magnitude of the curve and thus do not take into account the general aspect of the curve. More recently, it has been proposed to model sagittal spinal curvatures using geometrical primitive shapes to provide some information on the general shape of spinal curves. Best-fit ellipses<sup>15</sup> accurately model sagittal curvatures of the spine, but this technique is difficult to use clinically because of its complexity. To describe a curve, this technique uses

Received for publication October 15, 2005; accepted January 23, 2006.

From the \*Faculty of Medicine, Université de Montréal, Montréal, Canada; †Motion Sciences Research Chair, Research Center, Hôpital Sainte-Justine, Montréal, Canada; ‡Department of Automated Production Engineering, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada; and §Laboratoire de Biomécanique du Mouvement, Group de Biomécanique Clinique, Centre Hospitalier Lyon Sud, France.

This research was funded by the Canadian Institute of Health Research (Mentor Strategic Training Program), the Fonds de Recherche en Santé du Québec and Canada Research-Based Pharmaceutical Companies R&D.

Reprints: Hubert Labelle, MD, Hôpital Sainte-Justine, Division of Orthopaedics, 3175 Côte-Sainte-Catherine, Montréal, Québec, Canada H3T 1C5 (e-mail: [redacted]).

Copyright © 2006 by Lippincott Williams & Wilkins

multiple parameters that are difficult to interpret clinically. On the contrary, the tangent circles technique proposed by Berthonnaud et al<sup>16</sup> models LL and TK using 2 arcs of circles tangent at their apex. As opposed to the use of best-fit ellipses, this technique provides a more intuitive and simple approach because it is based on a single angular value to describe each sagittal curve of the spine.

Although the tangent circles technique has already been used in many studies,<sup>3,6,17-20</sup> it has never been compared directly to the Cobb technique. It is still not clear whether the measurements obtained from the tangent circles technique can be compared to those obtained from the Cobb technique in previous studies. Therefore, this study compares the reproducibility and clinical relevance of the maximum Cobb angle and tangent circles techniques for the assessment of TK and LL. These 2 techniques are evaluated for healthy adolescents and for adolescents with idiopathic scoliosis and spondylolisthesis.

#### MATERIALS AND METHODS

The study design was based on the recommendations of Harrison et al<sup>14</sup> for standardizing the reliability studies for measurements of radiographic parameters. Accordingly, the current study involves 30 radiographs, 3 observers, and 2 measuring sessions.

#### Sample Description

In this study, the standing lateral spinal radiographs of 10 healthy adolescents, 10 subjects with adolescent idiopathic scoliosis (AIS), and 10 subjects with L5-S1 developmental spondylolisthesis were randomly selected. All subjects with a history or clinical signs of hip, pelvic, or lower limb disorders were excluded from the study. The average age of the healthy subjects was  $14.6 \pm 3.5$  years, and the group was composed of 6 girls and 4 boys. As for subjects with AIS, only those with double thoracic and lumbar curves were included. The average age of subjects with AIS was  $15.1 \pm 3.6$  years, and this group included 8 girls and 2 boys. The group of subjects with developmental spondylolisthesis was composed of 6 girls and 4 boys, and the average age was  $14.2 \pm 4.0$  years. Four subjects presented a spondylolisthesis of Meyerding grade 1, 3 were of grade 2, 2 of grade 3, and 1 of grade 4.

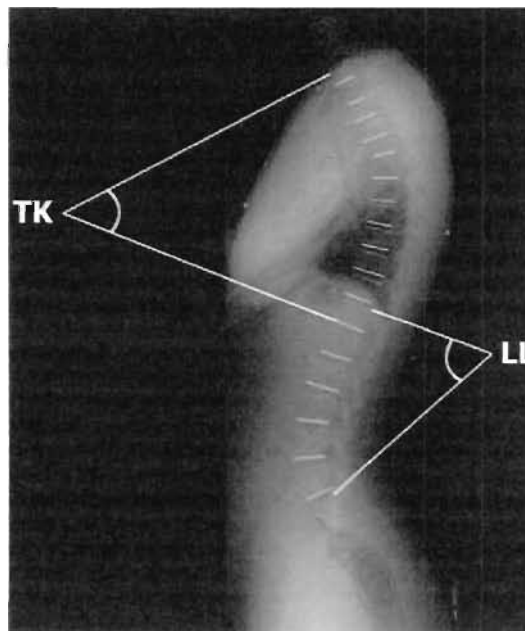
All denormalized radiographs used in this study were taken under the same conditions: in an upright position with the fists resting on the clavicles and the hips and knees in full extension. For each subject, a left  $30 \times 90$  cm lateral radiograph, including the 2 femoral heads and part of the cervical spine, was available. All radiographs were stored in digital format.

#### Techniques of Measurement

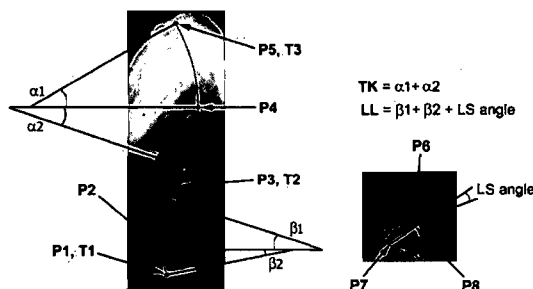
Two techniques of measurement of the sagittal curves of the spine were used. The first technique was the maximum Cobb angle technique. In this technique, LL was measured from the superior end plate of S1 to the superior end plate of the most tilted vertebra (variable

level) in the thoracolumbar spine. TK was measured from the superior end plate of T1 to the inferior end plate of the most tilted vertebra in the thoracolumbar spine. Measurements were taken using the SpineView software (Surgiview, France).<sup>21,22</sup> Using the software, all observers identified the superior and inferior end plates of all vertebrae from T1 to S1 (Fig. 1). The software automatically provides the intervertebral angle for all levels, such that the Cobb angle value can be calculated between any 2 vertebrae. For each subject, the Cobb angles between T1 and all other vertebrae were then calculated by 1 observer, and the maximum Cobb angle value for TK was determined. Similarly, the Cobb angles between S1 and all other vertebrae allowed the identification of the maximum Cobb angle value for LL.

The tangent circles technique<sup>3,17</sup> used 2 arcs of circles tangent at the level of the apex of each curve to model the thoracic and lumbar segments (Fig. 2). The technique can be summarized as follows. The software (Sagittal Spine, Optisoft, France) generated a geometric model of the spine in the sagittal plane, which is composed of (a) a thoracic segment (2 arcs of circles), (b) a straight thoracolumbar junction, and (c) a lumbar segment (2 arcs of circles). Using the software, all



**FIGURE 1.** Maximal Cobb angle technique. All vertebral end plates from T1 to S1 are identified. LL is computed from the superior end plate of S1 to the superior end plate of the most tilted vertebra in the thoracolumbar region, whereas TK is computed from the superior end plate of T1 to the inferior end plate of the most tilted vertebra in the thoracolumbar region.



**FIGURE 2.** Tangent circles technique. A geometric model of the spine is generated by the software after identification of 8 anatomical landmarks (P1 to P8) and 3 tangent lines (T1 to T3). The thoracic and lumbar segments are intercalated by a straight thoracolumbar junction. TK corresponds to the angles contained by the arcs of circle used to model the thoracic segment ( $\alpha_1$  and  $\alpha_2$ ). The LL corresponds to the sum of the lumbosacral angle (LS angle) and the angles contained by the arcs of circle used to model the lumbar segment ( $\beta_1$  and  $\beta_2$ ).

observers identified 8 anatomical landmarks (P1 to P8) and 3 tangent lines (T1 to T3), as shown in Fig. 2. The anatomical landmarks identified were (P1) the antero-inferior corner of L5, (P2) the most anterior point of the anterior lumbar vertebral line, (P3) any anterior point on the straight thoracolumbar junction, (P4) the most posterior point of the anterior thoracic vertebral line, (P5) the anterosuperior corner of T1, (P6) the postero-inferior corner of L5, (P7) the anterosuperior corner of S1, and (P8) the posterosuperior corner of S1. The orientation of the following tangent lines was also determined by each observer: (T1) the inclination of LL at L5, (T2) the inclination of the straight thoracolumbar junction, and (T3) the inclination of TK at T1. The TK value was provided by the software and corresponded to the sum of the angles contained by the 2 arcs of circle used to model the thoracic segment. The software provides LL down to L5 and the lumbosacral angle (intervertebral angle between L5 and S1). The LL used in this study therefore corresponded to the sum of the angles contained by the 2 arcs of circle used to model the thoracic segment and the lumbosacral angle.

### Data Analysis

Three observers with different levels of experience (an experienced spine surgeon, an orthopaedic resident,

and a medical student with little clinical experience) each carried out the measurements of LL and TK for all the 30 radiographs using the tangent circles and maximum Cobb angle techniques. One week later, the measurements for all the radiographs were repeated a second time by each observer using the 2 techniques.

The mean values of LL and TK for the 2 techniques and their standard deviations and 95% confidence intervals (CIs) were calculated from the data of the first measuring session. To provide an error analysis, the mean absolute differences of observers' measurements were also determined from the data of the first measuring session. We also calculated the intra- and interobserver intraclass correlation coefficients (ICCs) for the 2 techniques, using a 3-way analysis of variance. The interobserver ICCs were calculated on the basis of the data of the first measuring session only.

### RESULTS

The mean values and standard deviations of LL and TK and the mean absolute differences between the observers and the associated confidence intervals are presented in Tables 1 and 2.

Paired Student *t* tests showed that the mean TK and LL were slightly but significantly smaller when measured using the tangent circles techniques ( $P = 0.0014$  for TK and  $P = 0.013$  for LL). However, TK and LL values obtained with the tangent circles technique were strongly correlated with values obtained using the Cobb technique: Pearson correlation coefficients were 0.88 for LL and 0.93 for TK.

The mean absolute difference between the 3 observers was similar for both measuring techniques, with a variation of  $< 2$  degrees for LL (Table 1) and  $< 1$  degree for TK (Table 2). The correlation coefficient between the 2 measuring sessions was strong for both techniques. Both techniques showed similar correlation coefficients between the measuring sessions ( $r = 0.94$ ) for LL. The correlation coefficient between the measuring sessions of TK was higher for the tangent circles techniques ( $r = 0.91$ ) when compared to the Cobb technique ( $r = 0.84$ ).

Intra- and interobserver ICCs are presented in Table 3 for both evaluated techniques. When compared to the Cobb technique, the tangent circles technique gave higher intraobserver (0.94 vs. 0.88) and similar interobserver (0.85 vs. 0.83) ICCs for TK measurement. With regard to the measurement of LL, the intraobserver ICC

**TABLE 1.** Comparison of the Measurement of LL Using the Maximum Cobb and the Tangent Circles Techniques

Measuring Technique	LL (Mean $\pm$ SD)	Mean Absolute Difference Between Observers*	Confidence Interval (95%)
Maximum Cobb	67.6 $\pm$ 16.4°	3.3°	2.5–4.0°
Tangent circles	62.5 $\pm$ 17.8°	5.3°	4.5–6.1°

\*The mean difference in LL values between each measuring sessions was averaged for all three observers.

**TABLE 2.** Comparison of the Measurement of TK Using the Maximum Cobb Angle and the Tangent Circles Techniques

Measuring Technique	TK (Mean ± SD)	Mean Absolute Difference Between Observers*	Confidence Interval (95%)
Maximum Cobb angle	40.6 ± 12.0°	4.5°	3.4–5.6°
Tangent circles	36.3 ± 11.7°	4.0°	3.4–4.7°

\*The mean difference in TK values between each measuring sessions was averaged for all three observers.

was higher for the Cobb technique (0.97 vs. 0.88), but the interobserver agreement was better with the tangent circles technique (0.94 vs. 0.77).

### DISCUSSION

The use of computerized measurement of spinal curves is gaining interest, especially with the advent of digital radiograph systems. This study compared the maximum Cobb angle and tangent circles techniques for the assessment of TK and LL. Similar to the Cobb angle technique, the tangent circles technique<sup>16</sup> was designed to describe each curve by a single angular value. In addition, this technique was developed in an attempt to overcome the main limitations of the Cobb technique, which are the lack of consideration of the global geometry of the sagittal curves and the difficulty of identifying the vertebral end plates when there is limited visibility on the radiographs, especially in the upper thoracic spine for all conditions and in the lumbar spine for moderate to severe scoliosis. The tangent circles technique has already been used to evaluate the sagittal profile of healthy children,<sup>19</sup> healthy adults,<sup>3,6,20</sup> and subjects with spondylolisthesis.<sup>18</sup> The variability of this technique has been assessed recently,<sup>17</sup> but this study was done only with premarked radiographs, and the technique has not been compared with the Cobb technique.

The mean TK obtained in this study was similar to that reported by Stagnara et al<sup>2</sup> and Voutsinas et al,<sup>4</sup> who used a similar technique of measurement. However for LL, the mean value in this study was higher, most probably because our study group was composed of subjects with spondylolisthesis and scoliosis, who frequently present with increased LL. As for the tangent circles technique, the mean TK and LL found in this study were in the same range as those reported by Mac-Thiong et al<sup>19</sup> for healthy children and adolescents.

Interestingly, even if the maximum Cobb angle technique consistently gave higher mean values than the

tangent circles technique for TK and LL, there is a strong correlation between the 2 techniques (0.88 for LL and 0.93 for TK). This strong relationship confirms that the measurement of the sagittal curves with the tangent circles technique varies in the same manner as that with the maximum Cobb angle technique.

On the basis of the criteria by Shrout and Fleiss<sup>23</sup> for reproducibility testing (poor, 0.4; fair to good, 0.4 to 0.75; excellent, 0.75), both techniques provide excellent intra- and interobserver reproducibility for the measurement of TK and LL. Interobserver reproducibility in the measurement of TK was similar for the Cobb angle (ICC = 0.85) and tangent circles (ICC = 0.83) techniques. The tangent circles technique resulted in slightly better intraobserver reproducibility for TK measurement (ICC = 0.94) compared to the maximum Cobb angle technique (ICC = 0.88). This could be explained by an increased accuracy of the tangent circles technique in case of limited visibility, as in the thoracic spine.

As for LL measurement, the Cobb angle technique provided increased intraobserver ICC (0.97) but decreased interobserver ICC (0.77), when compared to the intraobserver ICC (0.88) and interobserver ICC (0.94) for the tangent circles technique. The high discrepancy between intra- and interobserver reproducibility for the Cobb technique could be related to the complexity of accurately identifying and digitizing the upper end-plate of S1 in subjects with scoliosis (with tilting of S1 and superimposition of L5 and S1 vertebrae) and with spondylolisthesis (with remodeling of S1). The personal technique used to estimate the position of the S1 end plate on the lateral radiograph in these subjects can vary widely between each observer. However, the intraobserver ICC for LL is excellent with the Cobb technique because each observer will tend to repeat his or her own estimation technique from 1 measuring session to the other. As for the assessment of LL using the tangent circles technique, the intra- and interobserver reproducibility were more similar, although identification

**TABLE 3.** Intra- and Interobserver ICC for the Measurement of TK and LL Using the Maximum Cobb Angle and the Tangent Circles Techniques

Measuring Technique	TK		LL	
	Intraobserver ICC (95% Confidence Interval)	Interobserver ICC (95% Confidence Interval)	Intraobserver ICC (95% Confidence Interval)	Interobserver ICC (95% Confidence Interval)
Maximum Cobb angle	0.88 (0.86–0.90)	0.85 (0.83–0.87)	0.97 (0.94–0.98)	0.77 (0.75–0.79)
Tangent circles	0.94 (0.92–0.96)	0.83 (0.81–0.85)	0.88 (0.86–0.90)	0.94 (0.92–0.95)

of the upper S1 end plate was also required. This could be partly explained by the fact that the tangent circles technique requires the identification of multiple landmarks to model the global geometry of the curve, so that a high variability in 1 parameter does not affect the final value of LL as much as it does in the Cobb technique, for which inaccurate identification of 1 end plate directly influences the accuracy of the measurement.

The main advantage of the tangent circles technique is that it provides a geometric model of the spine in the sagittal plane. Consequently, measurement of the sagittal curves using this technique is based on the global geometry of the spine, as opposed to the Cobb angle technique. The tangent circles technique is not only influenced by the local architecture of 2 end vertebrae which can present as some local deformity not necessarily related to the general shape of the curve but also takes into account the shape of all vertebrae and discs within the evaluated spinal segment. Also, the identification of multiple landmarks along the entire curve renders the tangent circles technique less sensitive to digitization errors than the Cobb technique, in which an error in the digitization of 1 vertebral endplate can significantly alter the measurement. This advantage of the tangent circles technique could be particularly useful when there is limited visibility on radiographs (especially for the thoracic spine), although poor visualization of the cervicothoracic spine on the radiographs also alters the accuracy of the tangent circles technique. Both Cobb and tangent circles techniques require the identification of the anterosuperior corner of T1 vertebral body. However, the authors found that identifying the inclination of TK at T1 in the tangent circles technique was easier than identifying the orientation of the T1 endplate in the Cobb technique. This is because visualization of the global shape of the cervical spine can aid in the determination of the inclination of TK at T1, when visualization of the upper thoracic spine is limited.

The Cobb angle technique also presents some advantages over the tangent circles technique. It is easy to use and interpret, and it does not require any computer software. In addition, it can provide segmental angles, which is more difficult with the tangent circles technique.

Originally, the tangent circles technique was developed to measure LL down to L5 only.<sup>16</sup> This technique is ideal for the evaluation of LL in patients with spondylolisthesis because separate assessment of the lumbosacral angle is of prime importance in these patients. To measure LL in this study, the original tangent circles technique was modified by adding the lumbosacral angle value to the LL value measured down to L5. The additional measurement of the lumbosacral angle may explain the decreased intraobserver reproducibility of the tangent circles technique when measuring LL. Therefore, in subjects with no spondylolisthesis, the authors suggest that the tangent circles technique be modified to include the S1 vertebra when modeling

the lumbar spine, so as to avoid the additional use of the lumbosacral angle in the measurement of the LL and, possibly, increase the reproducibility of the technique.

## CONCLUSION

When comparing values measured with the maximum Cobb angle and tangent circles techniques, it is important to remember that the maximum Cobb angle technique tends to give higher values of TK and LL. However, both techniques are strongly correlated, such that the values of TK and LL vary in the same manner. Overall, the Cobb angle and tangent circles techniques both provide excellent intra- and interobserver reproducibility. Tangent circles technique may be a good alternative to the Cobb angle technique because it allows the evaluation of the global geometry of sagittal spinal curves, especially when there is limited visibility on the radiographs.

## REFERENCES

- Bernhardt M, Bridwell KH. Segmental analysis of the sagittal plane alignment of the normal thoracic and lumbar spines and thoracolumbar junction. *Spine*. 1989;14:717-721.
- Stagnara P, De Mauroy JC, Dran G, et al. Reciprocal angulation of vertebral bodies in the sagittal plane: approach to references for the evolution of kyphosis and lordosis. *Spine*. 1982;7:335-342.
- Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J*. 2002;11:80-87.
- Voutsinas SA, MacEwen GD. Sagittal Profiles of the Spine. *Clin Orthop*. 1986;210:235-242.
- Vedantam R, Lenke LG, Keeney JA, et al. Comparison of standing sagittal spinal alignment in asymptomatic adolescents and adults. *Spine*. 1998;23:211-215.
- Berthonnaud E, Dimnet J, Roussouly P, et al. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord*. 2005;18:40-47.
- Cobb JR. Outline for the Study of Scoliosis. *Instr Course Lect*. 1948;5:261-275.
- Goh S, Price RI, Leedman PJ, et al. A comparison of three methods for measuring thoracic kyphosis: implications for clinical studies. *Rheumatology*. 2000;39:310-315.
- Polly DW Jr, Kilkelly FX, McHale KA, et al. Measurement of lumbar lordosis: evaluation of intraobserver, interobserver, and technique variability. *Spine*. 1996;21:1530-1535.
- Singer KP, Jones TJ, Breidahl PD. A comparison of radiographic and computer-assisted measurements of thoracic and thoracolumbar sagittal curvature. *Skeletal Radiol*. 1990;19:21-26.
- Stokes IAF, Bigalow LC, Moreland MS. Three-dimensional spinal curvature in idiopathic scoliosis. *J Orthop Res*. 1987;5:102-113.
- Carman DL, Browne RH, Birch JG. Measurement of scoliosis and kyphosis radiographs. Intraobserver and interobserver variation. *J Bone Joint Surg Am*. 1990;72:328-333.
- Harrison DE, Cailliet R, Harrison DD, et al. Reliability of centroid, Cobb, and Posterior tangent methods: which to choose for analysis of thoracic kyphosis. *Spine*. 2001;26:E227-E234.
- Harrison DE, Harrison DD, Cailliet R, et al. Radiographic analysis of lumbar lordosis. Centroid, Cobb, TRALL, and Harrison posterior tangent methods. *Spine*. 2001;26:E235-E242.
- Harrison DE, Tadeusz JJ, Harrison DD, et al. Can the kyphosis be modeled with a simple geometric shape? The results of circular and elliptical modeling in 80 asymptomatic patients. *J Spinal Disord*. 2002;15:213-220.

16. Berthonnaud E, Rousouly P, Dimmet J. The parameters describing the shape and the equilibrium of the set back pelvis and femurs in sagittal view. *Innov Technol Biol Med*. 1998;19:411-426.
17. Berthonnaud E, Labelle H, Rousouly P, et al. A variability study of computerized sagittal spinopelvic radiological measurements of trunk balance. *J Spinal Disord*. 2005;18:66-71.
18. Labelle H, Rousouly P, Berthonnaud E, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence, and spinopelvic balance. A correlation study. *Spine*. 2004;29:2049-2054.
19. Mac-Thiong J-M, Berthonnaud E, Dimar JR, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine*. 2004;29:1642-1647.
20. Rousouly P, Berthonnaud E, Dimmet J. Geometrical and mechanical analysis of lumbar lordosis in an asymptomatic population: proposed classification. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*. 2003;89:632-639.
21. Rajnics P, Pomero V, Templier A, et al. Computer-assisted assessment of spinal sagittal-plane radiographs. *J Spinal Disord*. 2001;14:135-142.
22. Rillardon L, Levassor N, Guigui P, et al. Validation of a tool to measure pelvic and spinal parameters of sagittal balance. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*. 2003;89:218-227.
23. Shrout PE, Fleiss JL. Intraclass correlation: uses in assessing rater reliability. *Psychol Bull*. 1979;86:420-428.

Editorial Manager(tm) for European Spine Journal  
Manuscript Draft

Manuscript Number: ESJO-D-08-00144

Title: Assessment of lumbosacral kyphosis in spondylolisthesis: a computer assisted reliability study of six measurement techniques

Article Type: Original Article

Keywords: lumbosacral kyphosis; reliability; radiographic measurements; spine; spondylolisthesis

Corresponding Author: Dr Panagiotis Glavas, MD

Corresponding Author's Institution: Sainte-Justine University Hospital Center

First Author: Panagiotis Glavas, MD

Order of Authors: Panagiotis Glavas, MD; Jean-Marc Mac-Thiong, MD, PhD; Stefan Parent, MD, PhD; Jacques A de Guise, PhD; Hubert Labelle, MD

Abstract: ABSTRACT

Although recognized as an important aspect in the management of spondylolisthesis, there is no consensus on the most reliable and optimal measure of lumbosacral kyphosis (LSK). Using a custom computer software, four raters evaluated 60 standing lateral radiographs of the lumbosacral spine during two sessions at a one week interval. The sample size consisted of 20 normal, 20 low and 20 high grade spondylolisthetic subjects. Six parameters were included for analysis: Boxall's slip angle; Dubousset's lumbosacral angle (LSA); the Spinal Deformity Study Group's (SDSG) LSA; dysplastic SDSG LSA; sagittal rotation (SR); kyphotic Cobb angle (k-Cobb). Intra- and inter-rater reliability for all parameters was assessed using intra-class correlation coefficients (ICC). Correlations between parameters and slip percentage were evaluated with Pearson coefficients.

The intra-rater ICC's for all the parameters ranged between 0.81 and 0.97 and the inter-rater ICC's were between 0.74 and 0.98. All parameters except sagittal rotation showed a medium to large correlation with slip percentage. Dubousset's LSA and the kyphotic Cobb angle showed the largest correlations ( $r=0.78$  and  $r=0.50$ , respectively). Sagittal rotation was associated with the weakest correlation ( $r=0.10$ ). All other parameters had medium correlations with percent slip ( $r=0.31$  to  $0.43$ ).

- 2 -

**1 ABSTRACT**

2 Although recognized as an important aspect in the management of spondylolisthesis,  
3 there is no consensus on the most reliable and optimal measure of lumbosacral kyphosis  
4 (LSK). Using a custom computer software, four raters evaluated 60 standing lateral  
5 radiographs of the lumbosacral spine during two sessions at a one week interval. The  
6 sample size consisted of 20 normal, 20 low and 20 high grade spondylolisthetic subjects.  
7 Six parameters were included for analysis: Boxall's slip angle; Dubousset's lumbosacral  
8 angle (LSA); the Spinal Deformity Study Group's (SDSG) LSA; dysplastic SDSG LSA;  
9 sagittal rotation (SR); kyphotic Cobb angle (k-Cobb). Intra- and inter- rater reliability for  
10 all parameters was assessed using intra-class correlation coefficients (ICC). Correlations  
11 between parameters and slip percentage were evaluated with Pearson coefficients.  
12 The intra-rater ICC's for all the parameters ranged between 0.81 and 0.97 and the inter-  
13 rater ICC's were between 0.74 and 0.98. All parameters except sagittal rotation showed  
14 a medium to large correlation with slip percentage. Dubousset's LSA and the kyphotic  
15 Cobb angle showed the largest correlations ( $r=-0.78$  and  $r=-0.50$ , respectively). Sagittal  
16 rotation was associated with the weakest correlation ( $r=-0.10$ ). All other parameters had  
17 medium correlations with percent slip ( $r=0.31$  to  $0.43$ ).  
18 All measurement techniques provided excellent inter- and intra- rater reliability.  
19 Dubousset's LSA showed the strongest correlation with slip grade, but its measurement  
20 does not involve the identification of the lower endplate of L5 and upper endplate of S1  
21 which are often dysplastic in spondylolisthesis. A computer-assisted technique is  
22 recommended in order to increase the reliability of the measurement of LSK in  
23 spondylolisthesis.  
24 *Key words: lumbosacral kyphosis; reliability; radiographic measurements; spine;*  
25 *spondylolisthesis*



## 1 INTRODUCTION

2 In spondylolisthesis, there are two components involved in the underlying deformity:  
3 translational and angular [1,4,5,13,24,26]. In translational deformity, the degree of slip  
4 can be expressed as grades as described by Meyerding [22], where the superior endplate  
5 of S1 is divided into quarters, or as a percentage as described by the modified Taillard [4]  
6 method, where a ratio is measured between the distance from two tangent lines to the  
7 posterior borders of S1 and L5 and the anteroposterior diameter of L5. In contrast, there  
8 are many more parameters to assess the angular deformity or lumbosacral kyphosis  
9 (LSK) [2,4,8,13,24,26,29,30].

10  
11 Normally, the junction between the fifth lumbar and the first sacral vertebra is lordotic.  
12 [16]. However, as the degree of slip progresses to higher grades this relationship tends to  
13 become kyphotic in nature [24]. Some authors suggest that measuring the lumbosacral  
14 kyphosis is important in determining risk of progression [1,4,8,13,19,24,26]. However,  
15 there is no strong data in the literature supporting this assumption. In addition, other  
16 authors suggest that correction of LSK is the most important aspect in the surgical  
17 management of spondylolisthesis, rather than the correction of the translational  
18 component of the deformity, as this restores global spinal balance, enhances the  
19 biomechanics of fusion, and can be protective against L5 nerve root stretch  
20 [4,6,8,14,16,17,19,21,25]. However, other authors have failed to show a correlation  
21 neither between LSK parameters and surgical outcome [11,24] nor between LSK and risk  
22 of progression [10,12]. In addition, despite the multitude of LSK parameters, there is no  
23 wide acceptance of a single measure, mainly because little is known about the reliability  
24 of these measures.

- 4 -

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

1 Therefore, before one can make conclusions on the predictive value of these parameters,  
2 it is important that their intra- and inter- rater reliability be determined. In this study, six  
3 of the most commonly employed parameters of LSK were compared in order to evaluate  
4 their reliability and their correlation with slip percentage.

## 5 6 MATERIALS AND METHODS

7 The study design is based on the recommendations made by Harrison [12]. These  
8 recommendations are aimed at standardizing reliability assessment of radiographic  
9 measurements.

10  
11 The database of all patients with developmental isthmic spondylolisthesis seen at the  
12 spine clinic of a pediatric hospital from 1993 to December 2005 was searched. To be  
13 considered in the study, a standard lateral standing radiograph of the spine had to be  
14 available. Radiology technicians followed standard protocol to obtain this radiograph.  
15 This included a 30 x 90 cm left-to-right cassette of the spine and pelvis with the subject in  
16 a comfortable standing position, the knees fully extended, and the upper extremities  
17 flexed at the elbow with the fists resting on the clavicles [9,15].

18 If a subject was operated for spondylolisthesis, the preoperative film was chosen. The  
19 films were assessed by a single observer to determine percent slip using the modified  
20 Taillard method [4]. Slips less than 50% were considered low grade and slips of 50% or  
21 more were considered high grade. Twenty subjects in each of these two groups were  
22 selected randomly from the database. Similarly, a group of 20 control subjects with  
23 available standing lateral spine radiographs were selected randomly from the hospital's  
24 main radiograph database of normal subjects. These subjects consulted at the spine clinic  
25 for screening of spinal deformity, but the clinical and radiological examination failed to

- 5 -

1 demonstrate any evidence of spinal deformity. Thus, the final study sample consisted of  
2 radiographic images from 20 normal, 20 low and 20 high grade spondylolisthetic  
3 subjects. All films were saved in digital format.  
4  
5 Four raters consisting of two orthopedic residents and two spine surgeons evaluated all  
6 the images at two different sessions at a one week interval using a custom computer  
7 software. This software was designed by an independent programmer to generate six  
8 LSK parameters from a series of landmarks identified by the raters on a computer  
9 monitor. The eight landmarks identified by the four raters on the lateral radiographs were  
10 the four corners of the fifth lumbar and first sacral vertebral bodies. From these points,  
11 the software was able to automatically compute the following six parameters (figure 1):  
12 1-Boxall's slip angle (BSA): the angle subtended by the inferior end plate of L5 with  
13 a line perpendicular to the posterior aspect of S1 [4].  
14 2-Dubousset's lumbosacral angle (Dub-LSA): the angle subtended by the superior  
15 end plate of L5 with the posterior aspect of S1 [8].  
16 3-The Spinal Deformity Study Group's lumbosacral angle (SDSG LSA): the angle  
17 subtended by the inferior end plate of L5 with the superior end plate of S1 [3].  
18 4-SDSG dysplastic angle (dys-SDSG): the angle subtended by the superior end plate  
19 of L5 with the superior end plate of S1 [3].  
20 5-Sagittal rotation (SR): the angle subtended by the anterior border of L5 with the  
21 posterior border of S1 [29].  
22 6-Kyphotic Cobb angle (k-Cobb): the angle subtended by the superior end plate of L5  
23 and the inferior end plate S1 [2].  
24  
25

- 6 -

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

1 Statistical analysis was performed by a biostatistician (PhDx Inc., Albuquerque, NM).  
2 Descriptive statistics were performed for all data. Intra-class correlation coefficients  
3 (ICC's) with the associated 95 percent confidence intervals were employed to assess the  
4 inter- and intra- rater reliability. The inter-rater ICC was calculated from the data of the  
5 first acquisition session only. The intra-observer ICC was calculated for each observer  
6 from the data of both acquisition sessions. The ICC's were based on a two-way random  
7 effects model with absolute agreement. The strength of the reliability values was assessed  
8 according to the recommendations made by Landis and Koch [18]: 0-0.20 slight  
9 agreement; 0.21-0.40 fair agreement; 0.41-0.60 moderate agreement; 0.61-0.80  
10 substantial agreement; 0.81-1.00 almost perfect agreement. The relationship between the  
11 parameters and the slip percentage was assessed using the Pearson correlation coefficient  
12 and was interpreted according to the recommendations made by Cohen et al [7]. A small  
13 correlation was between +/- 0.01-0.29; a medium correlation was between +/- 0.30-0.49;  
14 and a large correlation was between +/- 0.50-1.00. The level of significance was set at  
15 0.05. Baseline characteristics of the subjects are given in table 1.

16

## 17 RESULTS

18 There was no statistically significant difference in subject's age among the three groups  
19 (table 1). The different LSK angles as computed by the computer software are given in  
20 table 2. Of the parameters measured, only Dub-LSA and k-Cobb showed a clear  
21 gradation along the spectrum of normal to low and high grade spondylolisthetic subjects.  
22 The other parameters showed no such clear gradation. The greatest change in values was  
23 seen when passing from a low grade to a high grade spondylolisthetic group.

24

- 7 -

1 The intra-rater ICC was slightly better than the inter-rater ICC. Both spondylolisthetic  
2 groups showed almost perfect agreement for both intra- and inter- rater ICC for all  
3 parameters, based on the criteria of Landis and Koch [18]. In addition, it was observed  
4 that one subject in the normal group had a transitional vertebra. One of the raters  
5 identified a different set of points during the two sessions such that in the first data  
6 acquisition session the four corners of L5 and S1 were chosen and in the second session  
7 the four corners of S1 and S2 were chosen. Consequently, the value of intra- and inter-  
8 observer ICC for the normal group was consistently lower than the spondylolisthetic  
9 groups except for the SDSG LSA (Table 3). It was decided that the statistical analysis  
10 include this error in order to reflect the potential mistakes that can occur with the  
11 misidentification of the vertebral level.

12 Pearson's correlations between slip percentage and LSK parameters were all statistically  
13 significant, except for sagittal rotation. They ranged from -0.1 for the SR parameter to -  
14 0.78 for Dubousset's LSA. Only Dubousset's LSA and the kyphotic Cobb angle were in  
15 the large correlation category while SR had a small correlation with slip percentage. All  
16 other parameters were in the medium correlation category (Table 4).

## 18 DISCUSSION

19 This is the first study that specifically compares measurements of LSK with cohorts of  
20 normal as well as low and high grade spondylolisthetic groups. Timon et al. [27] has  
21 previously reported on the reliability of 4 measurements of LSK (BSA, Dub-LSA, SR, k-  
22 Cobb). However, they had a sample size of thirty subjects with 2/3 assigned a  
23 Meyerding's grade 0 or 1 such that it is not known if their results also apply to controls  
24 and high grade spondylolisthesis. In addition, the two parameters proposed by the SDSG  
25 (SDSG LSA and dys-SDSG) were not evaluated in the study by Timon et al [27].

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

1  
2 The inter-rater reliability was less in the study by Timon et al [27] with a range from  
3 slight to moderate agreement as compared to substantial to almost perfect agreement in  
4 the present study. This could be explained by the use of high quality digital radiographs  
5 and a computer assisted method in the current study. Interestingly, Timon et al [27]  
6 found that Dubousset's LSA had the worst inter-rater reliability. In contrast, in the  
7 present study, Dubousset's LSA had the best inter-rater reliability by a small margin.  
8 This can be explained by extrapolating a straight line from the curved posterior surface of  
9 the sacrum in the study by Timon et al [27] while specifically identifying the posterior  
10 border of S1 in the present study. In addition, Dubousset's LSA possessed the best  
11 correlation with slip percentage at -0.78 thus suggesting that progression of  
12 spondylolisthesis tends to be associated with worsening of Dubousset's LSA. We  
13 therefore recommend the use of the posterior border of S1 as the landmark to measure  
14 Dubousset's LSA.  
15  
16 With progression of slippage, the inferior endplate of L5 tends to become dysplastic [19]  
17 and the L5 vertebral body may adopt a trapezoidal shape [31]. Moreover, remodeling of  
18 the S1 endplate can occur and is referred to as sacral doming or rounding [20,29,31]  
19 (Figure 2). These changes can make the identification of the inferior endplate of L5 and  
20 superior endplate of S1 quite difficult. The kyphotic Cobb angle and Dubousset's LSA  
21 are not subtended by lines drawn through these dysplastic changes which may explain  
22 why they had the best correlation with slip percentage. However, the intra- and inter-  
23 rater reliability was not adversely affected. In contrast, the BSA, SDSG LSA, dys-SDSG  
24 LSA, and SR are subtended by points passing through dysplastic endplates. Although  
25 this may have the theoretic advantage of better reflecting the pathologic changes of

- 9 -

1 spondylolisthesis, it comes at the cost of decreasing correlation with slip percentage.

2 However, reliability measures were once again not affected.

3

#### 4 **CONCLUSION**

5 The results of this study show that all measures of lumbosacral kyphosis have substantial  
6 to almost perfect inter- and intra- rater reliability. Dubousset's LSA showed the strongest  
7 correlation with slip grade, but its measurement does not involve the identification of the  
8 lower endplate of L5 and upper endplate of S1 which are often dysplastic in  
9 spondylolisthesis. In order to increase the reliability of the measurement of lumbosacral  
10 kyphosis in spondylolisthesis, the authors recommend the use of a computer-assisted  
11 technique based on the identification of the corners of L5 and S1.

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

1

2 **FIGURE CAPTIONS**

3 Figure1. The six radiographic parameters of LSK that were evaluated (see text for  
4 details.) A- Boxall's slip angle; B- Dubousset's lumbosacral angle, LSA; C- Spinal  
5 Deformity Study Group's, SDSG LSA; D-SDSG dysplastic LSA; E-sagittal rotation, F-  
6 kyphotic Cobb angle.

7

8 Figure2. Dysplastic changes that can occur at the L5 and S1 vertebrae (dotted lines).



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47

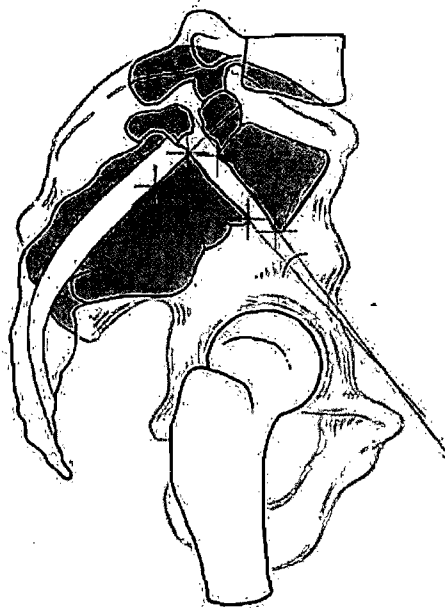
**References**

1. Amundson G, Edwards CC, Garfin SR(1992). Spondylolisthesis. In: Herkowitz HN, Garfin SR, Balderston RA, et al., (eds). *The Spine*. W.B. Saunders Company, Philadelphia, pp 913-969
2. Antoniadou SB, Hammerberg KW, Dewald RL (2000) Sagittal plane configuration of the sacrum in spondylolisthesis. *Spine* 25:1085-1091
3. Berthounaud E, Dimnet J, Labelle H, et al (2004) Spondylolisthesis. In: O'Brien MF, Kuklo TR, Blanke KM, et al, (eds) *Spinal Deformity Group Radiographic Measurement Manual*, Medtronic Sofamor Danek, Memphis pp 95-108
4. Boxall D, Bradford DS, Winter RB, et al (1979) Management of severe spondylolisthesis in children and adolescents. *J Bone Joint Surg Am* 61:479-495
5. Bradford DS (1995) Spondylolysis and Spondylolisthesis. In: Lonstein JE, Winter RB, Bradford DS, et al., (eds) *Textbook of Scoliosis and Other Spinal Deformities*. W.B. Saunders Company, Philadelphia, pp 399-430
6. Burkus JK, Lonstein JE, Winter RB, Denis F (1992) Long-term evaluation of adolescents treated operatively for spondylolisthesis. A comparison of in situ arthrodesis only with in situ arthrodesis and reduction followed by immobilization in a cast. *J Bone Joint Surg Am* 74:693-704
7. Cohen J, Cohen P, West SG, et al, (2003) *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences*. Lawrence Erlbaum Associates Hillsdale
8. Dubousset J (1997) Treatment of spondylolysis and spondylolisthesis in children and adolescents. *Clin Orthop* 337:77-85
9. Faro FD, Marks MC, Pawelek J et al (2004) Evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 29:2284-2289
10. Frennered AK, Danielson BI, Nachemson AL (1991) Natural history of symptomatic isthmic low-grade spondylolisthesis in children and adolescents: a seven-year follow-up study. *J Pediatr Orthop* 11:209-213
11. Harris IE, Weinstein SL (1987) Long-term follow-up of patients with grade-III and IV spondylolisthesis. Treatment with and without posterior fusion. *J Bone Joint Surg Am* 69:960-969
12. Harrison DE, Harrison DD, Cailliet R, et al (2001) Radiographic Analysis of Lumbar Lordosis. Centroid, Cobb, TRALL, and Harrison Posterior Tangent Methods. *Spine* 26:E235-E242
13. Hensinger RN (1989) Spondylolysis and Spondylolisthesis in Children and Adolescents. *J Bone Joint Surg Am* 71:1098-1107
14. Herman MJ, Pizzutillo PD, Cavalier R (2003) Spondylolysis and spondylolisthesis in the child and adolescent athlete. *Orthop Clin North Am* 34:461-467
15. Horton WC, Brown CW, Bridwell KH et al 2005 Is there an optimal patient stance for obtaining a lateral 36" radiograph? *Spine* 30:427-433
16. Hu SS, Bradford DS (2001) Spondylolysis and Spondylolisthesis In: Weinstein SL, (ed). *The Pediatric Spine Principles and Practice*. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia pp 433-451

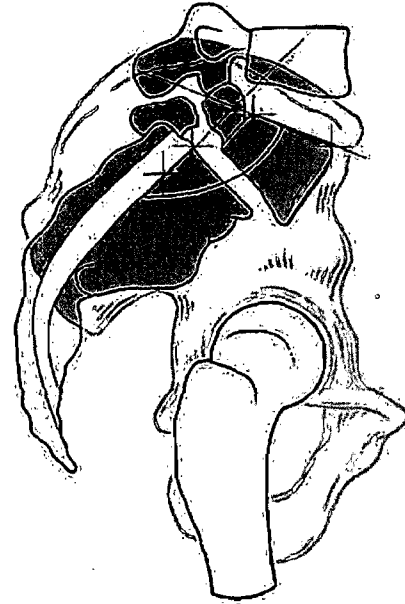
- 12 -

- 1 17. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, et al (2005) The importance of spino-
- 2 2 pelvic balance in L5-S1 developmental spondylolisthesis: a review of pertinent
- 3 3 radiological measurements. *Spine* 30:S27-S34
- 4 4
- 5 3
- 6 4 18. Landis JR, Koch GG (1977) The measurement of observer agreement for
- 7 5 categorical data. *Biometrics* 33:159-74
- 8 6
- 9 6 19. Lonstein JE (1999) Spondylolisthesis in Children. *Spine* 24:2640-2648
- 10 7 20. Mac-Thiong JM, Labelle H, Parent S, et al (2007) Assessment of sacral doming in
- 11 8 lumbosacral spondylolisthesis. *Spine* 32:1888-1895
- 12 9 21. Mardjetko S, Albert T, Gunnar A, et al. (2005) *Spine/SRS Spondylolisthesis*
- 13 10 *Summary Statement*. *Spine* 30:S3
- 14 11 22. Meyerding HW (1932) Spondylolisthesis. *Surg Gynecol Obstet* 54:371-377
- 15 12 23. Molinari RW, Lenke LG (2003) Pediatric Spondylolysis and Spondylolisthesis.
- 16 12 In: Frymoyer JW, Wiesel SW (eds) *The Adult and Pediatric Spine*. Lippincott
- 17 13 Williams & Wilkins, Philadelphia, pp 300-423
- 18 14 24. Molinari RW, Bridwell KH, Lenke LG, et al (1999) Complications in the surgical
- 19 15 treatment of pediatric high-grade, isthmic dysplastic spondylolisthesis. A
- 20 16 comparison of three surgical approaches. *Spine* 24:1701-1711
- 21 17
- 22 17 25. Petraco DM, Spivak JM, Cappadona JG, et al (1996) An anatomic evaluation of
- 23 18 L5 nerve stretch in spondylolisthesis reduction. *Spine* 21:1133-1139
- 24 19
- 25 20 26. Speck GR, McCall IW, O'Brien JP (1984) Spondylolisthesis: The angle of
- 26 20 kyphosis. *Spine* 9:659-660
- 27 21
- 28 22 27. Timon SJ, Gardner MJ, Wanich T, et al (2005). Not all spondylolisthesis grading
- 29 23 instruments are reliable. *Clin Orthop Relat Res* 434:157-162
- 30 24 28. Vialle R, Schmit P, Dauzac C, et al (2005) Radiological assessment of
- 31 25 lumbosacral dystrophic changes in high-grade spondylolisthesis. *Skeletal Radiol*
- 32 25 34:528-535
- 33 26
- 34 27 29. Wiltse LL, Winter RB (1983) Terminology and measurement of spondylolisthesis.
- 35 28 *J Bone Joint Surg Am* 65:768-772
- 36 29 30. Winter JG, Bell D (1991) Lumbosacral Joint Angles. *J Pediatr Orthop* 11:748-
- 37 30 751
- 38 30
- 39 31 31. Yue W-M, Brodner W, Gaines RW (2005) Anatomical findings in 27 cases of
- 40 32 surgically corrected spondyloptosis. Proximal sacral endplate damage as a
- 41 32 possible cause of spondyloptosis. *Spine* 30:S22-S26
- 42 33
- 43 34
- 44 35
- 45 36
- 46 37
- 47 37
- 48
- 49
- 50
- 51
- 52
- 53
- 54
- 55
- 56
- 57
- 58
- 59
- 60
- 61
- 62
- 63
- 64
- 65

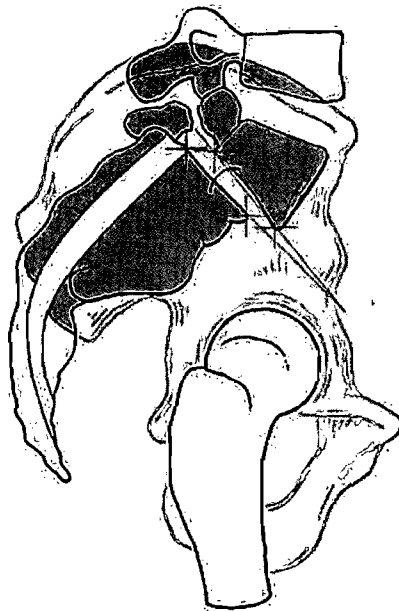
Figure 1



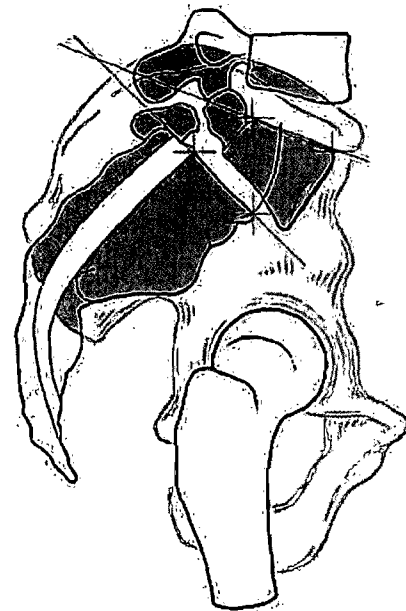
A. Boxall's slip angle



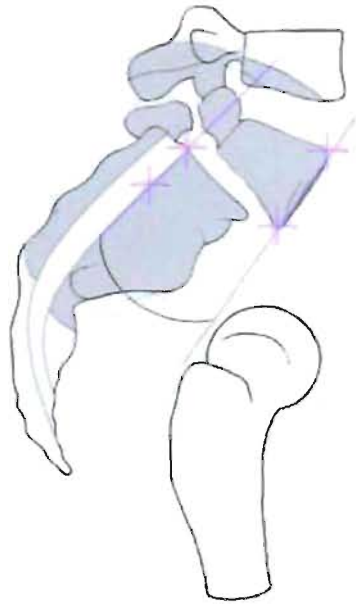
B. Dubouset's LSA



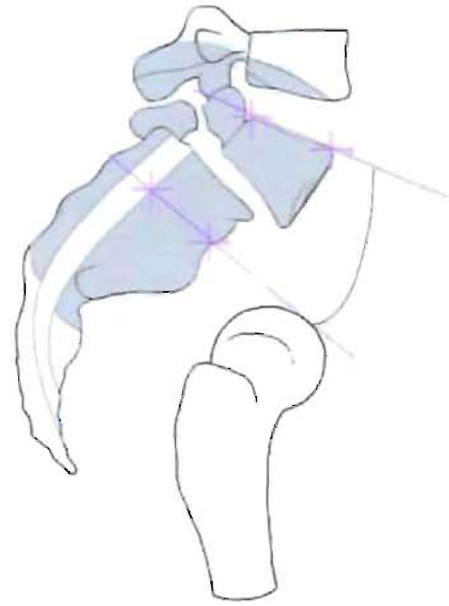
C. SDSG LSA



D. SDSG dysplastic LSA



E. Sagittal rotation



F. Kyphotic Cobb angle

Figure 2



- 1 -

1 Table 1: Baseline information of the sixty selected subjects

	Normals <i>n</i> =20	Low grade <i>n</i> =20	High grade <i>n</i> =20	ANOVA
Age average (std dev) years	13.8 (2.0)	12.6 (3.6)	14.8 (2.9)	0.07
Males/females (number)	4/16	7/13	5/15	-----
Avg slip % (Std dev)	----	29.1 (8.5)	71.7 (16.3)	-----

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

Table 2: Average LSK angles (all raters)

Parameter	Controls <i>n</i> =20 Angle (°) (Std dev)	Low grade <i>n</i> =20 Angle(°) (Std dev)	High grade <i>n</i> =20 Angle(°) (Std dev)
Boxall's slip angle	20.8 (8.2)	15.1 (8.1)	39.7 (18.8)
Dubousset's LSA	119.0 (8.3)	110.3 (13.3)	71.0 (15.9)
SDSG LSA	13.6 (6.4)	13.7 (6.3)	30.1 (20.2)
SDSG-dys LSA	21.7 (6.3)	21.7 (8.2)	14.0 (13.9)
Sagittal rotation	28.1 (7.5)	21.7 (7.5)	26.1 (15.8)
Kyphotic Cobb	34.8 (9.9)	27.9 (10.5)	18.2 (15.1)

13

14

15

16

17

18

19

- 2 -

1 Table 3: Intra- and inter- observer reliability

Parameter	Intra-observer ICC (95% CI)	Inter-observer ICC (95% CI)
Boxall's slip angle	High grade: 0.96 (0.93-0.97)	High grade: 0.94 (0.92-0.96)
	Low grade: 0.95 (0.92-0.96)	Low grade: 0.93 (0.90-0.95)
	Normal: 0.89 (0.84-0.93)	Normal: 0.87 (0.81-0.90)
Dubousset's LSA	High grade: 0.97 (0.95-0.98)	High grade: 0.95 (0.92-0.96)
	Low grade: 0.97 (0.96-0.98)	Low grade: 0.98 (0.97-0.98)
	Normal: 0.91 (0.87-0.94)	Normal: 0.91 (0.87-0.94)
SDSG LSA	High grade: 0.96 (0.93-0.97)	High grade: 0.93 (0.90-0.95)
	Low grade: 0.87 (0.81-0.92)	Low grade: 0.84 (0.77-0.88)
	Normal: 0.89 (0.80-0.93)	Normal: 0.84 (0.78-0.89)
SDSG-dys LSA	High grade: 0.94 (0.91-0.96)	High grade: 0.88 (0.83-0.91)
	Low grade: 0.92 (0.88-0.95)	Low grade: 0.89 (0.85-0.92)
	Normal: 0.90 (0.85-0.93)	Normal: 0.87 (0.82-0.91)
Sagittal rotation	High grade: 0.96 (0.94-0.97)	High grade: 0.93 (0.90-0.95)
	Low grade: 0.90 (0.85-0.93)	Low grade: 0.87 (0.82-0.91)
	Normal: 0.81 (0.74-0.88)	Normal: 0.74 (0.65-0.82)
Kyphotic Cobb	High grade: 0.94 (0.91-0.96)	High grade: 0.91 (0.87-0.93)
	Low grade: 0.94 (0.94-0.96)	Low grade: 0.90 (0.86-0.93)
	Normal: 0.84 (0.76-0.89)	Normal: 0.84 (0.78-0.89)

2

3

4

5

6

7

Table 4: Pearson's correlations between LSK parameters and percent slip

	Boxall slip angle	Dub LSA	SDSG LSA	Dys SDSG	SR	k-Cobb
Pearson	0.43	-0.78	0.41	-0.31	-0.10	-0.50
p-value	$2.5 \times 10^{-12}$	$3.6 \times 10^{-50}$	$5.0 \times 10^{-11}$	$9.7 \times 10^{-07}$	0.11	$1.7 \times 10^{-16}$

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

## **Chapitre 4 – Évaluation de la morphologie sacro-pelvienne et de l'équilibre spino-pelvien durant la croissance**

Cet article documentant les modifications de l'équilibre spino-pelvien durant la croissance a été publié dans la revue Spine.

Spine 2004;29:1642-1647

**Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth**

Mac-Thiong J-M, Berthonnaud É, Dimar II JR, Betz RR, Labelle H

## Sagittal Alignment of the Spine and Pelvis During Growth

Jean-Marc Mac-Thiong, MD,\*\* †Éric Berthoinaud, PhD, ‡John R. Dimar II, MD, §¶  
Randal R. Betz, MD, || and Hubert Labelle, MD\*\*†

**Study Design.** Prospective study of the sagittal plane alignment of the spine and pelvis in the normal pediatric population.

**Objectives.** To document the sagittal alignment of the spine and pelvis and its change during growth in the normal pediatric population.

**Summary of Background Data.** Pelvic morphology as well as sagittal alignment of the spine and pelvis in the pediatric population are poorly defined in the literature.

**Methods.** Five parameters were evaluated on lateral standing radiographs of 180 normal study participants 4 to 13 years of age: thoracic kyphosis, lumbar lordosis, sacral slope, pelvic tilt, and pelvic incidence. Statistical analysis was performed using two-tailed Student *t* tests and Pearson's coefficients (level of significance = 0.01).

**Results.** The mean thoracic kyphosis, lumbar lordosis, sacral slope, pelvic tilt, and pelvic incidence values were 43.6°, 48.4°, 41.2°, 7.2°, and 48.4°, respectively. There was no significant difference between males and females. Thoracic kyphosis, lumbar lordosis, pelvic tilt, and pelvic incidence were found to be weakly correlated with age, while sacral slope remained stable with growth.

**Conclusions.** Pelvic morphology, as measured by the pelvic incidence angle, tends to increase during childhood and adolescence before stabilizing into adulthood, most likely to maintain an adequate sagittal balance in view of the physiologic and morphologic changes occurring during growth. Pelvic tilt and lumbar lordosis, two position-dependent parameters, also react by increasing with age, most likely to avoid inadequate anterior displacement of the body center of gravity. Sacral slope is achieved with the standing posture and is not further significantly influenced by age. These results are important to establish baseline values for these measurements

in the pediatric population, in view of the reported association between pelvic morphology and the development of various spinal disorders such as spondylolisthesis and scoliosis.

**Key words:** growth, kyphosis, lordosis, pelvic incidence, posture, pelvis, sagittal balance. *Spine* 2004;29:1642-1647

Different parameters have been used to describe the pelvic morphology based on standing lateral radiographs. These morphologic parameters are specific to each individual and unaffected by the three-dimensional orientation of the pelvis. During *et al*<sup>1</sup> defined the pelvisacral angle, which represents the angle between a line tangent to the sacral plate and the line through the center of the hip joints and the middle of the sacral plate. Subsequently, Duval-Beaupère *et al*<sup>2</sup> introduced the pelvic incidence, which is the complement angle to the pelvisacral angle. Jackson *et al*<sup>3</sup> later suggested the measurement of the pelvic lordosis angle to assess the pelvic morphology. Recently, Jackson *et al*<sup>4</sup> found the intraobserver and interobserver reliabilities to be similar for all three measurement techniques.

Several studies have shown that the sagittal pelvic morphology greatly influences the standing balance in normal adults, especially by regulating the lumbar lordosis.<sup>5-10</sup> It has also been shown that the pelvic incidence remains relatively constant during adulthood.<sup>8,11</sup> However, the course of the sagittal pelvic morphology after the acquisition of walking in normal pediatric subjects is poorly defined. Hanson *et al*<sup>12</sup> evaluated the pelvic incidence in 20 pediatric controls (mean age, 11.8 years) but did not evaluate its association with age. Two studies<sup>13,14</sup> have investigated the influence of age on the pelvic incidence in subjects without spinal deformity. Descamps *et al*<sup>13</sup> suggested that the pelvic incidence was relatively stable before 10 years old and then increased significantly during adolescence until reaching its maximum value in adulthood. However, they did not specifically evaluate the influence of age on the pelvic incidence with correlation studies. Instead, they compared the pelvic incidence of different groups of patients classified according to specific (and arbitrary) age groups. It is therefore impossible to accurately conclude about the progression of the pelvic incidence during growth from their data. Mangione *et al*<sup>14</sup> showed that the pelvic incidence tended to increase linearly during childhood after the acquisition of walking. However, they did not document the influence of age on the pelvic incidence during

From the \*Department of Orthopaedic Surgery, Université de Montréal, and †Motion Sciences Research Chair, Research Center, Hôpital Sainte-Justine, Montréal, Canada; ‡Optimage, Group of Applied Research in Orthopaedics, Lyon, France; §Departments of Orthopaedic Surgery and Neurological Surgery, University of Louisville, and ¶Kenton D. Leatherman Spine Center, Louisville, KY; and ||Shriners Hospital of Philadelphia, Philadelphia, PA.

Acknowledgment date: April 18, 2003. First revision date: August 23, 2003. Acceptance date: September 9, 2003.

Supported by the Spinal Deformity Group and funded by an educational/research grant from Medtronic Sofamor Danek, by the Strategic Training Grants Program of the Canadian Institute of Health Research, and by the Fondation de recherche et d'éducation en orthopédie de Montréal.

The manuscript submitted does not contain information about medical device(s)/drug(s).

Corporate/Industry, Federal, and Foundation funds were received in support of this work. No benefits in any form have been or will be received from a commercial party related directly or indirectly to the subject of this manuscript.

Address correspondence and reprint requests to Hubert Labelle, MD, Division of Orthopaedics, Hôpital Sainte-Justine, 3175 Côte-Sainte-Catherine, Montréal, Québec, Canada H3T 1C5; E-mail:



adolescence, where most of the increase in pelvic incidence is thought to occur.<sup>13</sup>

In the recent literature, there is also an emerging interest in the assessment of pelvic morphology in patients with spinal disorders.<sup>3,4,7,8,11,12,15-18</sup> Recent studies suggest a possible association between pelvic morphology and the development of spondylolisthesis<sup>4,8,11,12,18,19</sup> and adolescent idiopathic scoliosis.<sup>17</sup> However, the lack of a reliable pediatric control database has limited the conclusions of these studies with respect to growing children and adolescents.

The purpose of this study was therefore to document the sagittal alignment of the spine and pelvis in the pediatric population, as well as to characterize its changes during growth. This work will be of primary importance to better understand the association between pelvic morphology and spinal curvatures in normal pediatric subjects. It will also provide a reliable control database to study the influence of the pelvic morphology on the pathogenesis, evaluation, and treatment of various spinal disorders in pediatric patients.

#### Materials and Methods

A total of 180 normal children and adolescents were prospectively recruited from the clientele of five spine surgeons. These study participants were referred by their pediatrician or family physician to rule out scoliosis. All patients had standing posteroanterior and lateral radiographs of the spine and pelvis done as part of the routine screening for scoliosis. A similar radiologic protocol was used at all participating institutions, with a 30 × 90 cm lateral radiograph obtained with each subject in a comfortable standing position and the knees fully extended. The study participants were selected if the clinical examination and radiographs did not show any evidence of a spinal disorder. There were 68 males and 112 females, and the mean age was 12.0 years (standard deviation, 3.1 years; range, 4–18 years). The mean age was similar between males and females.

A computer software (Optimage, Group of Applied Research in Orthopaedics, Lyon, France) was used by a single observer to assess the sagittal alignment of the spine and pelvis for all subjects. The technique for computing the parameters has been described in previous studies.<sup>10,20</sup> Three pelvic parameters were obtained (Figure 1): the pelvic incidence (PI), the sacral slope (SS), and the pelvic tilt (PT). Geometrically, the PI equals the sum of the SS and the PT. The software also generates a geometric model of the spine in the sagittal plane (Figure 2) composed of: 1) a thoracic segment, 2) a straight thoracolumbar junction, and 3) a lumbar segment. The thoracic kyphosis (TK) and the lumbar lordosis (LL) correspond to the angles contained by the arcs of circle used to model the thoracic and lumbar segments, respectively. The interobserver and intraobserver variability of these measurements is  $\pm 1^\circ$  with an intraclass correlation coefficient between 0.92 and 0.99, as reported by Berthonnaud *et al*<sup>21</sup> in a study evaluating the lateral radiographs of 15 normal and 15 scoliotic subjects.

The data were analyzed using the Statistica software (StatSoft, Tulsa, OK). Comparisons were made using two-tailed Student *t* tests and relationships were assessed using Pearson's coefficients. The level of significance was set at 0.01.

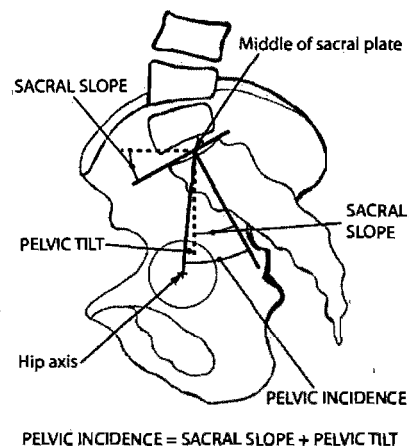


Figure 1. Sagittal pelvic parameters assessed from the standing lateral radiograph. The hip axis is located midway between the center of the femoral heads. The pelvic incidence is defined as the angle between the perpendicular of the sacral plate and the line joining the middle of the sacral plate and the hip axis. The sacral slope represents the angle between the sacral plate and the horizontal line. The pelvic tilt is measured from the angle between the vertical line and the line joining the middle of the sacral plate and the hip axis. It is positive when the hip axis lies in front of the vertical line through the middle of the sacral plate.

#### Results

Table 1 provides the results of the pelvic and spinal parameters measured by the computer software. The mean ( $\pm$  standard deviation) PI, PT, and SS were  $48.4 \pm 11.2^\circ$ ,

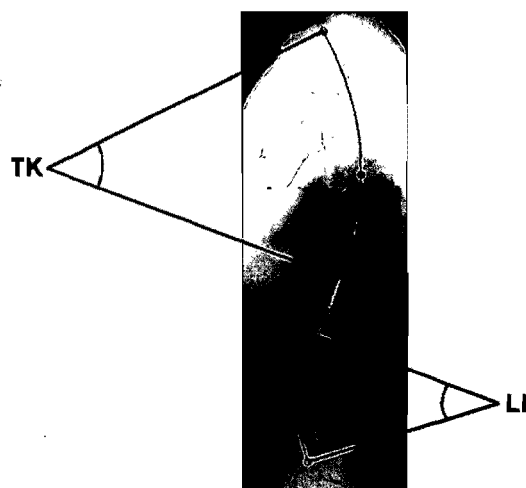


Figure 2. The software generates a geometric model of the spine. The thoracic and lumbar segments are intercalated by a straight thoracolumbar junction. The thoracic kyphosis (TK) and lumbar lordosis (LL) correspond to the angles contained by the arcs of circle used to model the thoracic and lumbar segments, respectively.

**Table 1. Sagittal Alignment of the Spine and Pelvis (Mean  $\pm$  Standard Deviation)**

Parameter	Patients < 10 Yrs Old (n = 35)	Patients $\geq$ 10 Yrs Old (n = 145)	All Patients (n = 180)
Mean age (yr)	7.3 $\pm$ 1.8	13.1 $\pm$ 2.1	12.0 $\pm$ 3.1
Pelvic incidence ( $^{\circ}$ )	44.6 $\pm$ 10.6	49.3 $\pm$ 11.2	48.4 $\pm$ 11.2
Pelvic tilt ( $^{\circ}$ )	4.3 $\pm$ 8.1	7.9 $\pm$ 7.7	7.2 $\pm$ 7.9
Sacral slope ( $^{\circ}$ )	40.3 $\pm$ 8.7	41.4 $\pm$ 8.5	41.2 $\pm$ 8.5
Thoracic kyphosis ( $^{\circ}$ )	38.3 $\pm$ 9.8	44.2 $\pm$ 10.3	43.0 $\pm$ 10.4
Lumbar lordosis ( $^{\circ}$ )	45.6 $\pm$ 12.1	49.2 $\pm$ 12.4	48.5 $\pm$ 12.4

7.2  $\pm$  7.9 $^{\circ}$ , and 41.2  $\pm$  8.5 $^{\circ}$ , respectively. The TK (43.0  $\pm$  10.4 $^{\circ}$ ) was significantly smaller than the LL (48.5  $\pm$  12.4 $^{\circ}$ ) ( $P < 10^{-5}$ ). Smaller values for all parameters were observed in children younger than 10 years old when compared with subjects 10 years of age or older. The difference was smallest for the mean SS, approaching the variability of measurement technique, which is  $\pm 1^{\circ}$ .<sup>21</sup>

There was no significant difference in any pelvic or spinal parameter between males and females ( $P < 0.01$ ), although females tended to have increased values for all measured parameters.

Figure 3 shows the values of PI with respect to age found in the current study. Linear regression analysis was performed separately for subjects younger than 10 years old and for subjects aged 10 years or older. Trend lines corresponding to the linear regression analysis were drawn for each subgroup of subjects. There was no rough break in continuity between the two trend lines. The PI predicted by each trend line at 10 years old was 46.0 $^{\circ}$  and 47.0 $^{\circ}$  for the left and right trend lines, respectively.

The correlation study showed a tendency for positive direct linear association between age and all measured parameters (Figure 4). Statistical significant associations with age were found for TK (Figure 4A,  $r = 0.26$ ,  $P =$

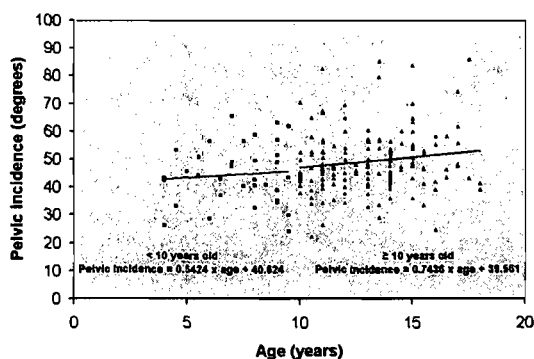


Figure 3. The association between age and pelvic incidence. Equations resulting from the linear regression analysis were drawn separately for the subjects younger than 10 years left trend line: pelvic incidence = 0.5424  $\times$  age + 40.624) and for subjects 10 years of age or older (right trend line: pelvic incidence = 0.7436  $\times$  age + 39.561).

0.0004), LL (Figure 4B,  $r = 0.24$ ,  $P = 0.001$ ), PI (Figure 4C,  $r = 0.21$ ,  $P = 0.004$ ), and PT (Figure 4E,  $r = 0.20$ ,  $P = 0.008$ ). The SS was the only parameter not correlated with age (Figure 4D,  $r = 0.10$ ,  $P = 0.2$ ).

## Discussion

This study was performed to document the sagittal alignment of the spine and pelvis in pediatric subjects and to characterize the modifications associated with growth. There are two major limitations to this work. First, the recruited subjects were all discharged after their consultant spine surgeon ruled out a spinal pathology. Since no follow-up visits were planned, it is possible that some of these patients will develop a spinal disorder in the future. Second, as for any cross-sectional study, no definite conclusion about the evolution of the sagittal alignment of the spine and pelvis over time can be drawn. Ideally, a longitudinal study would allow adequate selection of normal subjects and accurate assessment of the association between age and the sagittal parameters of the spine and pelvis. Unfortunately, such methodology would require serial radiographs in normal children and is thus almost impossible because of ethical concerns.

As shown in Table 2, the value for PI found in the current study for all subjects (48.4  $\pm$  11.2 $^{\circ}$ ) was similar ( $P = 0.7$ ) to the value (47.4  $\pm$  7.5 $^{\circ}$ ) obtained by Hanson *et al*<sup>12</sup> for a group of similar age (mean, 11.8 years). The PI of subjects aged 10 years or older (49.3  $\pm$  11.2 $^{\circ}$ ) was also comparable ( $P = 0.3$ ) to the PI (46.8  $\pm$  11.2 $^{\circ}$ ) observed by Descamps *et al*<sup>13</sup> for subjects 10 to 17 years of age (mean, 13.5 years). For children younger than 10 years, Mangione *et al*<sup>14</sup> found the PI to be 39.5  $\pm$  8.9 $^{\circ}$  in 30 subjects (mean age, 3.2 years). The PI was slightly higher (41.8  $\pm$  8.0 $^{\circ}$ ) for the children younger than 10 years old (mean age, 5 years) reported by Descamps *et al*.<sup>13</sup> In the current study, the subgroup of subjects younger than 10 years (mean age, 7.3 years) was older than the groups of children included in the aforementioned studies<sup>13,14</sup> and consequently had a greater PI value of 44.6  $\pm$  10.6 $^{\circ}$ . This is in accordance with the trend observed for this study (Figure 3) and with the significant association between age and pelvic incidence reported by Mangione *et al*<sup>14</sup> for children younger than 10 years.

Descamps *et al*<sup>13</sup> suggested that the PI remained relatively constant throughout childhood and only increases after 10 years of age. Conversely, Mangione *et al*<sup>14</sup> stated that the PI significantly increases during childhood and reached a stable value (same as the adult value) at approximately 10 years of age. Unfortunately, both these studies were performed with a small sample size. The present study is the largest so far published in the literature and partly refutes both the previous conflicting reports.<sup>13,14</sup> Figure 3 illustrates the tendency of PI to increase linearly with age for children and adolescents. Furthermore, no major break in continuity was found between the trend lines for children younger or older than 10 years (Figure 3). Therefore, the PI tends to in-

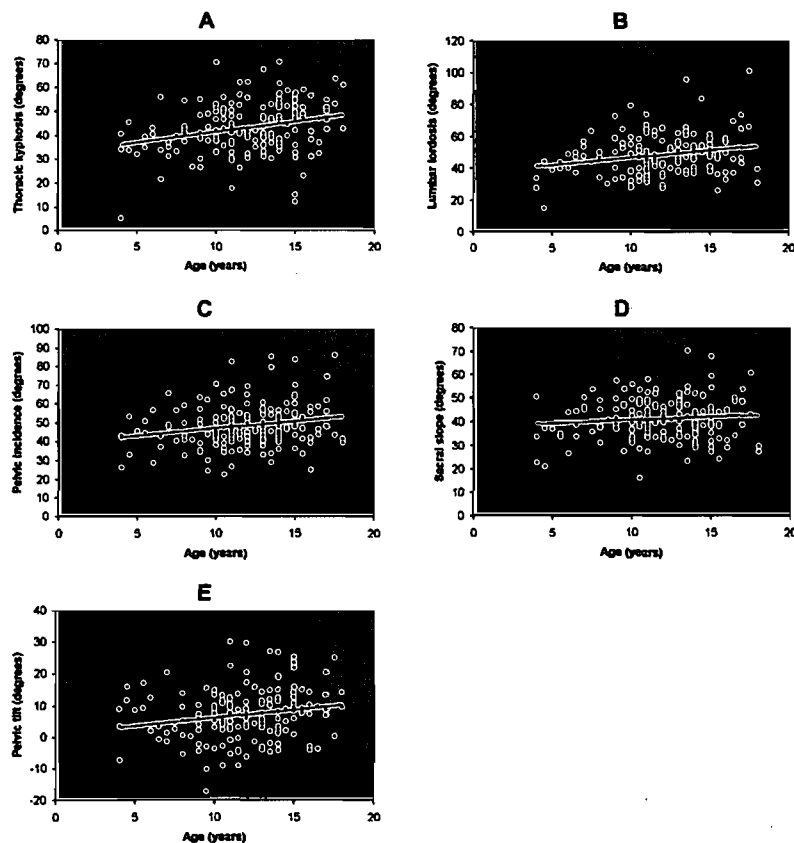


Figure 4. Correlation analysis between age and sagittal parameters of the spine and pelvis. **A:** Correlation between age and thoracic kyphosis ( $r = 0.26$ ,  $P = 0.0004$ ). **B:** Correlation between age and lumbar lordosis ( $r = 0.24$ ,  $P = 0.001$ ). **C:** Correlation between age and pelvic incidence ( $r = 0.21$ ,  $P = 0.004$ ). **D:** Correlation between age and sacral slope ( $r = 0.10$ ,  $P = 0.2$ ). **E:** Correlation between age and pelvic tilt ( $r = 0.20$ ,  $P = 0.008$ ).

crease from 4 to 18 years of age, as confirmed by the significant correlation ( $r = 0.21$ ,  $P = 0.004$ ) found when all subjects were considered (Figure 4C). This is further reinforced by the fact that the current mean PI is similar to the PI values reported for children of similar age, but

tends to be lower than the PI found for normal adults (Table 2). Furthermore, the evaluation of the PI for the present cohort and for a previous cohort of normal adults<sup>10</sup> by the same observer using the same measuring software revealed a significant difference in PI ( $P < 0.01$ ).

**Table 2. Historical Comparison of Pelvic Incidence in Normal Subjects**

Study	Pelvic Incidence (°)	Sample Size	Age (Range)* (Yr)	P†
Current study	48.4 ± 11.2	180	12.0 ± 3.1 (4–18)	—
Mangione <i>et al</i> <sup>14</sup>	39.5 ± 8.9	30	3.2 ± 1.9 (1–9)	< 0.0001‡
Descamps <i>et al</i> <sup>13</sup>	41.8 ± 8.0	29	5 (1–10)	0.0013‡
Hanson <i>et al</i> <sup>12</sup>	47.4 ± 7.5	20	11.8	0.35
Descamps <i>et al</i> <sup>13</sup>	46.8 ± 11.2	27	13.5 (10–17)	0.24
Descamps <i>et al</i> <sup>13</sup>	51.4 ± 10.7	44	24 (19–47)	0.055
Legaye <i>et al</i> <sup>7</sup>	Female: 48.2 ± 7.0	21	24 ± 5.8 (19–50)	0.53
	Male: 53.2 ± 10.3	28		0.017
Marty <i>et al</i> <sup>8</sup>	51.4 ± 10.8	44	24 (19–28)	0.055
Vaz <i>et al</i> <sup>10</sup>	51.7 ± 11.5	100	26.5 ± 4 (23–45)	0.010‡
Mangione <i>et al</i> <sup>14</sup>	55.4 ± 9.9	30	28.6 ± 6.3 (17–46)	< 0.001‡
Duval-Beaupère <i>et al</i> <sup>2</sup>	51.8 ± 9.4	17	29.5	0.11
Rajnics <i>et al</i> <sup>9</sup>	54.3 ± 8.5	30	34.3 ± 3.1 (30–39)	0.0032‡
Hanson <i>et al</i> <sup>12</sup>	57.0 ± 11.5	20	60.0	< 0.001‡
Hammerberg and Wood <sup>21</sup>	60.5 ± 15.2	50	76.3 (70–85)	< 10 <sup>-6</sup> ‡

\*When available.

†From the comparison with the PI for the subjects of this study.

‡Significant change ( $P < 0.01$ )

As for the acquisition of the bipedal posture and locomotion in the human species, the growing child needs constant adaptations in the morphology and orientation of the pelvis to maintain an adequate sagittal balance and appropriate configuration in terms of skeletal loads, muscle fatigue, and energy expenditure.<sup>2,11,13,14,22,23</sup> It is our belief that the observed changes in PI (Figure 4C) and the evidence of its stabilization during adulthood<sup>8,14</sup> reflect the efforts of the human body to maintain an adequate sagittal balance in view of the physiologic and morphologic changes occurring during growth, even if the present study cannot confirm this hypothesis. Geometrically, the PI directly determines and can be shown to be the summation of two parameters (SS and PT), which are dependent on the position of the subject (Figure 1). Two hypotheses could partly explain the role of the PT and the SS in regulating the standing posture. First, as already emphasized by many authors,<sup>2,5,6</sup> the PT serves to optimally position the center of gravity over the hips and lower limbs, by maintaining the sacral plate posterior to the hip axis. The results of this study (Figure 4E) demonstrate that the PT tends to increase with age, indicating that the sacral plate tends to be displaced further posterior with respect to the hip axis. Because the upper body weight increases significantly during growth and because the sacral plate (and vertebral column) represents the posterior part of the body, it appears logical to assume that the PT increases to avoid an inadequate anterior displacement of the center of gravity during growth.

A second hypothesis could help understand the changes in the SS. Its orientation is largely related to the acquisition of the bipedal posture.<sup>11,13,14,22</sup> In the present study involving only walking children, no association was found between age and the SS (Figure 4D). The SS value was within the normal values for adult subjects<sup>1,2,6-10</sup> but was significantly higher ( $P < 10^{-6}$ ) than the reported value for nonwalking children.<sup>9</sup> Therefore, it seems that, during the acquisition of the standing position, the sacral plate becomes more vertical, leading to an increase in the SS value. However, the SS stabilizes after the acquisition of walking and is not influenced by further growth.

The mean TK and LL was  $43.0 \pm 10.4^\circ$  and  $48.5 \pm 12.4^\circ$ , respectively. These results are within the normal ranges previously published by various authors.<sup>10,24-29</sup> As already observed by Voutsinas and MacEwen,<sup>29</sup> both parameters tend to increase with age in the growing child (Figure 4A, B). As for the pelvic parameters, the LL is also linked to the maintenance of a balanced standing position.<sup>1,2,6,10,11,14,30</sup> The presence of an adequate LL avoids forward displacement of the center of gravity that may alter the equilibrium of the standing posture.<sup>2</sup> The action of the erector spinae muscles<sup>14</sup> and the vertebral growth may therefore contribute to increase the LL to avoid inadequate forward displacement of the center of gravity, which could be modified by the upper body growth. The TK mainly serves to balance the LL.<sup>6,10</sup> Its increase with age may be related to the increasing LL

during growth. Conversely, it could also be dependent on the development of the respiratory system or on the thoracic vertebral growth pattern. This last hypothesis was suggested in a previous study<sup>17</sup> that reported a significantly different TK among patients with adolescent idiopathic scoliosis based on the localization of their scoliotic curve. This view was also reinforced by the absence of a significant association between the TK and the LL in both adolescent idiopathic scoliosis patients<sup>17</sup> and normal adolescents.<sup>28</sup>

Girls generally reach their skeletal maturity at an earlier chronological age than boys. In this study, the mean age was similar for boys and girls, so it is assumed that a higher proportion of girls have reached skeletal maturity. This might explain their tendency toward higher but nonsignificant values in all measured spinopelvic parameters. Ideally, we would have based our study on the skeletal age instead of the chronological age, but additional routine radiographs to evaluate the skeletal age of normal children was unacceptable for ethical reasons. This is a major limitation to this study.

While this study documented the sagittal parameters of the spine and pelvis and their modifications with age, it cannot totally explain the standing postural mechanisms in pediatric subjects. Further investigation involving correlation studies of spinal and pelvic parameters is under progress to achieve a better understanding of the sagittal balance of the spine and pelvis in the pediatric population.

#### ■ Key Points

- The pelvic incidence tends to increase from 4 to 18 years of age.
- The pelvic tilt and the lumbar lordosis tend to increase with age to maintain an adequate sagittal balance during growth.
- The sacral slope is not significantly influenced by age after acquisition of walking.

#### Acknowledgments

The authors thank the following members of the Spinal Deformity Study Group for contributing cases to this study: Charles E. Johnston II (Texas Scottish Rite Hospital for Children, Dallas, TX) and Peter O. Newton (Children's Hospital and Health Center, San Diego, CA).

#### References

1. During J, Goudfröij H, Keessen W, et al. Toward standards for posture: postural characteristics of the lower back system in normal and pathologic conditions. *Spine*. 1985;10:83-87.
2. Duval-Beaupère G, Schimdt C, Cosson P. A barycentric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng*. 1992;20:451-462.
3. Jackson RP, Kanemura T, Kawakami N, et al. Lumbopelvic lordosis and pelvic balance on repeated standing lateral radiographs of adult volunteers and untreated patients with constant low back pain. *Spine*. 2000;25:575-586.
4. Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine*. 2003;28:151-160.

5. Jackson RP, Hales C. Congruent spinopelvic alignment on standing lateral radiographs of adult volunteers. *Spine*. 2000;25:2808-2815.
6. Legaye J, Hecquet J, Marty C, et al. Sagittal equilibration of the spine: relationship between pelvis and sagittal spinal curves in the standing position [in French]. *Rachis*. 1993;5:215-226.
7. Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, et al. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J*. 1998;7:99-103.
8. Marty C, Boisaubert B, Descamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J*. 2002;11:119-125.
9. Rajnics P, Pomero V, Templier A, et al. Computer-assisted assessment of spinal sagittal plane radiographs. *J Spinal Disord*. 2001;14:135-142.
10. Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J*. 2002;11:80-87.
11. Mangione P, Sénégal J. Normal and pathologic sagittal balance of the spine and pelvis [in French]. *Rev Chir Orthop*. 1997;83:22-32.
12. Hanson DS, Bridwell KH, Rhee JM, et al. Correlation of pelvic incidence with low- and high-grade isthmic spondylolisthesis. *Spine*. 2002;27:2026-2029.
13. Descamps H, Commare-Nordmann MC, Marty C, et al. Modification of pelvic angle during the human growth [in French]. *Biom Hum Anthropol*. 1999;17:59-63.
14. Mangione P, Gomez D, Senegal J. Study of the course of the incidence angle during growth. *Eur Spine J*. 1997;6:163-167.
15. Jackson RP, Kazemura T, Kawakami N, et al. Lumbopelvic lordosis and pelvic balance on repeated standing lateral radiographs of adult volunteers and untreated patients with constant low back pain. *Spine*. 2000;25:575-586.
16. Lecoq C, Jacquemier M, Dutour O, et al. Sagittal equilibrium of the pelvis: a study of ischio-pubic ramus orientation. *Rev Chir Orthop*. 2000;86:390-395.
17. Mac-Thiong J-M, Labelle H, Charlebois M, et al. Sagittal plane analysis of the spine and pelvis in adolescent idiopathic scoliosis according to the coronal curve type. *Spine*. 2003;28:1404-1409.
18. Rajnics P, Templier A, Skalli W, et al. The association of sagittal spinal and pelvic parameters in asymptomatic persons and patients with isthmic spondylolisthesis. *J Spinal Disord*. 2002;15:24-30.
19. Curylo LJ, Edwards C, DeWald RW. Radiographic markers in spondylolisthesis: implications for spondylolisthesis progression. *Spine*. 2002;27:2021-2025.
20. Berthonnaud E, Roussouly P, Dimnet J. The parameters describing the shape and the equilibrium of the set back pelvis and femurs in sagittal view. *Innov Techn Biol Med*. 1998;19:411-426.
21. Berthonnaud E, Labelle H, Grimaud G, et al. Sagittal spino-pelvic radiological measurements of trunk balance: a variability study. *Eur Spine J*. 2001;10(suppl):33.
22. Abitbol MM. Evolution of the lumbosacral angle. *Am J Phys Anthropol*. 1987;72:361-372.
23. Abitbol MM. Effect of posture and locomotion on energy expenditure. *Am J Phys Anthropol*. 1988;77:191-199.
24. Bernhardt M, Bridwell KH. Segmental analysis of the sagittal plane alignment of the normal thoracic and lumbar spines and thoracolumbar junction. *Spine*. 1989;14:717-721.
25. Bridwell KH, Betz RR, Capelli AM, et al. Sagittal plane analysis in idiopathic scoliosis patients treated with Cotrel-Dubousset instrumentation. *Spine*. 1990;15:921-926.
26. De Jonge T, Dubousset JF, Illes T. Sagittal plane correction in idiopathic scoliosis. *Spine*. 2002;27:754-761.
27. Stagnara P, De Mauroy JC, Dran G, et al. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine*. 1982;7:335-342.
28. Vedantam R, Lenke LG, Keeney JA, et al. Comparison of standing sagittal spinal alignment in asymptomatic adolescents and adults. *Spine*. 1998;23:211-215.
29. Voutsinas SA, MacEwen GD. Sagittal profiles of the spine. *Clin Orthop*. 1986;210:235-242.
30. Gelb DE, Lenke LG, Bridwell KH, et al. An analysis of sagittal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. *Spine*. 1995;20:1351-1358.
31. Hammerberg EM, Wood KB. Sagittal profile of the elderly. *J Spinal Disord*. 2003;16:44-50.

## **Chapitre 5 – Évaluation des relations entre les segments anatomiques adjacents spino-pelviens**

L'article présenté dans ce chapitre propose un modèle postural pour les sujets normaux à partir de l'étude des corrélations entre les différents segments adjacents spino-pelviens. Cet article a été publié dans la revue European Spine Journal.

*Eur Spine J 2007;16:227-234*

**Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents**

Mac-Thiong J-M, Labelle H, Berthonnaud É, Betz RR, Roussouly P

Jean-Marc Mac-Thiong  
Hubert Labelle  
Eric Berthonnaud  
Randal R. Betz  
Pierre Roussouly

## Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents

Received: 25 February 2005  
Revised: 25 September 2005  
Accepted: 18 October 2005  
Published online: 26 November 2005  
© Springer-Verlag 2005

J.-M. Mac-Thiong · H. Labelle  
Division of Orthopaedics, Hopital Sainte-Justine, Montreal, QC, Canada

J.-M. Mac-Thiong (✉) · H. Labelle  
Research Center, Hopital Sainte-Justine,  
Montreal, QC, Canada  
E-mail: [redacted]  
Tel.: +1-514-3454931  
Fax: +1-514-3454755

E. Berthonnaud  
Groupe de Biomecanique, Lyon, France

R. R. Betz  
Department of Orthopaedics, Shriners  
Hospital of Philadelphia, Philadelphia, PA,  
USA

P. Roussouly  
Department of Orthopaedics, Centre Medico-Chirurgical des Massues, Lyon, France

**Abstract** The sagittal spinopelvic balance is poorly documented in normal pediatric subjects. The purpose of this study is to characterize the sagittal spinopelvic balance in the pediatric population and to evaluate the correlations between spinopelvic parameters. Seven parameters were evaluated from the lateral standing radiographs of 341 normal subjects aged 3–18 years old: thoracic kyphosis (TK), thoracic tilt (TT), lumbar lordosis (LL), lumbar tilt (LT), sacral slope (SS), pelvic tilt (PT) and pelvic incidence (PI). The mean values for the pelvic parameters were  $49.1 \pm 11.0$ ,  $7.7 \pm 8.0$  and  $41.4 \pm 8.2^\circ$  for PI, PT and SS, respectively. The mean values for the spinal parameters were  $48.0 \pm 11.7$ ,  $44.0 \pm 10.9$ ,  $-7.3 \pm 5.2^\circ$  and  $-3.1 \pm 5.2^\circ$  for LL, TK, LT and TT, respectively. The spinopelvic parameters were different from those reported in normal adults, but the correlations between the parameters

were similar. PI was significantly related to SS and PT. Significant correlations were found between the parameters of adjacent anatomical regions. Pelvic morphology (PI) regulates sagittal sacro-pelvic orientation (SS and PT). Sacral orientation (SS) is correlated with the shape (LL) and orientation (LT) of the lumbar spine. Adjacent anatomical regions of the spine and pelvis are interdependent, and their relationships result in a stable and compensated posture, presumably to minimize energy expenditure. Results from this study could be used as an aid for the planning of surgery in pediatric patients with spinal deformity in order to restore a relatively normal sagittal spinopelvic balance.

**Keywords** Kyphosis · Lordosis · Pelvic morphology · Pediatric orthopedics · Pelvis · Posture · Sagittal balance · Spine

### Introduction

The human standing posture involves a delicate balance between the spine and pelvis. A balanced posture is obtained when these body segments are aligned in order to minimize energy expenditure [2, 5, 7]. Some authors have reported the normal values of sagittal spinal curves in children and adolescents [11, 21, 25, 30–32]. Other studies have also characterized the pelvic orientation and morphology in the sagittal plane of pediatric subjects [5, 11, 21–24]. Recently, Mac-Thiong et al. [21]

documented the changes in sagittal spinal and pelvic parameters during growth in 180 normal subjects aged between 4 and 18 years. However, they did not report the correlation between these parameters, although it has been demonstrated that relationships between spinal and pelvic geometries strongly influence spinopelvic balance in adults. Berthonnaud et al. [2] have proposed the concept of a linear chain linking the head to the pelvis, in which shape and orientation of each anatomic segment are closely related and influence the adjacent segment to maintain a stable posture with minimum

energy expenditure. Accordingly, a change in the shape or orientation of any anatomic segment will modify the shape and/or orientation of adjacent segments of the spine and pelvis. Up to now, there is no study documenting the correlations between spinal and pelvic sagittal geometries in the normal pediatric population. Knowledge of the normal spinopelvic balance in normal children and adolescents could be particularly helpful in the evaluation and surgical planning of pediatric patients with spinal deformity.

The purpose of this work is to investigate the spinopelvic balance in normal children and adolescents. More specifically, the main objectives are to evaluate the relationships between sagittal spinal and pelvic parameters, and to compare these results with a previous study of normal adults [2].

### Materials and methods

A multicenter cohort of 341 normal children and adolescents from the clientele of eight spine surgeons were evaluated in this retrospective study. The first 180 subjects have already been reported in a previous study [21], while the last 161 subjects were recently added to the cohort. These subjects were referred for consultation by their family physician or pediatrician in order to rule out the presence of adolescent idiopathic scoliosis (AIS). All the subjects had standing posteroanterior (PA) and lateral (LAT) radiographs of the spine and pelvis done as part of their clinical evaluation to rule out AIS. All the radiographs were ordered by each spine surgeon and were not done specifically for this study. In all the participating institutions, a 30x90 cm LAT radiograph was obtained for each subject facing forward and standing in a comfortable position with the hips and knees fully extended. For all the subjects, the elbows were fully flexed and the fists were resting on the clavicles, as recommended by Faro et al. [8] and Horton et al. [12], in order to minimize the postural changes in the sagittal plane, while allowing adequate visualization of the spine.

The inclusion criteria for recruitment were: (1) availability of PA and LAT X-rays of the spine and pelvis, (2) no clinical or radiological evidence of spinal deformity, (3) age between 3 and 18 years, and (4) visibility of both femoral heads on the LAT radiographs. All subjects with a history or clinical signs of hip, pelvic or lower limb disorder were excluded from the study. Patients with radiological signs of Legg-Calve-Perthes disease or leg length discrepancy of more than 1 cm were excluded. There were 137 males and 204 females with a mean age of 12.1 years (standard deviation: 3.3). The mean age was similar between males and females.

The SagittalSpine software (Optimagé, Lyon, France) was used to assess the sagittal alignment of the spine and pelvis of all subjects. All computer measurements were done by the same experienced observer. The technique has been described in previous studies [1, 29] and can be summarized as follows. Pelvic incidence (PI), sacral slope (SS) and pelvic tilt (PT) (Fig. 1) were obtained after identifying eight anatomical landmarks: anterior and posterior corners of S1 vertebra, and any three points on the contour of each femoral head. The software also generates a geometric model of the spine in the sagittal plane (Fig. 2), which is composed of: (1) a thoracic segment, (2) a straight thoracolumbar junction and (3) a lumbar segment. The thoracic kyphosis (TK) and lumbar lordosis (LL) correspond to the angles contained by the two arcs of circle used to model the thoracic and lumbar segments, respectively. The intra- and inter-observer variability of these measurements is  $\pm 1^\circ$  with intraclass correlation coefficients between 0.93 and 0.99, as reported by Berthonnaud et al. [3]. In addition, segmental balance was assessed from the orientation of the thoracic and lumbar segments with respect to a vertical line using the technique described by Berthonnaud et al. [2] (Fig. 3). The thoracic tilt (TT) and the lumbar tilt (LT) are positive when the segment is tilted forward and negative when tilted backward. In total, there were one morphological parameter (PI) that was not influenced by subject positioning, two pelvic orientation parameters (SS and PT), two spinal shape parameters (LL and TK) and two spinal orientation parameters (LT and TT).

The data was analyzed using descriptive statistics and correlation studies with the Statistica software (StatSoft, Tulsa, OK, USA). Comparisons were made using two-tailed Student *t* and the relationships between parameters were assessed using Pearson's coefficients. The level of significance was set to 0.01 due to the high number of statistical tests performed.

### Results

Table 1 provides the measured parameters for all the subjects and separately for males and females. Females tend to have increased absolute values for all the measured parameters except SS. TT is significantly different between males and females, although the mean difference is only 1.5°. TT is tilted backward for 75.1% of subjects. The majority of subjects (93.5%) also stand with a negative LT.

Table 2 and 3 present the values obtained in the current study in comparison to those of Mac-Thiong et al. [21] and Berthonnaud et al. [2], respectively. Results from the current study are similar to those Mac-Thiong et al. [21] reported for normal children and adolescents. All the parameters, except the SS, are



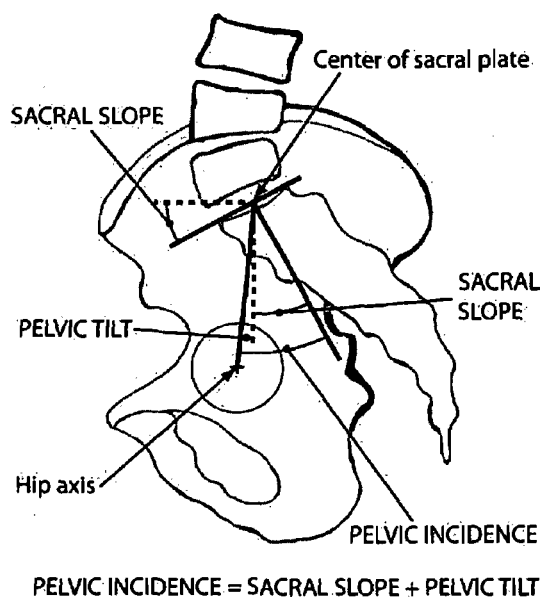


Fig. 1 Sagittal pelvic parameters measured on the standing lateral radiograph. The hip axis is located midway between the center of the femoral heads. Pelvic incidence is defined as the angle between the perpendicular of the upper sacral plate and the line joining the middle of the upper sacral plate and the hip axis. The sacral slope represents the angle between the sacral plate and the horizontal line. Pelvic tilt is measured from the angle between the vertical line and the line joining the middle of the upper sacral plate and the hip axis. It is positive when the hip axis lies in front of the middle of the upper sacral plate. Geometrically, pelvic incidence equals the sum of the sacral slope and the pelvic tilt

significantly different between the current pediatric cohort and the reference adult cohort of Berthonnaud et al. [2].

Results from the correlation analysis between spinopelvic parameters and age are shown in Table 4. Only weak correlations ( $r < 0.3$ ) are observed and statistically significant relationships with age are found only for PI and PT, when all subjects are considered. TK and LT are related to age in males, but not in females. Globally, higher correlation coefficients are observed for pelvic parameters in females and for spinal parameters in males.

Correlations between all spinopelvic parameters are provided in Table 5. Pelvic incidence, which is the only morphological parameter, is significantly related to pelvic (PT and SS) and lumbar (LL and LT) parameters. SS is strongly related to LL and moderately related to LT. PT is only weakly related to LL and is not correlated with LT. Pelvic morphological and orientation parameters are not related to thoracic parameters. No statistical correlation is found between PT and SS in this

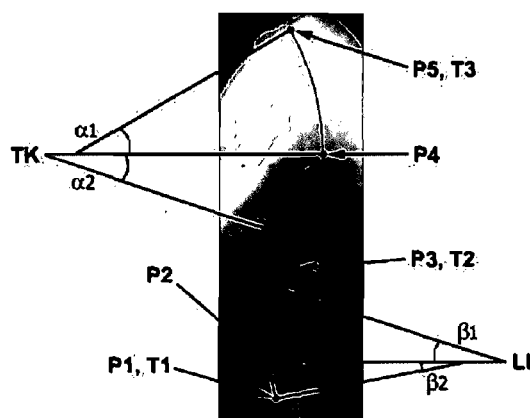


Fig. 2 Geometric model of the spine, generated by the software after identification of five anatomical landmarks (P1 to P5) and three tangent lines (T1 to T3). The thoracic and lumbar segments are intercalated by a straight thoracolumbar junction. The thoracic kyphosis (TK) and lumbar lordosis (LL) correspond to the angles contained by the arcs of circle used to model the thoracic ( $\alpha 1$  and  $\alpha 2$ ) and lumbar ( $\beta 1$  and  $\beta 2$ ) segments, respectively

study, although they are mathematically related (Fig. 1). Significant relationships are found between spinal shape parameters (LL vs TK) and between spinal orientation parameters (TT vs LT). Spinal shape and orientation parameters are weakly correlated only in the thoracic region (TK vs TT), while they are unrelated in the lumbar (LL vs LT) regions. Figure 4 provides an overview of the correlations observed between parameters of adjacent anatomical regions. Parameters are separated in three conceptual groups: morphology (PI), shape (LL and TK) and orientation (SS, PT, LT and TT). Figure 5 is a graph illustrating the relationship between PI and LL and the associated logistic regression equation.

## Discussion

It has been previously shown that pelvic morphology significantly influences the sagittal spinal geometry, especially LL [2, 10, 14, 19, 28, 29]. Some studies also suggest that there is an abnormal pelvic morphology and spinopelvic balance in patients with spondylolysis [4, 6, 11, 13, 15, 18; 24, 28] and AIS [20]. It is therefore important to understand thoroughly spinopelvic balance in normal individuals in order to evaluate the influence of pelvic morphology on the progression and treatment of spinal deformities. The cohort reported in the current study is the largest reported so far in the literature on pelvic morphology and spinopelvic balance in the pediatric population. In addition, this study is the first to suggest a postural

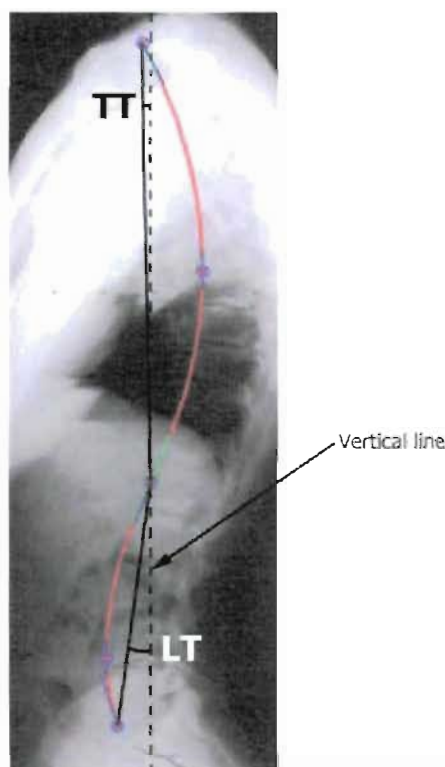


Fig. 3 Orientation of the thoracic (TT) and lumbar (LT) segments was measured with respect to a vertical line. The tilt is positive when the segment is tilted forward and negative when tilted backward

model in the normal pediatric population based on the relationships between spinal and pelvic geometries.

This study confirms the findings of our preliminary work [21], with similar values for all measured parameters (less than  $1^\circ$  in mean difference) (Table 2). In addition, we report the global orientation of the kyphotic and lordotic segments of the spine in the thoracic

and lumbar regions, respectively. TT and LT are negative for most patients, indicating a tendency for the backward tilt of both the thoracic and lumbar segments. This backward tilt of the spine may be required to counterbalance the upper body weight, which is mainly anterior to the spine, in order to maintain a stable posture.

As observed in our previous study [21], all statistically significant correlations between spinopelvic parameters and age are clinically weak ( $0.1 \leq r < 0.3$ ). However, in contrast to this study [21], only the age-related changes in PI and PT reach statistical significance, although the cohorts are similar in age (mean and standard deviation). Accordingly, PI and PT are significantly higher in normal adults (Table 3). The similar SS in pediatric and adult subjects is in agreement with the observed lack of relationship between SS and age. All spinal parameters are significantly different between children and adults, although they are not correlated with age (Table 4). It is possible that the relationship between spinal parameters and age during growth is not linear and, therefore, could not be quantified appropriately using Pearson's coefficient. Another possible explanation for this finding is that the changes in spinal geometry during growth may not be associated with chronological age, but instead with other factors such as weight, height or bone age. In addition, since the adult reference cohort used for comparison was composed of individuals aged between 25 and 70 years, degenerative changes in the spine may have also intervened in some patients, as suggested in previous studies [9, 16, 17].

The results from the correlation study between all spinopelvic parameters are similar to those already reported in adults [2], except for PT and LT. Differences observed between adult and pediatric subjects in the strength of correlation for some parameters could be partly explained by the presence of "immature" control mechanisms of the sagittal balance in growing individuals. We have modified the postural model proposed by Berthonnaud et al. [2] to represent better the interdependence between morphology, shape and orientation of the spine and pelvis (Fig. 4). In this modified scheme of correlations, we suggest that PI (a morphological

Table 1 Comparison of sagittal spinopelvic alignment (mean  $\pm$  standard deviation) between males and females

Parameter	All subjects (n=341)	Males (n=137)	Females (n=204)	P value
Mean age	12.1 $\pm$ 3.3 years (range: 3-18)	12.3 $\pm$ 3.2 years (range: 3-18)	12.0 $\pm$ 3.3 years (range: 3-18)	0.5
Pelvic incidence	49.1 $\pm$ 11.0° (range: 22.3-86.0)	49.2 $\pm$ 11.2° (range: 24.9-83.9)	49.7 $\pm$ 10.7° (range: 22.3-86.0)	0.2
Pelvic tilt	7.7 $\pm$ 8.0° (range: -17.2-30.0)	6.5 $\pm$ 7.5° (range: -10.2-30.0)	8.5 $\pm$ 8.3° (range: -17.2-29.7)	0.02
Sacral slope	41.4 $\pm$ 8.2° (range: 16.1-70.3)	41.7 $\pm$ 8.4° (range: 21.3-67.9)	41.2 $\pm$ 8.0° (range: 16.1-70.3)	0.6
Thoracic kyphosis	44.0 $\pm$ 10.9° (range: 5.4-76.4)	43.7 $\pm$ 12.3° (range: 5.4-76.4)	44.1 $\pm$ 9.9° (range: 15.2-70.8)	0.8
Lumbar lordosis	48.0 $\pm$ 11.7° (range: 15.1-101.4)	46.6 $\pm$ 10.8° (range: 15.1-74.1)	48.8 $\pm$ 12.2° (range: 21.2-101.4)	0.08
Thoracic tilt	-3.1 $\pm$ 5.2° (range: -17.7-20.9)	-2.2 $\pm$ 5.2° (range: -15.2-11.4)	-3.7 $\pm$ 5.1°* (range: -17.7-20.9)	0.009*
Lumbar tilt	-7.3 $\pm$ 5.2° (range: -22.1-18.7)	-6.7 $\pm$ 5.8° (range: -22.1-18.7)	-7.7 $\pm$ 4.8° (range: -20.8-7.6)	0.07

\*Statistically significant correlation ( $P < 0.05$ )

**Table 2** Comparison of sagittal spinopelvic alignment (mean  $\pm$  standard deviation) in the current study with historical data of normal children and adolescents

Parameter	Current study (n = 341)	Study of Mac-Thiong et al. <sup>a</sup> (n = 180)	P value
Mean age	12.1 $\pm$ 3.3 years	12.0 $\pm$ 3.1 years	0.59
Pelvic incidence	49.1 $\pm$ 11.0°	48.4 $\pm$ 11.2°	0.48
Pelvic tilt	7.7 $\pm$ 8.0°	7.2 $\pm$ 7.9°	0.52
Sacral slope	41.4 $\pm$ 8.2°	41.2 $\pm$ 8.5°	0.76
Thoracic kyphosis	44.0 $\pm$ 10.9°	43.0 $\pm$ 10.4°	0.35
Lumbar lordosis	48.0 $\pm$ 11.7°	48.5 $\pm$ 12.4°	0.60

<sup>a</sup>Data from Mac-Thiong et al. (2004) Spine 29:1642-1647

**Table 3** Comparison of sagittal spinopelvic alignment (mean  $\pm$  standard deviation) in the current study with historical data of normal adults

Parameter	Current study (n = 341)	Study of Berthonnaud et al. <sup>a</sup> (n = 160)	P value
Mean age	12.1 $\pm$ 3.3 years (range: 3-18)	25.7 $\pm$ 5.5 years (range: 20-70)	<10 <sup>-3</sup> *
Pelvic incidence	49.1 $\pm$ 11.0° (range: 22.3-86.0)	51.8 $\pm$ 5.3° (range: 33.7-83.7)	0.003*
Pelvic tilt	7.7 $\pm$ 8.0° (range: -17.2-30.0)	12.1 $\pm$ 3.2° (range: -5.1-30.5)	<10 <sup>-3</sup> *
Sacral slope	41.4 $\pm$ 8.2° (range: 16.1-70.3)	39.7 $\pm$ 4.1° (range: 21.2-65.9)	0.016
Thoracic kyphosis	44.0 $\pm$ 10.9° (range: 5.4-76.4)	47.5 $\pm$ 4.8° (range: 22.5-70.3)	<10 <sup>-3</sup> *
Lumbar lordosis	48.0 $\pm$ 11.7° (range: 15.1-101.4)	42.7 $\pm$ 5.4° (range: 16.0-71.9)	<10 <sup>-3</sup> *
Thoracic tilt	-3.1 $\pm$ 5.2° (range: -17.7-20.9)	0.7 $\pm$ 2.0° (range: -10.8-8.8)	<10 <sup>-3</sup> *
Lumbar tilt	-7.3 $\pm$ 5.2° (range: -22.1-18.7)	-5.9 $\pm$ 2.3° (range: -16.8-10.8)	<10 <sup>-3</sup> *

<sup>a</sup>Data from Berthonnaud et al. (2005) J Spinal Disord 18:40-47

\*Statistically significant correlation (P < 0.01)

**Table 4** Pearson's correlation coefficient (P value) between sagittal spinopelvic parameters and age

Correlation analysis	All subjects (n = 341)	Males (n = 137)	Females (n = 204)
Pelvic incidence versus age	0.21 (P < 10 <sup>-3</sup> )*	0.17 (P = 0.05)	0.24 (P < 10 <sup>-3</sup> )*
Pelvic tilt versus age	0.23 (P < 10 <sup>-4</sup> )*	0.19 (P = 0.03)	0.27 (P < 10 <sup>-3</sup> )*
Sacral slope versus age	0.05 (P = 0.3)	0.05 (P = 0.5)	0.05 (P = 0.5)
Thoracic kyphosis versus age	0.19 (P = 0.0102)	0.24 (P = 0.004)*	0.06 (P = 0.4)
Lumbar lordosis versus age	0.14 (P = 0.0106)	0.15 (P = 0.08)	0.14 (P = 0.05)
Thoracic tilt versus age	-0.08 (P = 0.1)	-0.21 (P = 0.013)	-0.01 (P = 0.9)
Lumbar tilt versus age	-0.10 (P = 0.06)	-0.29 (P < 10 <sup>-3</sup> )*	0.04 (P = 0.6)

\*Statistically significant correlation (P < 0.01)

**Table 5** Correlation analysis between sagittal spinopelvic parameters using Pearson's coefficient (P value)

Parameter	Pelvic tilt	Sacral slope	Thoracic kyphosis	Lumbar lordosis	Thoracic tilt	Lumbar tilt
Pelvic incidence	0.67 (P < 10 <sup>-15</sup> )*	0.68 (P < 10 <sup>-15</sup> )*	0.08 (P = 0.1)	0.58 (P < 10 <sup>-15</sup> )*	-0.05 (P = 0.3)	0.34 (P < 10 <sup>-9</sup> )*
Pelvic tilt		-0.08 (P = 0.1)	0.10 (P = 0.08)	0.14 (P = 0.0099)*	0.05 (P = 0.3)	0.09 (P = 0.08)
Sacral slope			0.01 (P = 0.8)	0.64 (P < 10 <sup>-15</sup> )*	-0.12 (P = 0.02)	0.36 (P < 10 <sup>-11</sup> )*
Thoracic kyphosis				0.35 (P < 10 <sup>-10</sup> )*	0.15 (P = 0.005)*	-0.39 (P < 10 <sup>-15</sup> )*
Lumbar lordosis					-0.35 (P < 10 <sup>-10</sup> )*	0.05 (P = 0.4)
Thoracic tilt						0.48 (P < 10 <sup>-20</sup> )*

\*Statistically significant correlation (P < 0.01)

parameter) is of prime importance in determining the orientation of the pelvis (PT and SS). As indicated by the strong correlation coefficients, the morphology of the pelvis (PI) regulates both the orientation of the sacrum (SS) and of the pelvis (PT). Sacrum orientation (SS) is correlated with the shape (LL) and orientation (LT) of the lumbar spine. There was no statistical

relationship between both the pelvic orientation parameters (SS vs PT), although they are mathematically related because for each individual PI is the sum of SS and PT (Fig. 1). Since each individual has a constant pelvic morphology (PI), the correlation between SS and PT is theoretically perfect (r = -1.0). The current investigation is a cross-sectional study, so there is a wide

Fig. 4 Overview of statistical significant correlations between parameters of adjacent anatomical regions. Moderate: ( $0.3 \leq r < 0.5$ ) and strong ( $r \geq 0.5$ ) correlations are shown in dotted and full arrows, respectively. The mathematical relationship between pelvic tilt and sacral slope is also shown. The relationship between pelvic incidence and lumbar lordosis and between pelvic incidence and lumbar tilt, as well as weak correlations ( $0.1 \leq r < 0.3$ ), are not included in the figure.

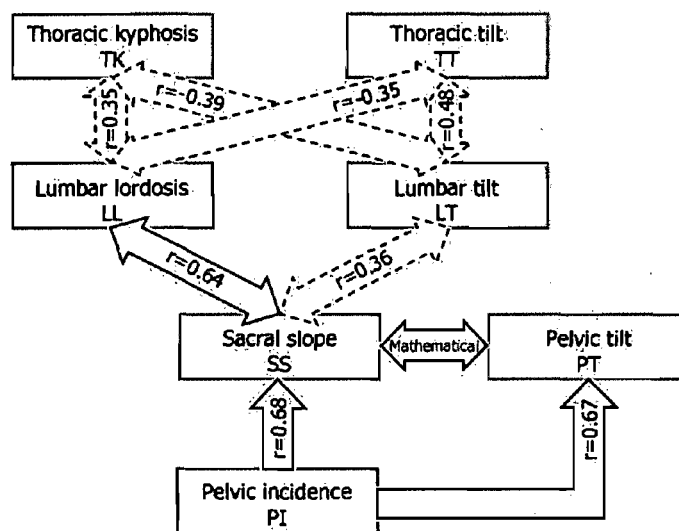
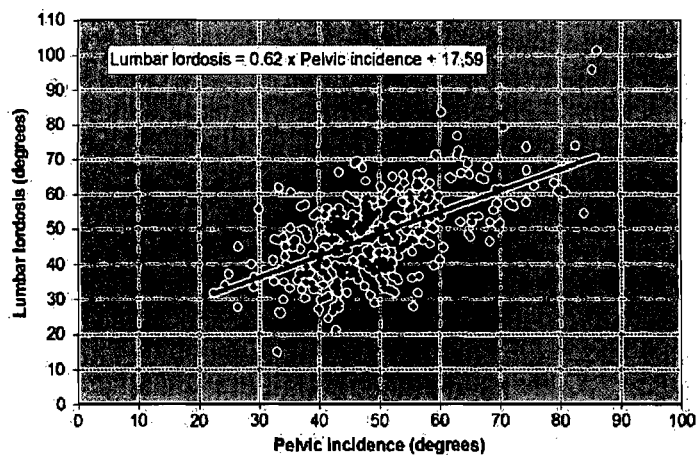


Fig. 5 Logistic regression illustrating the relationship between lumbar lordosis and pelvic incidence.



variation in PI when all the subjects are considered for statistical analysis. Consequently, we could not find a statistical relationship between SS and PT. When limiting the statistical analysis to subgroups of subjects with similar PI (results not shown), the correlation coefficient ( $r$ ) reached statistical significance and was closer to the expected relationship ( $r = -1$ ).

As previously described by Berthonnaud et al. [2], the correlation scheme (Fig. 4) also supports the concept by which parameters of adjacent anatomical regions are interdependent, and their relationships result in a stable and compensated posture, presumably to minimize

energy expenditure. This concept does not imply a causal relationship, but suggests that a modification in the shape or orientation parameter in a given anatomical region will affect the adjacent anatomical regions. Correlations between the pelvic and lumbar regions were particularly strong, as opposed to the moderate correlations between the lumbar and thoracic regions. This last finding suggests that the thoracic parameters could also be significantly influenced by the cervical region, so as to provide adequate balance of the head over the pelvis. The failure to assess the cervical sagittal balance is a recognized limitation of this study and was due to

the inadequate visualization of the cervical spine on the radiographs for most of the subjects.

Shape and orientation parameters of the thoracic and lumbar regions are not necessarily correlated, although a weak relationship ( $r=0.15$ ) was found in the thoracic region between TK and TT (see Table 5, Fig. 4). This implies that subjects with highly variable TK or LL tend to stand with similar TT and LT. In addition, PT was not related to the shape and orientation of the spine, except for a weak correlation with the LL ( $r=0.14$ ). These findings, added to the fact that the tilt parameters (TT, LT and PT) present the smallest range and standard deviation, as also observed in adults [2], suggest that the appropriate tilt of the pelvic, lumbar and thoracic regions may be the most important determinants to achieve a balanced posture. In particular, maintaining PT and LT within a strict range would be particularly important, since the pelvic and lumbar regions carry a great percentage of body weight and abnormal orientation of these spinal segments could result in undue energy expenditure to maintain a balanced posture.

Results from this study could be used as an aid in the planning of the surgical treatment of pediatric patients with spinal deformity, in order to provide an estimation of the sagittal spinal curves that need to be restored by the instrumentation. For example, the PI could be used to estimate the LL that needs to be set intraoperatively, because PI is a true morphological parameter (not affected by the positioning of pelvis or by surgery limited to the spine) and is significantly related to the LL. As shown in Fig. 5, the regression line between PI and LL can be used as a guide to estimate the amount of total LL that should be expected by the surgeon with respect to a specific PI value. Alternatively, the logistic regression equation provided can also be used. However, it has to be remembered that other parameters such as the

remaining growth, the spinal flexibility and the vertebral anatomy should also be considered when estimating the optimal sagittal curves to be restored.

## Conclusion

When evaluating and treating patients with spinal disorders, significant knowledge of the normal spinopelvic balance is of primary importance. This study documents the spinopelvic balance in normal children and adolescents, and describes a scheme of correlations between morphological, shape and orientation parameters of the spine and pelvis. It is found that the PI regulates the SS and PT. In addition, shape and orientation parameters of adjacent anatomical regions are interdependent, and their relationships result in a stable and compensated posture, presumably to minimize energy expenditure. Results from this study could be used as an aid in the planning of the surgical treatment of pediatric patients with spinal deformity, in order to provide an estimation of the sagittal spinal curves that need to be restored by the instrumentation.

**Acknowledgments** The authors sincerely thank the following members of the Spinal Deformity Study Group for contributing cases to this study: John R. Dinar II (Kenton D. Leatherman Spine Center, Louisville, KY, USA), Peter O. Newton (Children's Hospital and Health Center, San Diego, CA, USA), Charles E. Johnston II (Texas Scottish Rite Hospital for Children, Dallas, TX, USA), Keith H. Bridwell (Barnes Jewish Hospital, St. Louis, MO, USA), Ensor E. Transfeldt (Twin Cities Spine Center, Minneapolis, MN, USA), and Michael F. O'Brien (Woodbridge Orthopaedic and Spine Center, Denver, CO, USA). This research was assisted by support from the Spinal Deformity Group. This research was funded by an educational/research grant from Medtronic Sofamor Danek, by the Canadian Institute of Health Research and by the Fonds de Recherche en Santé du Québec.

## References

- Berthonnaud É, Roussouly P, Dimnet J (1998) The parameters describing the shape and the equilibrium of the set back pelvis and femurs in sagittal view. *Innov Techn Biol Med* 19:411-426.
- Berthonnaud É, Dimnet J, Roussouly P, Labelle H (2005) Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord* 18:40-47.
- Berthonnaud É, Labelle H, Roussouly P, Grimard G, Vaz G, Dimnet J (2005) A variability study of computerized sagittal spinopelvic radiological measurements of trunk balance. *J Spinal Disord* 18:66-71.
- Curylo LJ, Edwards C, DeWald RW (2002) Radiographic markers in spondyloptosis. Implications for spondylolisthesis progression. *Spine* 27:2021-2025.
- Descamps H, Commare-Nordmann MC, Marty C, Hecquet J, Duval-Beaupère G (1999) Modification of pelvic angle during the human growth (in French). *Biom Hum Anthropol* 17:59-63.
- During J, Goudfrooij H, Keessen W, Beekr TW, Crowe A (1985) Toward standards for posture. Postural characteristics of the lower back system in normal and pathologic conditions. *Spine* 10:83-87.
- Duval-Beaupère G, Schimdt C, Cosson P (1992) A barycentric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng* 20:451-462.
- Faro FD, Marks MC, Pawelek J, Newton PO (2004) Evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 29:2284-2289.
- Gelb DE, Lenke LG, Bridwell KH, Blanke K, McEnery KW (1995) An analysis of sagittal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. *Spine* 20:1351-1358.

10. Guigui P, Levassor N, Rillardon L, Wodecki P, Cardinne L (2003) Physiological value of pelvic and spinal parameters of sagittal balance: analysis of 250 healthy volunteers (in French). *Rev Chir Orthop Réparatrice Appar Mot* 89:496-506
11. Hanson DS, Bridwell KH, Rhee JM, Lenke LG (2002) Correlation of pelvic incidence with low- and high-grade isthmic spondylolisthesis. *Spine* 27:2026-2029
12. Horton WC, Brown CW, Bridwell KH, Glassman SD, Suk S-I, Cha CW (2005) Is there an optimal patient stance for obtaining a lateral 36° radiograph? A critical comparison of three techniques. *Spine* 30:427-433
13. Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K (2002) Radiographic classification of L5 isthmic spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. *Spine* 27:831-838
14. Jackson RP, Hales C (2000) Congruent spinopelvic alignment on standing lateral radiographs of adult volunteers. *Spine* 25:2808-2815
15. Jackson RP, Phipps T, Hales C, Surber J (2003) Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine* 28:151-160
16. Kobayashi T, Atsuta Y, Matsuno T, Takeda N (2004) A longitudinal study of congruent sagittal spinal alignment in an adult cohort. *Spine* 29:671-676
17. Korovessis PG, Stamatakis MV, Baikousis AG (1998) Reciprocal angulation of vertebral bodies in the sagittal plane in an asymptomatic Greek population. *Spine* 23:700-704
18. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, Transfeldt E, O'Brien M, Chopin D, Hresko T, Dimnet J (2004) Spondylolisthesis, pelvic incidence, and spinopelvic balance. A correlation study. *Spine* 29:2049-2054
19. Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, Marty C (1998) Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J* 7:99-103
20. Mac-Thiong J-M, Labelle H, Charlebois M, Huot M-P, de Guise JA (2003) Sagittal plane analysis of the spine and pelvis in adolescent idiopathic scoliosis according to the coronal curve type. *Spine* 28:1404-1409
21. Mac-Thiong J-M, Berthonnaud É, Dimnet J, Betz RR, Labelle H (2004) Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine* 29:1642-1647
22. Mangione P, Sènegas J (1997) Normal and pathologic sagittal balance of the spine and pelvis (in French). *Rev Chir Orthop Réparatrice Appar Mot* 83:22-32
23. Mangione P, Gomez D, Senegas J (1997) Study of the course of the incidence angle during growth. *Eur Spine J* 6:163-167
24. Marty C, Boisauvert B, Descamps H, Montigny JP, Hecquet J, Legaye J, Duval-Beaupère G (2002) The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J* 11:119-125
25. Öhlen G, Aarö S, Bylund P (1988) The sagittal configuration and mobility of the spine in idiopathic scoliosis. *Spine* 13:413-416
26. Poussa M, Härkönen H, Mellin G (1989) Spinal mobility in adolescent girls with idiopathic scoliosis and in structurally normal controls. *Spine* 14:217-219
27. Propst-Procator SL, Bleck EE (1983) Radiographic determination of lordosis and kyphosis in normal and scoliotic children. *J Pediatr Orthop* 3:344-346
28. Rajnic P, Templier A, Skalli W, Lavaste F, Illés T (2002) The association of sagittal spinal and pelvic parameters in asymptomatic persons and patients with isthmic spondylolisthesis. *J Spinal Disord* 15:24-30
29. Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud É, Dimnet J (2002) Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J* 11:80-87
30. Vedantam R, Lenke LG, Keeney JA, Bridwell KH (1998) Comparison of standing sagittal spinal alignment in asymptomatic adolescents and adults. *Spine* 23:211-215
31. Voussinas SA, MacEwen GD (1986) Sagittal profiles of the spine. *Clin Orthop* 210:235-242
32. Wright JG, Bell D (1991) Lumbosacral joint angles in children. *J Pediatr Orthop* 11:748-751

## **Chapitre 6 – Élaboration d'un modèle postural de l'équilibre spino-pelvien pour le spondylolisthésis**

Ce chapitre comprend un article en révision dans la revue Spine. Cet article compare les différents mécanismes posturaux impliqués chez les sujets normaux et chez ceux atteints de spondylolisthésis lombosacré développemental. Les tableaux et images se trouvent à la fin du chapitre.

Soumis à Spine le 12 août 2007 et présentement en révision

### **Postural model of sagittal spino-pelvic balance and its relevance for lumbosacral developmental spondylolisthesis**

Mac-Thiong J-M, Wang Z, de Guise JA, Labelle H

## **Postural model of sagittal spino-pelvic balance and its relevance for lumbosacral developemental spondylolisthesis**

Jean-Marc Mac-Thiong, MD;<sup>1,2,3</sup> Zhi Wang, MD;<sup>1,2,3</sup> Jacques A de Guise, PhD;<sup>4,5</sup> Hubert Labelle, MD;<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Department of Surgery, University of Montreal, Montreal, Canada

<sup>2</sup> Division of Orthopedic Surgery, CHU Sainte-Justine, Montreal, Canada

<sup>3</sup> Motion Sciences Research Chair, Research Center, CHU Sainte-Justine, Montreal, Canada

<sup>4</sup> Department of Automated Production Engineering, École de Technologie Supérieure, Montreal, Canada

<sup>5</sup> Laboratoire information en orthopédie, CHUM Notre-Dame, Montreal, Canada

This research was assisted by support from the Spinal Deformity Study Group.

This research was funded by an educational/research grant from Medtronic Sofamor Danek.

### Address correspondence and reprint requests to:

Hubert Labelle, MD

Division of Orthopedic Surgery

CHU Sainte-Justine

3175 Côte-Sainte-Catherine

Montréal, Québec

Canada H3T 1C5

Tel.: 514-345-4876

Fax: 514-345-4755

Email: 



## **Abstract**

**Study design:** Comparative study of sagittal spino-pelvic balance in children and adolescents with developmental lumbosacral spondylolisthesis compared to asymptomatic subjects.

**Objectives:** To develop a global postural model of sagittal spino-pelvic balance.

**Background Data:** The mechanisms underlying sagittal balance in developmental spondylolisthesis are still unclear.

**Methods:** Radiographs of 120 control subjects and 131 subjects with developmental spondylolisthesis (91 low-grade, 40 high-grade) were reviewed. Subjects with high-grade spondylolisthesis were divided according to their sacro-pelvic balance: balanced vs. retroverted sacro-pelvis. Parameters of the sacro-pelvis (pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope), lumbosacral region (lumbosacral angle, slip percentage), lumbar spine (lumbar lordosis, lumbar tilt), thoracic spine (thoracic kyphosis, thoracic tilt), and global balance (spinal tilt, sagittal offset between C7 and femoral heads) were assessed. Parameters were compared between all groups and a correlation study was performed between all parameters. A postural model that includes the measured parameters was used to analyze the obtained correlations.

**Results:** Significant differences in all parameters are found between all groups, except for sagittal offset. The pattern and strength of correlations is similar between normal and low-grade subjects, showing interdependence between sacro-pelvic, lumbosacral, lumbar and thoracic regions. The pattern of relationships was altered in high-grade spondylolisthesis, especially for subjects with a retroverted sacro-pelvis for which correlations between pelvic incidence and pelvic tilt, and between the sacro-pelvic unit and lumbar spine geometry are lost.

**Conclusion:** Children and adolescents stand with a relatively constant global sagittal spino-pelvic balance, regardless of the local lumbosacral deformity. The normal postural mechanisms are maintained in low-grade spondylolisthesis and in high-grade spondylolisthesis with a balanced sacro-pelvis. Postural mechanisms are distorted in high-grade spondylolisthesis associated with a retroverted sacro-pelvis, suggesting that surgical reduction of the local lumbosacral deformity in these patients could be attempted to restore normal postural mechanisms.

*Key Words:* pelvis, posture, lumbosacral spine, sacrum, sagittal balance, spondylolisthesis.

## Key Points

- Children and adolescents stand with a relatively constant global sagittal spino-pelvic balance, regardless of the local lumbosacral deformity
- The normal postural mechanisms are maintained in low-grade spondylolisthesis
- The postural mechanisms are altered in high-grade spondylolisthesis
- Surgical reduction of spondylolisthesis in patients with a retroverted pelvis could be attempted to restore a normal posture.

## Précis

This study presents a postural model of sagittal spino-pelvic balance. Children and adolescents stand with a relatively constant global spino-pelvic balance, regardless of the local lumbosacral deformity. The normal postural mechanisms are maintained in low-grade spondylolisthesis while they are lost in high-grade spondylolisthesis, especially when a retroverted sacro-pelvis is present.

## Introduction

There is increasing interest in the literature concerning the study of sagittal spino-pelvic balance because it is recognized as an important element to consider in the treatment of spinal disorders such as spondylolisthesis. Studies of sagittal balance in normal adults<sup>1,2,21</sup> have demonstrated that adjacent anatomical regions of the spine and pelvis are interdependent, and that their relationships result in a stable posture, presumably to minimize energy expenditure. One report<sup>15</sup> has also documented similar results for asymptomatic children. Other studies<sup>11,12,17</sup> have described significant correlations between parameters of the sacro-pelvic unit and lumbar spine in spondylolisthesis. In addition to the concept of interdependence between adjacent regions of the spine and pelvis, some authors have compared the global spino-pelvic balance between normal and spondylolisthetic adults, and have attempted to link it to different parameters of the spine and pelvis. Jackson et al.<sup>11</sup> and Rajnics et al.<sup>17</sup> have not found any difference in global spino-pelvic balance between spondylolisthetic and normal adults despite significant differences observed for lumbar and sacro-pelvic parameters. Surprisingly, they were not able to demonstrate a clear relationship between global spino-pelvic balance and any of the spinal or sacro-pelvic parameters, possibly because the global spino-pelvic balance is in fact influenced by the interdependence between all parameters and not by a single parameter.

Recently, Vialle et al.<sup>22</sup> have compared 244 children and adolescents with developmental spondylolisthesis to 300 normal adults. They have observed significant differences in global spino-pelvic balance, as measured by the angle between the T1 plumbline and a line joining the center of T1 to the hip axis (center of the line joining the center of both femoral heads). However,

this difference was less than  $2.5^{\circ}$  on average. Interestingly, the standard deviation was almost twice as large in the spondylolisthesis group when compared to the control group. Nonetheless, the authors believe that the normal and spondylolisthesis groups use the same “sagittal balance strategy” because the correlations between measured parameters were similar. They also suggest that the “local sagittal imbalance” at the lumbosacral junction in spondylolisthesis is compensated by the mobile segments of the spine and pelvis. However, there are some limitations to their study. First, the control group is not comparable in terms of age (14 vs. 35 years in average), while it has been shown that significant changes in spinal and sacro-pelvic parameters occur during growth.<sup>3,5,14,16,23</sup> Second, they argue that normal and spondylolisthetic subjects use the same “sagittal balance strategy”, although the global spino-pelvic balance is different between the two groups. Last, they did not analyze their data according to the recent findings of Hresko et al.<sup>10</sup> for high-grade spondylolisthesis, who have reported that there are two distinct subgroups of patients with high-grade spondylolisthesis which exhibit different patterns of sagittal balance (Figure 1). In the retroverted sacro-pelvis subgroup (or low sacral slope/high pelvic tilt subgroup), patients stand upright with significant retroversion of the pelvis and a vertical sacrum, and have a higher risk of sagittal spinal imbalance. In the balanced pelvis subgroup (or high sacral slope/low pelvic tilt subgroup), the pelvis is balanced and the risk of global imbalance is low. Unfortunately, the global sagittal balance was not assessed and they did not have a control group to compare with.

The main purpose of this work is to investigate and compare the postural mechanisms used by normal and spondylolisthetic patients, in order to propose a global postural model of sagittal spino-pelvic balance which takes into account the recent evidence published in the literature. To

achieve this task, sagittal parameters of adjacent thoraco-lumbo-sacro-pelvic regions and the global spino-pelvic balance, as well as their relationships were compared between normal and spondylolisthetic children and adolescents. In addition, specific analysis of the subgroups defined by Hresko et al.<sup>10</sup> were performed to determine if the postural mechanisms are different between the two described subgroups.

## Materials and Methods

The medical and digital radiological files of all patients with lumbosacral developmental spondylolisthesis seen for the first time at the spine clinic of a single pediatric hospital during a 7-year consecutive period were reviewed. Patients were defined as potential subjects for inclusion in the study if they were aged between 5 and 20 years, and if they had long-cassette 30cm x 90cm PA (postero-anterior) and LAT (lateral) radiographs of the spine and pelvis with both femoral heads visible on the LAT view. Patients were excluded if they had lower limb, pelvic or hip pathology, or if they had spine surgery antedating the first available radiographs. There were 40 patients with high-grade spondylolisthesis (high-grade group) and 91 patients with low-grade spondylolisthesis (low-grade group) included in the study. The mean percentage of slip was  $14.7 \pm 9.1\%$  (range: 0-37%) for subjects with low-grade spondylolisthesis and  $78.8 \pm 20.2\%$  (range: 51-100%) for subjects with high-grade slips. The mean age was  $13.5 \pm 3.1$  years (range: 5.0-19.5 years) for low-grade spondylolisthesis and  $14.8 \pm 2.7$  years (range: 7.4-20.0 years) for high-grade spondylolisthesis. There were 32 males and 59 females, and 11 males and 29 females in the low- and high-grade spondylolisthesis groups, respectively.

In addition, 120 controls were randomly selected from a database of asymptomatic subjects who were referred to the spine clinic for screening of scoliosis, but for whom clinical and radiological examinations did not reveal any evidence of spinal pathology (normal group). Other inclusion criteria were: 1) availability of PA and LAT radiographs of the spine and pelvis, 2) age between 4 and 20 years, 3) visibility of both femoral heads on the LAT radiograph. All subjects with a history or clinical signs of hip, pelvic or lower limb disorder, including greater than 2 cm leg

length discrepancy, were excluded. The mean age was  $12.1 \pm 2.6$  years (range: 6.8-19.3 years) in the control group, and there were 40 males and 80 females.

All radiographs were taken with subjects standing in a comfortable position with the hips and knees fully extended. The elbows were fully flexed and the fists were resting on the clavicles, as recommended by Faro et al.<sup>7</sup> and Horton et al.,<sup>9</sup> in order to minimize the postural changes in the sagittal plane, while allowing adequate visualization of the spine. Using a custom software, a single observer identified 13 anatomical landmarks of the spine and pelvis on each LAT radiograph for all subjects (Figure 2). The hip axis (center of the line joining the center of both femoral heads) is computed by the computer after identification of both femoral heads. Based on these landmarks, the software automatically computes multiple parameters of the spine and spino-pelvis, as well as the global spino-pelvic balance (Table I).

Subjects with high-grade spondylolisthesis were further subdivided based on their sacro-pelvic balance, as determined from the formula provided by Hresko et al. (Figure 3).<sup>10</sup> In the current study, the high sacral slope/low pelvic tilt type are referred to as the balanced sacro-pelvis subgroup, while the low sacral slope/high pelvic tilt type are referred to as the retroverted sacro-pelvis subgroup.

The data was analyzed using the SPSS 14.0 software (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). In addition to descriptive statistics, comparisons between the three groups (normal, low-grade and high-grade) were performed using analysis of variance (ANOVA), followed by the Games-Howell test for post-hoc pairwise comparisons when ANOVA was significant. Post-hoc Games-Howell test



was selected because it was assumed that the variance differs between normal, low-grade and high-grade populations. Within each group, relationships between parameters were assessed using Pearson's coefficients. Comparison from the Mann-Whitney U test and a correlation analysis was also done specifically for the two subgroups of subjects with high-grade spondylolisthesis. The level of significance was set to 0.01 due to the high number of statistical tests performed. In accordance with the suggestions from Cohen,<sup>4</sup> statistically significant correlation coefficients were considered clinically significant only if equal or greater than 0.3.

From the clinical and statistical significant results of the correlation study, a postural model was developed for each group and subgroup. This model was derived from the postural model already previously proposed by Mac-Thiong et al.<sup>15</sup> to describe the sagittal balance in normal children and by Berthonnaud et al.<sup>1</sup> in normal adults. Because the current study investigates the sagittal balance in lumbosacral spondylolisthesis, the original model proposed by Mac-Thiong et al.<sup>15</sup> was adapted to account for the local lumbosacral deformity found in spondylolisthesis. Instead of linking the lumbar spine geometry (measured from the LL and the LT) directly to the sacro-pelvis orientation (measured from the SS), parameters describing the intercalary lumbosacral junction (L5\_inf, LSA and slip percentage) were added in order to model the transition between the lumbar spine and the sacro-pelvis. L5\_inf was selected because it was assumed that its role in spondylolisthesis is similar to the role of SS in regulating the lumbar spine geometry above it in normal individuals.

## Results

Mean and standard deviation for all parameters are presented in Table II. Also included in Table II are the results from ANOVA, which revealed a significant difference between the three groups for all parameters, except sagittal offset. The post-hoc Games-Howell test (Table III) performed for all parameters except sagittal offset gave significant differences between all groups for all parameters, except for TK (normal  $\approx$  low-grade), TT (normal  $\approx$  low-grade, normal  $\approx$  high-grade), LSA (normal  $\approx$  low-grade), and sacral slope (normal  $\approx$  high-grade, low-grade  $\approx$  high-grade).

The sagittal offset varied by less than  $1^\circ$  on average between the normal, low-grade and high-grade groups. It was negative (backward tilt) for most subjects in all groups: 90 normal (75%), 70 low-grade (77%), and 30 high-grade (75%) subjects. The range for the sagittal offset was similar for all three groups at  $-10.7^\circ$  to  $5.6^\circ$ ,  $-10.8^\circ$  to  $7.2^\circ$ , and  $-10.5^\circ$  to  $10.4^\circ$  for the normal, low-grade, and high-grade groups, respectively. On the opposite, the spinal tilt varied by more than  $7^\circ$  on average between the normal and high-grade groups. When compared to the proportion of subjects with a backward sagittal offset, the proportion of subjects with backward spinal tilt gradually decreased in the low- and high-grade groups: 94 normal (78%), 54 low-grade (59%), and 8 high-grade (20%) subjects. The range of values of spinal tilt was similar for normal ( $80.6^\circ$ - $105.0^\circ$ ) and low-grade subjects ( $78.9^\circ$ - $102.2^\circ$ ), but it was shifted to forward tilting values in high-grade subjects ( $67.9^\circ$ - $97.5^\circ$ ). The sagittal offset was strongly linked to the spinal tilt in all three groups, as demonstrated by the statistically significant correlation coefficients found in the normal ( $r=-0.79$ ), low-grade ( $r=-0.84$ ) and high-grade ( $r=-0.90$ ) groups.

When specifically comparing the two subgroups of subjects with high-grade spondylolisthesis (Table IV), significant differences were found only for LT, %SLIP, LSA, SS, PT, and spinal tilt. Of particular interest, the sagittal offset were similar between the balanced and retroverted sacro-pelvis subgroups despite a different spinal tilt. While the sagittal offset varied by only 1° on average, the spinal tilt significantly varied by more than 5°, thus indicating a significant increased forward tilting of the spine in the retroverted sacro-pelvis group. In the retroverted sacro-pelvis subgroup, only 3 of 25 subjects (12%) stood with backward spinal tilt, while in the balanced sacro-pelvis group, 5 of 15 subjects (33%) stood with backward spinal tilt. The maximal forward spinal tilt was worse in the retroverted sacro-pelvis group (68°), as compared to the balanced pelvis group (82°). On the contrary, most of the subjects remained with a negative sagittal offset in both retroverted (72% of subjects) and balanced sacro-pelvis (80% of subjects) groups, with a similar proportion as for the normal and low-grade groups. The sagittal offset was strongly correlated with the spinal tilt in both balanced ( $r=-0.88$ ) and retroverted ( $r=-0.94$ ) sacro-pelvis subgroups.

Statistically ( $p<0.01$ ) and clinically ( $r\geq 0.3$ ) significant correlation coefficients were used to implement the proposed postural model. This postural model describes all anatomical regions of the thoraco-lumbo-sacro-pelvic unit based on the significant correlation coefficients found between adjacent anatomical regions characterized by the parameters defined in Table I. Built on the same template, Figures 2 to 4 adapt the postural model for normal, low-grade and high-grade subjects. The postural model was also applied to the balanced and retroverted sacro-pelvis subgroups of high-grade spondylolisthesis in Figure 5. The pattern and strength of correlations is similar between normal (Figure 2) and low-grade subjects (Figure 3) regarding the

interdependence between the sacro-pelvic, lumbosacral and lumbar regions. The postural model is however altered in high-grade spondylolisthesis (Figure 4). The significant relationships that were found in the normal and low-grade groups between the sacro-pelvic orientation (SS) and the lumbar spine (L5\_inf), as well as between the lumbosacral region (LSA) and the lumbar spine (L5\_inf) are now lost. The correlation between PI and PT has also disappeared. The strength of correlation between L5\_inf and the rest of the lumbar spine is also decreased. On the opposite, correlations between the thoracic and lumbar spine parameters remained within the same range.

When comparing the two subgroups of subjects with high-grade spondylolisthesis (Figure 5), some obvious discrepancies are observed. The link between PI and PT is lost in the retroverted sacro-pelvis subgroup, while it is strong in the balanced sacro-pelvis group. In the balanced sacro-pelvis subgroup, the correlations between SS and L5\_inf and between LSA and L5\_inf were clinically strong and almost reached statistical significance, while there was no such tendency in the retroverted sacro-pelvis subgroup. In addition, the retroverted sacro-pelvis subgroup lacked the significant relationships between L5\_inf and the upper lumbar spine. Globally, it was found that the pattern of correlations in the balanced sacro-pelvis subgroup was similar to that of normal and low-grade subjects, while it was completely distorted in the retroverted sacro-pelvis subgroup.

## **Discussion**

In order to better understand the mechanisms underlying the static sagittal postural control in spondylolisthesis, this study compared the sagittal spino-pelvic balance between subjects with developmental spondylolisthesis and controls. Also, the specific influence of the sacro-pelvic balance in the maintenance of sagittal balance was assessed for high-grade spondylolisthesis. Two strategies were used to achieve our goals. Firstly, direct comparisons between the normal, low-grade and high-grade groups allowed not only the observation of significant differences in thoraco-lumbo-sacro-pelvic geometry, but most of all the results provided a better understanding of global sagittal balance. Secondly, the use of a basic postural model assuming interdependence between adjacent anatomical regions of the thoraco-lumbo-sacro-pelvic unit allowed a better comprehension of the postural mechanisms involved in the maintenance of an adequate global sagittal balance. Accordingly, the first part of the discussion raises general concepts on global sagittal balance, while the remaining part of the discussion focuses on the specific postural mechanisms used to achieve adequate global sagittal balance.

### **Global sagittal balance in spondylolisthesis**

Some authors<sup>6,19</sup> prefer the assessment of the center of gravity rather than using radiological parameters to describe and understand the basic principles of sagittal balance. One of the principal advantages of using the center of gravity projection is that its location remains relatively constant for all subjects, even those with spinal deformities,<sup>8</sup> suggesting that it can be used to define normal global sagittal balance. However in the current study, the sagittal offset was also

relatively constant with a low variability, which supports its relevance in the assessment of global sagittal balance.

The forward slippage of L5 and the lumbosacral kyphosis associated with developmental spondylolisthesis tend to displace the center of gravity of the body forward. Accordingly, the spinal tilt tends to shift forward with advancing spondylolisthesis. The most striking result in this study is the observation of a similar sagittal offset for all groups, including both subgroups with high-grade spondylolisthesis, despite a variable spinal tilt and significant differences in the other segmental parameters. In addition, the proportion of subjects with forward and backward sagittal offset was similar between all groups and subgroups, as opposed to the proportion of subjects with forward and backward spinal tilt. The sagittal offset was however strongly related to the spinal tilt.

The results from the comparison study suggest two conclusions. First, adjacent anatomical regions (thoracic, lumbar, lumbosacral and sacro-pelvis) balanced themselves in order to achieve adequate global sagittal spino-pelvic balance (as measured by the sagittal offset). Second, the sacro-pelvis directly reacts to the alteration in global spinal balance (as measured by the spinal tilt) produced by the lumbosacral deformity in spondylolisthesis, in order to maintain an adequate and relatively constant global sagittal spino-pelvic balance (as measured by the sagittal offset). These results are in accordance with those of Rajnics et al.<sup>17</sup> and of Jackson et al.<sup>11</sup> who did not find any significant difference in global sagittal balance between normal adults and adults with spondylolisthesis. On the contrary, Vialle et al.<sup>22</sup> reported a statistically significant difference in sagittal offset between normal and spondylolithetic subjects. However, the observed difference

was poorly significant in a clinical point of view (less than  $2.5^\circ$ ) and the groups were not comparable in age (normal adults vs. adolescent subjects with spondylolisthesis).

When comparing the global sagittal balance between the two subgroups of high-grade spondylolisthesis, it is again observed that the spinal offset is similar (less than  $1^\circ$  difference on average), although the spinal tilt differs significantly by more than  $5^\circ$ . There are two possible mechanisms or a combination of both that can explain the highly increased tendency for forward tilting of the spine in the retroverted sacro-pelvis subgroup. First, a "biomechanical mechanism" can be involved, such that the local lumbosacral translational and angular deformity drives the center of gravity forward, and the patient is unable to modify its spinal geometry enough (by decreasing TK, increasing LL or recruiting more lordotic spinal segments) to recreate a more backward spinal tilt, as it is usually observed in normal subjects. When the spinal compensation limit specific to the patient is reached, the sacro-pelvis then adopts a retroverted configuration in order to move back the center of gravity and therefore maintain an adequate sagittal offset. The spinal compensation limit depends mostly on the vertebral morphology and on the mechanical properties of surrounding soft tissues (discs and muscles). Second, a "neurological mechanism" can also be involved in which the spinal or foraminal stenosis due to the local lumbosacral deformity leads to a retroverted sacro-pelvis in order to relieve the neurological compression or irritation. Thereafter, a forward spinal tilt is required to balance the backward displacement of the center of gravity caused by a retroverted sacro-pelvis.

### **Posture in low grade spondylolisthesis (Figures 4 and 5)**

The postural models introduced by Berthonnaud et al.<sup>1</sup> and by Mac-Thiong et al.<sup>15</sup> for normal individuals directly link the sacro-pelvis (measured from the SS) to the lumbar spine geometry (measured from the LL and the LT). Unfortunately, such a model is not specifically adapted for spondylolisthesis in which there is a local lumbosacral deformity. In contrast, the current postural model can effectively take into account the local lumbosacral deformity found in spondylolisthesis. This was done by incorporating local descriptors of the lumbosacral spine (%SLIP and LSA) linked to the lumbar spine by L5\_inf. L5\_inf was used to model the transition between the lumbosacral parameters and the lumbar spine. The technique for measuring this parameter is similar to the technique used to measure SS and it is believed that the role of L5\_inf in spondylolisthesis for regulating the lumbar spine above it is similar to that of SS in regulating the lumbar spine in normal individuals. In this study, its relationship with LL and LT was even higher than the direct relationship for SS with LL and LT in the normal and low-grade groups.

The L5\_inf parameter is similar to the L5-incidence originally described by Roussouly et al.<sup>18</sup> and similar results (not shown) were obtained with the use of L5-incidence instead of L5\_inf. However, L5\_inf was preferred over L5-incidence because technically it should be more accurate (position of femoral heads not involved in measurement) and conceptually it represents the direct link between the lumbosacral spine and the lumbar spine, while the L5-incidence represents the link between the femoral heads and the lumbar spine.

As demonstrated by the postural model in Figures 4 and 5, interactions between adjacent anatomical regions in low-grade spondylolisthesis are comparable to those found in normal



children. The morphological parameter PI primarily regulates the orientation of the sacro-pelvis (PT and SS). The lumbosacral geometry (%SLIP for low-grade spondylolisthesis and LSA for both groups) along with the SS correlate with L5\_inf which in turn is strongly related to the lumbar geometry (LL and LT). The lumbar geometry (LL and LT) is correlated with the thoracic geometry (TK and TT) but to a lesser extent. This is in accordance with previous studies reporting no or only weak correlation between the thoracic and lumbar shape in normal children.<sup>13,20</sup> Presumably, the thoracic spine shape (TK) is relatively fixed in a state of normal global spino-pelvic balance and is mainly determined by the morphology of the vertebrae, discs and rib cage. This is supported by the similar TK found in the normal and low-grade groups. Likewise, the poor mobility of the thoracic spine in the sagittal plane restricts the variability in its orientation, as reflected by the similar TT in both groups.

#### **Posture in high-grade spondylolisthesis (Figures 6 and 7)**

As opposed to the statements by Vialle et al.,<sup>22</sup> the current model was able to demonstrate that the postural mechanisms used by subjects with high-grade spondylolisthesis are significantly different to those used by normal children and by subjects with low-grade spondylolisthesis. While the sagittal balance mechanisms are similar in the normal and low-grade groups, there were two major differences with the high-grade group as a whole. First, the relationship between PT and PI is lost, underlining that the local lumbosacral deformity becomes so important in high-grade spondylolisthesis that an unusual increase in PT is necessary in order to maintain an acceptable global spino-pelvic balance. Next, the transition from the sacro-pelvis to the lumbar spine is deeply altered, indicating that in some cases the lumbar spine cannot compensate enough to counteract the forward displacement of the center of gravity secondary to the significant

translational and angular lumbosacral deformity. This explains the lack of correlation between SS and L5\_inf, and between lumbosacral parameters (LSA and %SLIP) and L5\_inf. In addition, there was a significant decrease in the relationship between L5\_inf and lumbar parameters (LL and LT). When the limit of accommodation of the lumbar spine is reached, it is possible that high-grade patients then achieve lordosis in the mobile lower thoracic spine in order to counteract the forward displacement of the center of gravity, as reflected by the significant decrease in TK values measured from T1 down to T12.

In order to better delineate the specific postural mechanisms involved in high-grade spondylolisthesis, separate analysis of the two subgroups of high-grade spondylolisthesis described by Hresko et al.<sup>10</sup> was done. This was deemed important because the global results for the whole group of subjects with high-grade spondylolisthesis in the current study were mainly due to the presence of more subjects in the retroverted sacro-pelvis subgroup. Also, Hresko et al.<sup>10</sup> suggested that the balanced and retroverted sacro-pelvis subgroups were associated with different sagittal balance patterns. The results show that the sagittal posture in subjects with a balanced sacro-pelvis is similar to that of normal subjects. This finding is in accordance with Hresko et al.,<sup>10</sup> who observed that normal individuals with a high PI in the same range as that of subjects with high-grade spondylolisthesis usually stand with a balanced sacro-pelvis. The relationship between PI and PT was maintained in the balanced sacro-pelvis group, suggesting that compensation for the local lumbosacral deformity in order to keep adequate global sagittal balance still occurs primarily through the mobile lumbar spine. Subjects in the balanced sacro-pelvis subgroup also maintain the pattern of correlations normally found in the transition between the lumbar spine and the sacro-pelvis. The strong relationships between L5\_inf and the lumbar

spine parameters (LL and LT) were preserved, as well as the influence of LSA and SS on L5\_inf. The authors believe that observation of high correlation coefficients with P values between 0.01 and 0.05 for L5\_inf vs. SS and L5\_inf vs. LSA was due to the limited number of subjects with a balanced sacro-pelvis. Further study with a larger sample of subjects with high-grade spondylolisthesis is recommended to confirm these results.

In the retroverted sacro-pelvis subgroup, the normal postural mechanisms are distorted due to the local lumbosacral deformity. Compensation through the lumbar spine has reached its limits so that the relationships between the lumbar spine geometry and the sacro-pelvis are lost. A high PT then becomes essential to achieve a relatively balanced posture. These findings suggest that surgical reduction of the local lumbosacral deformity in these patients with a retroverted sacro-pelvis could be attempted to restore the normal postural mechanisms of sagittal balance.

## Conclusion

This study leads to a better understanding of sagittal balance in developmental lumbosacral spondylolisthesis. The results have shown that subjects attempt to stand with a relatively constant global sagittal spino-pelvic balance (as measured by the sagittal offset between C7 and the femoral heads), regardless of the local lumbosacral deformity and corresponding spinal tilt. Postural mechanisms used by normal subjects are maintained in subjects with low-grade spondylolisthesis and with high-grade spondylolisthesis with a balanced sacro-pelvis. On the opposite, postural mechanisms are distorted in high-grade spondylolisthesis with a retroverted sacro-pelvis. In high-grade spondylolisthesis, it is therefore essential to analyze separately subjects with a balanced sacro-pelvis and those with a retroverted sacro-pelvis. Further study with a large number of subjects with high-grade spondylolisthesis is however required to confirm the results of this study. The role of surgical reduction of high-grade spondylolisthesis on the restoration of the normal postural mechanisms also needs to be addressed.

Table I. Parameters of the spine and pelvis

Anatomical region	Parameter	Abbreviation	Definition
Thoracic spine	Thoracic kyphosis (°)	TK	Angle between superior endplate of T1 and inferior endplate of T12. Positive when in kyphosis.
	Thoracic tilt (°)	TT	Angle between vertical line and line joining center of superior endplate of T1 to center of inferior endplate of T12. $\Psi$
Lumbar spine	Lumbar lordosis (°)	LL	Angle between superior endplate of L1 and inferior endplate of L5. Negative when in lordosis.
	Lumbar tilt (°)	LT	Angle between vertical line and line joining center of superior endplate of L1 to center of inferior endplate of L5. $\Psi$
	L5 inferior slope (°)	L5_inf	Angle between inferior endplate of L5 and horizontal line.
Lumbosacral spine	Slip percentage (%)	%SLIP	Translation of postero-inferior corner of L5 vs. postero-superior corner of S1, with respect to length of superior endplate of S1.
	Lumbosacral angle (°)	LSA	Angle between inferior endplate of L5 and superior endplate of S1. Positive when in kyphosis.
	Sacral slope (°)	SS	Angle between superior endplate of S1 and horizontal line.
Sacro-pelvis	Pelvic tilt (°)	PT	Angle between vertical line and line joining hip axis to center of superior endplate of S1. $\Psi$
	Pelvic incidence (°)	PI	Angle between superior endplate of S1 and line joining hip axis to center of superior endplate of S1.
Global spine	Spinal tilt (°)	—	Angle between horizontal line and line joining center of C7 vertebral body to center of superior endplate of S1. Forward tilt is present when value is less than 90°
	Sagittal offset (°)	—	Angle between vertical line and line joining center of C7 vertebral body to hip axis. $\Psi$

$\Psi$  Positive when tilted forward with respect to vertical line.

Table II. Mean, standard deviation and ANOVA results for the comparison between the normal, low-grade and high-grade spondylolisthesis groups.

Anatomical region	Parameter	Normal group (n=120)	Low-grade group (N=91)	High-grade group (n=40)	P value (ANOVA)
Thoracic spine	Thoracic kyphosis (°)	41.0±11.2	41.7±9.7	30.4±13.6	<10 <sup>-7</sup>
	Thoracic tilt (°)	-1.5±5.9	-0.2±5.3	-5.1±7.3	<10 <sup>-4</sup>
Lumbar spine	Lumbar lordosis (°)	-45.5±13.3	-54.7±14.5	-86.4±16.2	<10 <sup>-37</sup>
	Lumbar tilt (°)	-6.7±5.9	-4.1±6.3	17.9±10.5	<10 <sup>-50</sup>
	L5 inferior slope (°)	29.2±9.0	39.8±13.4	77.5±11.5	<10 <sup>-63</sup>
Lumbosacral spine	Slip percentage (%)	0	14.7±9.1	78.8±20.2	<10 <sup>-68</sup>
	Lumbosacral angle (°)	-13.4±5.8	-11.5±7.5	36.6±24.0	<10 <sup>-68</sup>
Sacro-pelvis	Sacral slope (°)	42.8±8.5	51.3±12.1	45.1±15.3	<10 <sup>-6</sup>
	Pelvic tilt (°)	5.5±7.9	11.9±8.2	32.2±10.4	<10 <sup>-42</sup>
	Pelvic incidence (°)	48.2±11.4	63.2±13.6	77.3±13.0	<10 <sup>-29</sup>
Global spine	Spinal tilt (°)	92.7±4.3	90.2±3.7	85.3±6.2	<10 <sup>-15</sup>
	Sagittal offset (°)	-2.8±3.8	-2.3±3.3	-3.0±4.5	0.50

Table III. P-values for post-hoc comparisons between groups using Games-Howell test.

Anatomical region	Parameter	Normal vs low-grade	Normal vs high-grade	Low-grade vs high-grade
Thoracic spine	Thoracic kyphosis	0.89	$<10^{-3}$	$<10^{-4}$
	Thoracic tilt	0.18	0.02	$<10^{-3}$
Lumbar spine	Lumbar lordosis	$<10^{-4}$	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$
	Lumbar tilt	$<10^{-2}$	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$
	L5 inferior slope	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$
Lumbosacral spine	Slip percentage	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$
	Lumbosacral angle	0.12	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$
Sacro-pelvis	Sacral slope	$<10^{-6}$	0.62	0.07
	Pelvic tilt	$<10^{-6}$	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$
	Pelvic incidence	$<10^{-8}$	$<10^{-8}$	$<10^{-6}$
Global spine	Spinal tilt	$<10^{-4}$	$<10^{-7}$	$<10^{-4}$
	Sagittal offset	N/A†	N/A†	N/A†

† Not applicable because ANOVA was not significant between groups.

Table IV. Mean, standard deviation and P-values for the comparison between high-grade spondylolisthetic subjects subdivided according to sacro-pelvic balance.

Anatomical region	Parameter	Balanced sacro-pelvis (n=15)	Retroverted sacro-pelvis (n=25)	P value (Mann-Whitney U test)
Thoracic spine	Thoracic kyphosis (°)	37.6±9.0	26.0±13.6	0.02
	Thoracic tilt (°)	-6.6±7.2	-4.3±7.3	0.43
Lumbar spine	Lumbar lordosis (°)	-90.2±20.6	-84.2±12.9	0.17
	Lumbar tilt (°)	11.5±7.0	21.7±10.5	<10 <sup>-2</sup>
	L5 inferior slope (°)	75.0±15.5	78.9±8.2	0.75
Lumbosacral spine	Slip percentage (%)	63.1±18.4	97.9±27.4	<10 <sup>-4</sup>
	Lumbosacral angle (°)	19.0±19.6	47.1±20.0	<10 <sup>-3</sup>
	Sacral slope (°)	58.1±9.4	37.4±12.6	<10 <sup>-5</sup>
Sacro-pelvis	Pelvic tilt (°)	23.1±4.6	37.6±9.0	<10 <sup>-5</sup>
	Pelvic incidence (°)	81.2±12.8	75.0±12.8	0.18
Global spine	Spinal tilt (°)	88.6±4.2	83.3±6.3	<10 <sup>-2</sup>
	Sagittal offset (°)	-3.6±3.6	-2.6±5.0	0.77



## Figures

Figure 1. Two subgroups of patients with high-grade spondylolisthesis based on their sacro-pelvic balance.

Figure 2. Thirteen anatomical landmarks of the spine and pelvis identified using the software.

Figure 3. Determination of sacro-pelvic balance. A) Measurement of sacral slope (SS). B) Measurement of pelvic tilt (PT). C) Classification into balanced or retroverted subgroup based on the SS and PT.

Figure 4. Overview of statistically ( $p < 0.01$ ) and clinically significant correlations between parameters of adjacent anatomical regions for normal subjects. Moderate ( $0.3 \leq r < 0.5$ ) and strong ( $r \geq 0.5$ ) correlations are shown in dotted and full arrows, respectively. The mathematical relationship between pelvic tilt and sacral slope is also shown. No correlation analysis with slip percentage was done for normal subjects.

Figure 5. Overview of statistically ( $p < 0.01$ ) and clinically significant correlations between parameters of adjacent anatomical regions for subjects with low-grade spondylolisthesis. Moderate ( $0.3 \leq r < 0.5$ ) and strong ( $r \geq 0.5$ ) correlations are shown in dotted and full arrows, respectively. The mathematical relationship between pelvic tilt and sacral slope is also shown.

Figure 6. Overview of statistically ( $p < 0.01$ ) and clinically significant correlations between parameters of adjacent anatomical regions for subjects with high-grade spondylolisthesis. Moderate ( $0.3 \leq r < 0.5$ ) and strong ( $r \geq 0.5$ ) correlations are shown in dotted and full arrows, respectively. The mathematical relationship between pelvic tilt and sacral slope is also shown.

Figure 7. Overview of statistically ( $p < 0.01$ ) and clinically significant correlations between parameters of adjacent anatomical regions for subjects with high-grade spondylolisthesis subgrouped based on their sacro-pelvis balance. Moderate ( $0.3 \leq r < 0.5$ ) and strong ( $r \geq 0.5$ ) correlations are shown in dotted and full arrows, respectively. The mathematical relationship between pelvic tilt and sacral slope is also shown. In the balanced sacro-pelvis subgroup, clinically significant correlations that almost reached statistical significance were present and were therefore also shown.

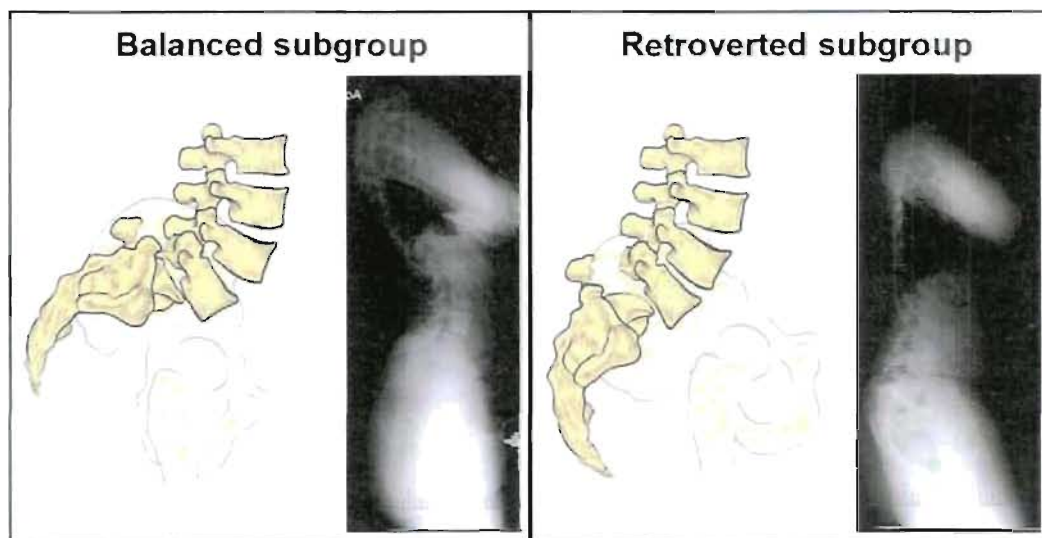
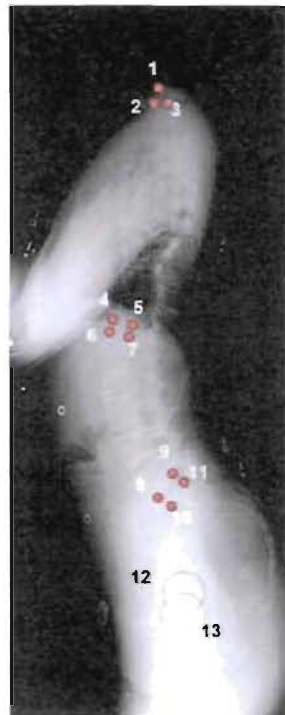


Figure 1



- 1 – Center of C7 vertebral body
- 2 – Antero-superior corner of T1 vertebral body
- 3 – Postero-superior corner of T1 vertebral body
- 4 – Antero-inferior corner of T12 vertebral body
- 5 – Postero-inferior corner of T12 vertebral body
- 6 – Antero-superior corner of L1 vertebral body
- 7 – Postero-superior corner of L1 vertebral body
- 8 – Antero-inferior corner of L5 vertebral body
- 9 – Postero-inferior corner of L5 vertebral body
- 10 – Antero-superior corner of S1 vertebral body
- 11 – Postero-superior corner of S1 vertebral body
- 12 – Left femoral head
- 13 – Right femoral head

Figure 2

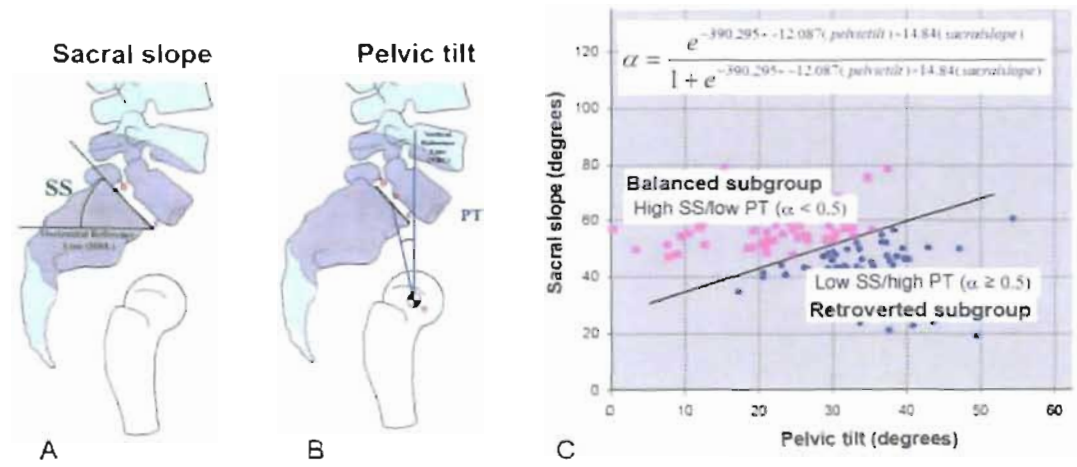


Figure 3

# Normal Subjects

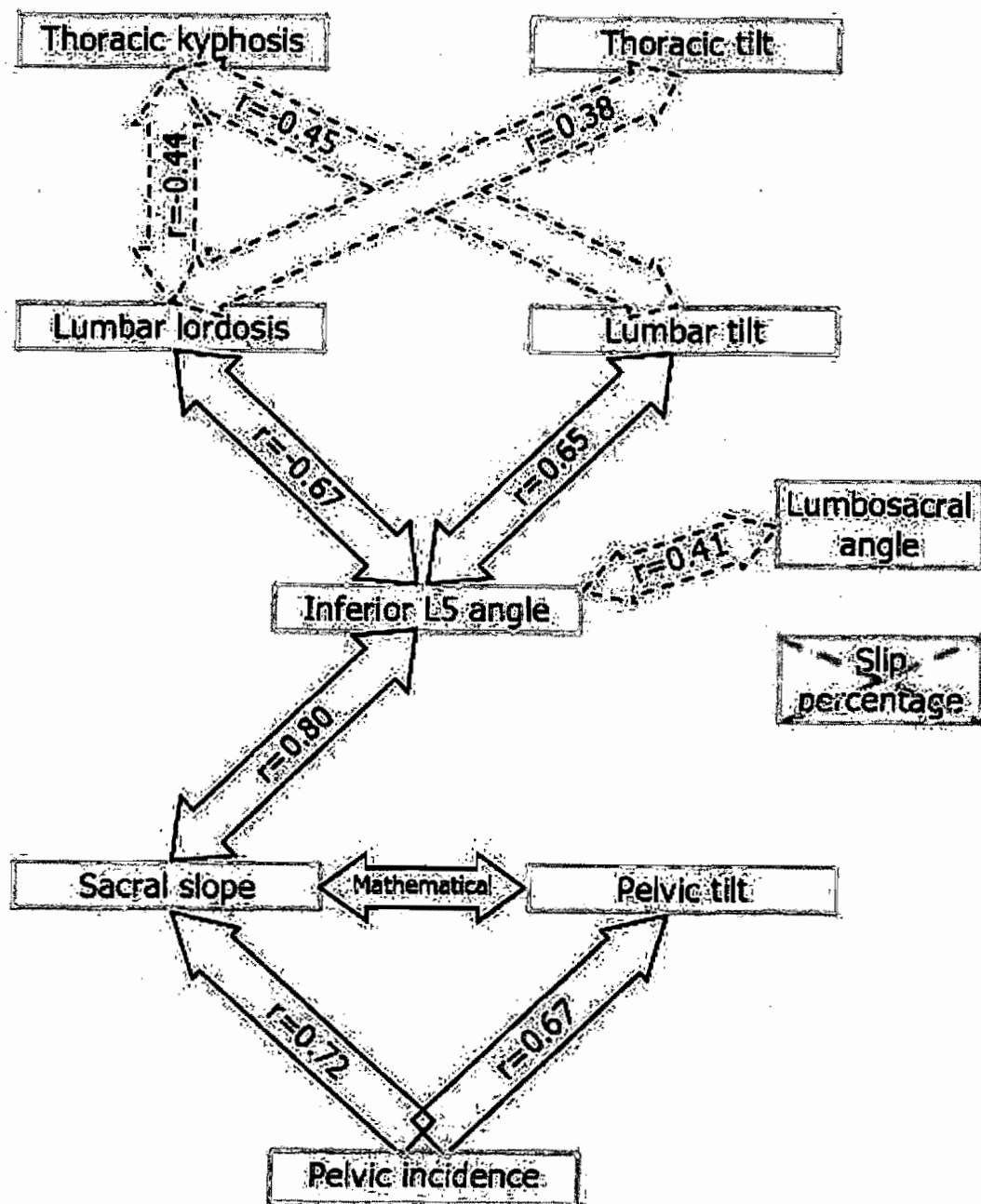


Figure 4

# Low-grade Spondylolisthesis

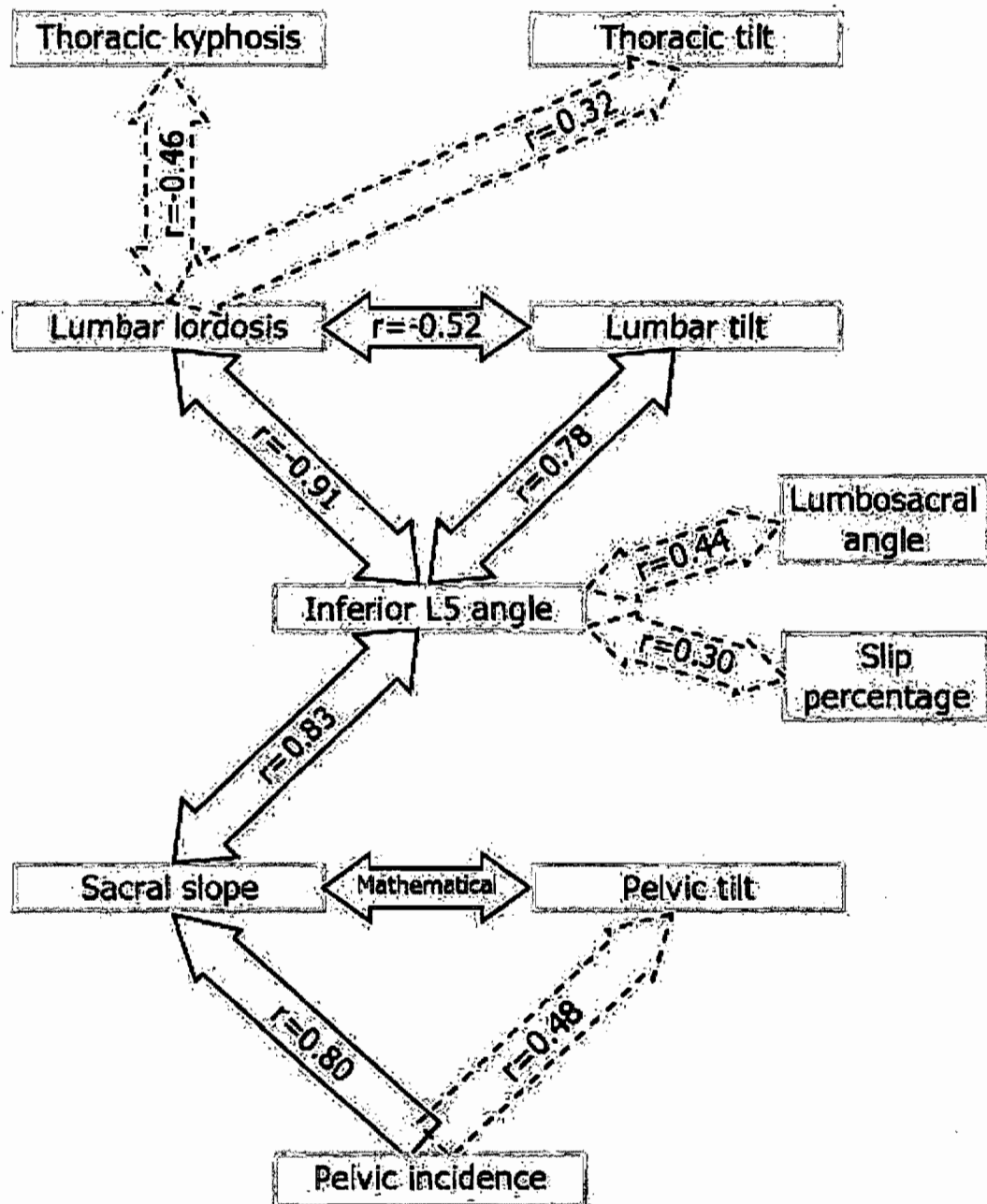


Figure 5

# High-grade Spondylolisthesis

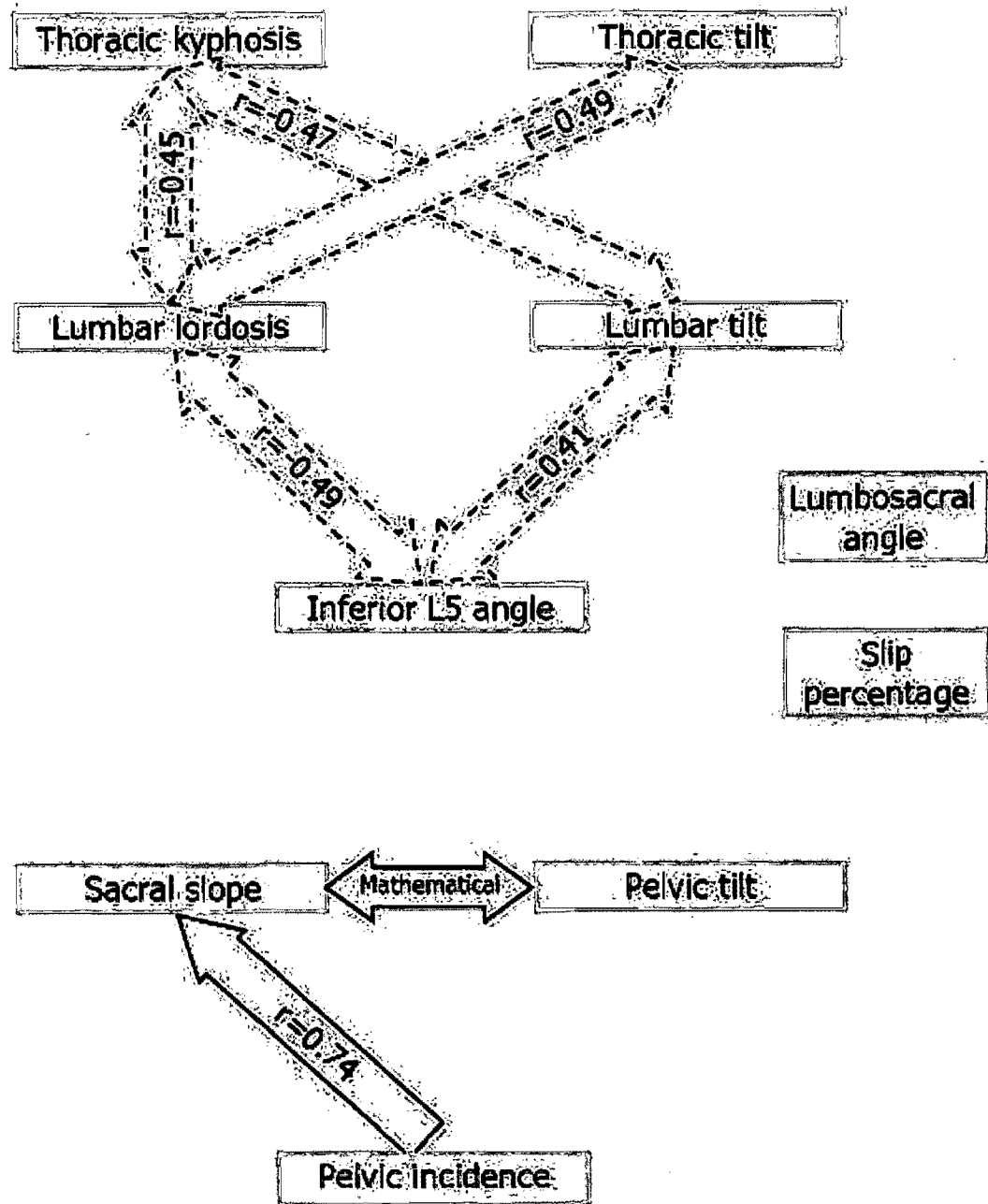
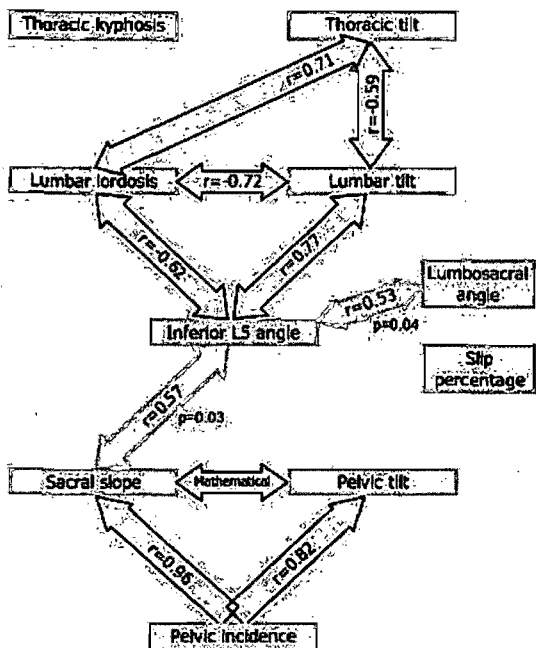


Figure 6



### Balanced Sacro-pelvis Subgroup



### Retroverted Sacro-pelvis Subgroup

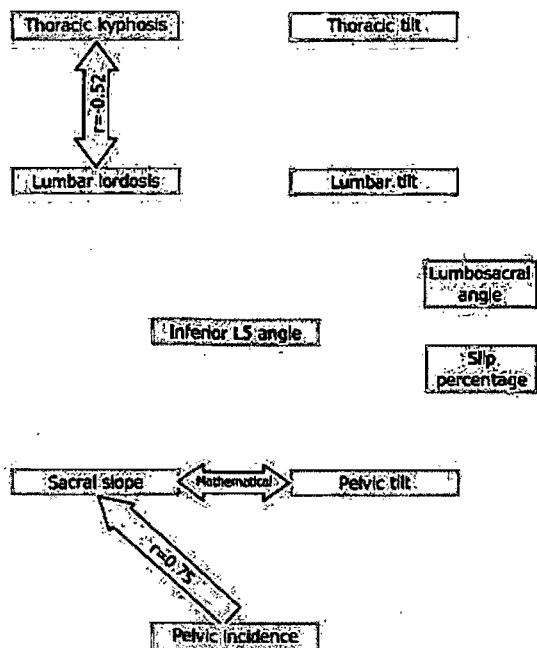


Figure 7

## References

- 1 Berthonnaud É, Dimnet J, Roussouly P, et al. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord, Tech* 2005;18:40-47
- 2 Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, et al. Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *Eur Spine J* 2006;15:415-422.
- 3 Cil A, Yazici M, Uzumcugil A, et al. The evolution of sagittal segmental alignment of the spine during childhood. *Spine* 2004;30:93-100
- 4 Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioural sciences*, 2<sup>e</sup> éd. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1988
- 5 Descamps H, Commare-Nordmann MC, Marty C, et al. Modifications des angles pelviens, dont l'incidence, au cours de la croissance humaine. *Biom Hum Anthropol* 1999;17:59-63
- 6 El Fegoun AB, Schwab F, Gamez L, et al. Center of gravity and radiographic posture analysis: a preliminary review of adult volunteers and adult patients affected by scoliosis. *Spine* 2005;30:1535-1540
- 7 Faro FD, Marks MC, Pawelek J, et al. Evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 2004;29:2284-2289.
- 8 Geiger EV, Müller O, Niemeyer T, et al. Adjustment of pelvispinal parameters preserves the constant gravity line position. *Int Orthop* 2007;31:253-258.
- 9 Horton WC, Brown CW, Bridwell KH, et al. Is there an optimal patient stance for obtaining a lateral 36° radiograph? A critical comparison of three techniques. *Spine* 2005;30:427-433.

- 10 Hresko MT, Labelle H, Roussouly P, et al. Classification of high-grade spondylolisthesis based on pelvic version and spine balance: possible rationale for reduction. Accepted in *Spine*
- 11 Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:151-160
- 12 Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence, and spinopelvic balance. A correlation study. *Spine* 2004;29:2049-2954
- 13 Mac-Thiong J-M, Labelle H, Charlebois M, et al. Sagittal plane analysis of the spine and pelvis in adolescent idiopathic scoliosis according to the coronal curve type. *Spine* 2003;28:1404-1409
- 14 Mac-Thiong J-M, Berthonnaud É, Dimar II JR, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine* 2004;29:1642-1647
- 15 Mac-Thiong J-M, Labelle H, Berthonnaud É, et al. Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents. *Eur Spine J* 2007;16:227-234
- 16 Mangione P, Gomez D, Senegas J. Study of the course of the incidence angle during growth. *Eur Spine J* 1997;6:163-167.
- 17 Rajnics P, Templier A, Skalli W, et al. The association of sagittal spinal and pelvic parameters in asymptomatic persons and patients with isthmic spondylolisthesis. *J Spinal Disord* 2002;15:24-30
- 18 Roussouly P, Transfeldt E, Berthonnaud É, et al. Changes in spinal and pelvic sagittal parameters after high grade isthmic spondylolisthesis. *Eur Spine J* 2001;10(suppl 1):19
- 19 Roussouly P, Gollogly S, Nosedá O, et al. The vertical projection of the sum of the ground reactive forces of a standing patient is not the same as the C7 plumb line. A radiographic study of the sagittal alignment of 153 asymptomatic volunteers. *Spine* 2006;31:E320-E325

- 20 Vedantam R, Lenke LG, Keeney JA, et al. Comparison of standing sagittal spinal alignment in asymptomatic adolescents and adults. *Spine* 1998;23:211-215
- 21 Vialle R, Levassor N, Rillardon L, et al. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. *J Bone Joint Surg Am* 2005;87:260-267
- 22 Vialle R, Ilharberde B, Dauzac C, et al. Is there a sagittal imbalance of the spine in isthmic spondylolisthesis? A correlation study. *Eur Spine J* 2007 Apr 17; [Epub ahead of print]
- 23 Voutsinas SA, MacEwen GD. Sagittal Profiles of the Spine. *Clin Orthop* 1986;210:233-242

## Chapitre 7 – Discussion

Durant les dernières années, plusieurs articles ont porté sur l'étude de la morphologie sacro-pelvienne dans le spondylolisthésis.<sup>36,48,73,97,109,135,173,233</sup> Malgré toutes ces études, la pertinence clinique d'évaluer la morphologie sacro-pelvienne dans le spondylolisthésis restait encore à déterminer. En effet, l'influence de la morphologie sacro-pelvienne sur l'équilibre spino-pelvien restait largement incompris. Conséquemment, personne jusqu'ici n'avait été en mesure de confirmer que la morphologie sacro-pelvienne et l'équilibre spino-pelvien sagittal devaient être considérés dans l'évaluation ou le traitement du spondylolisthésis.

Globalement, cette thèse permet de documenter la morphologie sacro-pelvienne et l'équilibre spino-pelvien autant chez les sujets normaux que chez ceux atteints de spondylolisthésis. Elle tire son originalité du fait qu'elle propose un modèle postural global simple permettant de comprendre que les segments adjacents spino-pelviens interagissent entre eux dans le but d'atteindre une posture équilibrée. L'élaboration du modèle postural global s'est faite à partir des trois premières hypothèses et des objectifs correspondants.

### **7.1 Hypothèse et objectif 1**

Le Chapitre 3 visait à vérifier si les paramètres communément utilisés pour évaluer l'équilibre sagittal spino-pelvien étaient suffisamment fiables et reproductibles pour être employés dans ce projet. Les deux premiers articles traitent de la mesure de l'équilibre sagittal du rachis (cyphose thoracique et lordose lombaire) uniquement. Puisque différentes techniques sont utilisées dans la littérature et qu'il n'existait aucun consensus à cet effet, il était important d'évaluer leur pertinence et leur reproductibilité. Trois techniques ont été comparées et rapportées dans deux articles :

- 1) la technique de Cobb contrainte pour laquelle les vertèbres limites sont prédéfinies,
- 2) la technique de Cobb non contrainte pour laquelle la vertèbre limite séparant la cyphose thoracique et la lordose lombaire est variable (la plus inclinée par rapport à

l'horizontale), et 3) la technique des cercles tangents. Aucune étude jusqu'ici n'avait comparé ces techniques de mesure avant la publication récente de ces deux articles par notre groupe. Les techniques de Cobb contrainte<sup>12,41,56,70,76,77,93,106,158,168,172,175,225</sup> et non contrainte<sup>205,231</sup> sont utilisées depuis longtemps déjà, alors que la technique des cercles tangents<sup>224</sup> est plus récente. Les trois techniques ont été évaluées à partir des mêmes sujets, soit 10 adolescents normaux, 10 sujets avec scoliose idiopathique adolescente et 10 sujets avec spondylolisthésis. Les résultats les plus importants issus de ces deux articles sont que les trois techniques donnent une excellente reproductibilité intra- et inter-observateur et qu'elles sont fortement corrélées entre elles. Pour notre modèle postural basé sur des corrélations, la forte corrélation entre les trois techniques évaluées suggère que n'importe laquelle de ces trois techniques peut être utilisée.

Il existe un avantage conceptuel à utiliser la technique des cercles tangents ou la technique de Cobb non contrainte. En effet, ces deux techniques permettent en théorie une évaluation plus globale des courbures sagittales du rachis et tiennent compte de la variabilité dans le niveau de transition entre la cyphose thoracique et la lordose lombaire.<sup>224</sup> Elles sont toutefois plus complexes à appliquer que la technique de Cobb contrainte qui demeure la plus utilisée dans la littérature. La technique de Cobb non contrainte requiert l'identification précise de la vertèbre limite dans la région thoraco-lombaire qui sépare la cyphose thoracique et la lordose lombaire. Sachant que l'identification des vertèbres limites dans le plan coronal pour la scoliose est associée à une reproductibilité inter-observateur faible (coefficient de kappa de 0.3),<sup>169</sup> l'identification de la vertèbre limite dans le plan sagittal risque d'être encore moins fiable compte tenu de la moins bonne visibilité des repères anatomiques dans la région thoraco-lombaire sur la vue latérale. Quant à elle, la technique des cercles tangents nécessite un logiciel adapté puisqu'elle est impossible à mesurer manuellement. Nous l'avons utilisée dans les quatrième et cinquième articles (Chapitre 4 et Chapitre 5), alors que nous disposions d'un logiciel adapté (Sagittal Spine, Optimage) fourni par le Groupe de recherche appliquée en orthopédie de Lyon.

Cependant, dans l'article final (Chapitre 6), nous avons opté pour la technique de Cobb contrainte parce qu'elle est plus simple et surtout parce qu'elle est la plus communément utilisée par les cliniciens. Conséquemment, le modèle postural final proposé (Chapitre 6) est plus apte à être accepté, compris et utilisé par les cliniciens. À part pour les articles impliquant la technique des cercles tangents, tous les paramètres ont été mesurés à l'aide du logiciel IdefX développé par le Laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie du centre de recherche du CHUM affilié à l'École de Technologie Supérieure.

Le troisième article du Chapitre 3 permet de comparer les différentes techniques proposées pour mesurer la cyphose lombosacrée. Une étude antérieure<sup>216</sup> avait déjà comparé certaines techniques de mesure de sévérité du spondylolisthesis. Par contre, cette étude comprenait principalement des sujets avec un spondylolisthesis de bas-grade et n'évaluait pas les deux techniques suggérées par le SDSG pour mesurer la cyphose lombosacrée.<sup>158</sup> Au contraire, dans notre étude, nous avons évalué les deux techniques de mesure proposées par le SDSG et nous avons également spécifiquement analysé les sujets normaux, de même que ceux avec un spondylolisthesis de bas- et de haut-grade. Globalement, cette troisième étude démontre que la reproductibilité intra- et inter-observateur est excellente pour toutes les techniques évaluées. Ces résultats s'avèrent très importants pour le dernier article (Chapitre 6) où il a fallu choisir une technique de mesure de la cyphose lombosacrée. Puisque toutes les techniques sont équivalentes au niveau de la reproductibilité, nous avons opté pour la mesure de l'angle lombosacré entre le plateau supérieur de S1 et le plateau inférieur de L5 puisque ce paramètre exprime bien la transition entre l'orientation sacrée mesurée à partir du plateau supérieur de S1 et la géométrie du rachis lombaire. En ce qui concerne la mesure du glissement lombosacré dans le modèle postural final (Chapitre 6), nous avons choisi la technique du pourcentage de glissement proposée par Taillard<sup>212</sup> plutôt que la technique de Meyerding<sup>141</sup> pour deux raisons. Premièrement, une étude a déjà montré que la mesure du pourcentage de glissement était excellente (ICC intra-observateur = 0.94; ICC inter-observateur =

0.89) et meilleure que la mesure du grade de Meyerding.<sup>158</sup> Deuxièmement, le pourcentage de glissement donne une valeur continue plus facile à utiliser dans des études de corrélations, contrairement au grade de glissement qui constitue une mesure discrète.

En ce qui a trait aux mesures de morphologie (incidence pelvienne) et d'orientation sacro-pelvienne (version pelvienne et pente sacrée), nous n'avons pas spécifiquement analysé leur reproductibilité dans cette thèse puisqu'elles ont déjà été validées dans différentes études.<sup>14,21,97,175,229</sup> Trois paramètres ont été utilisés dans la littérature pour mesurer la morphologie sacro-pelvienne chez les patients avec spondylolisthésis : l'angle pelvi-sacré,<sup>48</sup> l'angle de lordose pelvienne<sup>97</sup> et l'incidence pelvienne.<sup>49</sup> Ces trois paramètres sont basées sur le même concept, soit la mesure de l'orientation du plateau sacré par rapport aux têtes fémorales. Ce n'est donc pas surprenant que la reproductibilité soit similaire pour ces trois techniques de mesure.<sup>97</sup> Le choix de l'incidence pelvienne a été influencé par plusieurs facteurs. Premièrement, ce paramètre est le plus communément utilisé dans la littérature afin d'évaluer la morphologie sacro-pelvienne. Deuxièmement, la mesure de l'incidence pelvienne est pratique puisque la mesure correspond à la somme arithmétique de la version pelvienne et de la pente sacrée (Figure 1). Troisièmement, la reproductibilité de la mesure d'incidence pelvienne a été démontrée comme étant excellente autant avec la technique manuelle que la technique assistée par ordinateur.<sup>14,175</sup> et ce, même pour les sujets avec un spondylolisthésis de haut-grade.<sup>229</sup> Boulay et al.<sup>21</sup> ont même démontré que la mesure radiologique de l'incidence pelvienne reproduisait fidèlement la mesure anatomique réelle.

Pour cette thèse, toutes les mesures ont été réalisées à l'aide d'une technique assistée par ordinateur. Par rapport à la technique manuelle, Rillardon et al.<sup>175</sup> ont déjà démontré que la reproductibilité intra- et inter-observateur est légèrement supérieure en plus de permettre une économie de temps importante. Vialle et al.<sup>229</sup> ont également démontré la supériorité de la technique assistée par ordinateur afin de mesurer



l'incidence pelvienne dans le spondylolisthésis de haut-grade. L'avantage principal de la technique de mesure utilisée dans ce projet est qu'elle permet, à partir de l'identification de repères anatomiques, le calcul simultané de multiples indices, ce qui réduit considérablement le temps requis pour évaluer les radiographies.

## **7.2 Hypothèse et objectif 2**

Le Chapitre 4 est directement relié à l'hypothèse 2 et à l'objectif 2. Les changements dans la morphologie sacro-pelvienne et dans l'équilibre spino-pelvien durant la croissance restaient mal compris. Le quatrième article montre les modifications qui se produisent durant la croissance chez les enfants et adolescents normaux pour les principaux paramètres spino-pelviens : cyphose thoracique, lordose lombaire, pente sacrée, version pelvienne et incidence pelvienne. Cet article aide à mieux comprendre comment l'enfant fait pour maintenir une posture équilibrée malgré les changements morphologiques importants subis durant la croissance. Bien que Descamps et al.<sup>42</sup> aient étudié les variations dans l'incidence pelvienne avec l'âge, il était impossible, à partir de leurs résultats, de tirer des conclusions précises. En effet, ceux-ci n'avaient pas effectué d'étude de corrélation entre l'incidence pelvienne et l'âge, mais avaient plutôt décidé de comparer l'incidence pelvienne entre des groupes d'âges différents choisis de façon arbitraire. Mangione et al.,<sup>132</sup> quant à eux, ont démontré que l'incidence pelvienne tendait à augmenter de façon linéaire durant l'enfance après l'acquisition de la marche. Par contre, la cohorte n'était constituée que de 30 enfants âgés de 9 ans et moins, et n'incluait donc aucun adolescent, alors qu'il était présumé que les changements majeurs dans l'incidence pelvienne survenaient principalement durant l'adolescence.<sup>42</sup> Or, les résultats du quatrième article démontrent que l'incidence pelvienne tend à augmenter de façon linéaire et régulière durant toute la période de croissance après l'âge de quatre ans, contrairement à l'hypothèse de Descamps et al.<sup>42</sup> En effet, nous avons remarqué que la corrélation entre l'âge et l'incidence pelvienne était similaire avant et après l'âge de 10 ans. Le processus par lequel l'incidence pelvienne augmente durant la croissance reste cependant inconnu. Il serait donc intéressant dans les études subséquentes de déterminer si cette

augmentation de l'incidence pelvienne est associée à la croissance du bassin et/ou du sacrum, ou à une modification de l'orientation sacro-iliaque.

Par ailleurs, la version pelvienne augmente en fonction de l'âge, alors que la pente sacrée reste relativement constante. En sachant que l'incidence pelvienne représente la somme de la version pelvienne et de la pente sacrée (Figure 1), la progression de l'incidence pelvienne durant la croissance se traduit principalement par une augmentation correspondante de la version pelvienne tout en maintenant une pente sacrée adéquate. Tel que proposé par plusieurs auteurs,<sup>49,96,115</sup> la version pelvienne joue un rôle prépondérant sur la position du centre de gravité. Dans le quatrième article (Chapitre 4), nous avons suggéré que l'augmentation de la version pelvienne permettait de conserver un équilibre adéquat avec une dépense énergétique minimale en réponse à la croissance du corps humain. Une seconde hypothèse doit toutefois être émise dans le contexte que la pente sacrée reste relativement constante durant la croissance. Il se peut que la pente sacrée doive demeurer dans un intervalle assez restreint afin de minimiser les contraintes mécaniques à la jonction lombosacrée (sur le disque en antérieur et les facettes articulaires en postérieur) et par conséquent, minimiser le risque de spondylolisthésis ou de dégénérescence discale précoce au niveau lombosacré. Quant aux valeurs de cyphose thoracique et de lordose lombaire, les résultats montrent qu'elles augmentent également de façon significative avec l'âge, tel qu'observé aussi par Voutsinas et MacEwen<sup>231</sup> et par Cil et al.<sup>31</sup>

La similitude dans la progression de tous les paramètres mesurés en fonction de l'âge prouve de façon indirecte la validité de l'hypothèse 2 qui stipule que l'équilibre spino-pelvien reste constant durant la croissance. En effet, les résultats suggèrent que les paramètres pour chaque segment anatomique spino-pelvien augmentent de façon linéaire et similaire avec l'âge, ce qui concorde avec le maintien de relations constantes entre chaque segment anatomique adjacent durant la croissance. En fait, l'apport majeur de ce quatrième article est aussi d'introduire l'hypothèse 3 qui

propose que l'équilibre spino-pelvien global dépend de l'interdépendance entre les segments anatomiques adjacents spino-pelviens, sans égard à l'âge du sujet.

Cette étude demeure toutefois limitée par son caractère transversal. Une étude longitudinale des paramètres spino-pelviens durant la croissance sur une cohorte de sujets normaux aurait été idéale. Cependant, une telle démarche nécessiterait la prise de radiographies sériées sur des enfants et adolescents normaux, ce qui est impossible pour des raisons éthiques. En outre, une analyse de corrélation des paramètres avec l'âge pour différents groupes d'âge aurait sans aucun doute ajouté à la force de cette étude et devrait ainsi être réalisée dans une étude future afin de vérifier si les relations entre les différents paramètres de l'équilibre spino-pelvien (et donc les corrélations entre chaque segment anatomique) restent constantes à tout âge.

### **7.3 Hypothèse et objectif 3**

Le Chapitre 5 porte essentiellement sur la vérification de l'hypothèse 3 basée sur l'importance de l'interdépendance des segments anatomiques adjacents spino-pelviens dans le maintien d'une posture équilibrée. Dans l'étude où ils ont introduit le concept de la morphologie sacro-pelvienne chez les patients atteints de pathologie rachidienne, Doring et al.<sup>48</sup> ont mis l'accent sur l'importance de l'interdépendance entre le bassin et le rachis lombaire dans le maintien d'une posture équilibrée : "Mechanisms of maintenance of postural equilibrium can be made visible by the establishment of mutual dependencies between these parameters in normal as well as in pathologic cases". Cette idée a été reprise de façon brillante par Berthonnaud et al.<sup>13</sup> qui étendent le concept à tout le rachis : "the pelvis and spine in the sagittal plane can be considered as a linear chain linking the head to the pelvis where shape and orientation of each anatomic segment are closely related and influence the adjacent segment to maintain a stable posture with a minimum of energy expenditure". Ils ont démontré leur hypothèse à l'aide d'un schéma présentant les corrélations entre les paramètres cervicaux, thoraciques, lombaires et pelviens chez une cohorte d'adultes sains.

Puisque notre objectif ultime était d'étudier l'équilibre spino-pelvien dans le spondylolisthésis pédiatrique, nous avons alors pensé que la meilleure solution était d'élaborer un modèle postural de l'équilibre spino-pelvien qui permettrait de comparer les patients atteints de spondylolisthésis aux sujets sains de même âge (Objectif 4). C'est dans cette optique que nous avons adapté le concept mis de l'avant par Berthonnaud et al.<sup>13</sup> dans le cinquième article. Ceci était important car il n'existait jusque là aucun modèle postural développé spécifiquement pour la population pédiatrique et que nous ne savions pas si le concept d'interdépendance des segments anatomiques adjacents spino-pelviens s'étendait aux enfants et adolescents (hypothèse 3). Pour vérifier l'hypothèse 3, nous avons donc étudié l'équilibre spino-pelvien de 341 enfants sains dans le cinquième article. Cette étude multi-centrique regroupe la plus vaste cohorte de sujets pédiatriques sains rapportée dans la littérature traitant de l'équilibre spino-pelvien. Plutôt que d'inclure l'incidence pelvienne et la pente sacrée sur un même niveau comme l'ont fait Berthonnaud et al.<sup>13</sup> pour lier le bassin au rachis lombaire (Figure 2), nous avons décidé de diviser le bassin en deux paliers distincts (Figure 4, Chapitre 5) : 1) l'incidence pelvienne seule à la base et 2) la pente sacrée et la version pelvienne entre l'incidence pelvienne et le rachis lombaire. Dans ce nouveau modèle, l'incidence pelvienne est considérée séparément puisqu'elle constitue le seul paramètre morphologique (indépendant de la position du sujet), contrairement à la pente sacrée et à la version pelvienne. De plus, elle détermine principalement la position du bassin (pente sacrée et version pelvienne), tel que suggéré par les fortes corrélations liant l'incidence pelvienne d'une part, à la pente sacrée et à la version pelvienne d'autre part.

Globalement, le cinquième article confirme l'hypothèse 3 sur l'interdépendance des segments anatomiques adjacents spino-pelviens dans la posture sagittale des enfants sains. Le patron de corrélations observé est similaire à celui obtenu par Berthonnaud et al.<sup>13</sup> chez les adultes sains (Figure 2). Dans le modèle préliminaire développé (Figure 4, Chapitre 5), l'incidence pelvienne constitue la pierre angulaire qui

détermine la pente sacrée et la version pelvienne. La pente sacrée est elle-même reliée à la forme (lordose lombaire) et à l'orientation (inclinaison lombaire) du rachis lombaire. Les paramètres décrivant le rachis lombaire (lordose et inclinaison lombaires) sont à leur tour liés aux paramètres du rachis thoracique (cyphose et inclinaison thoraciques).

De façon intéressante, les paramètres d'inclinaison (version pelvienne, inclinaison lombaire et inclinaison thoracique) sont ceux qui présentaient les intervalles et les écart-types les plus petits. Dans l'article, nous avons suggéré que ces paramètres étaient les plus importants puisqu'ils doivent demeurer dans un intervalle assez restreint afin d'assurer une posture équilibrée. La pertinence de ces paramètres avait également été soulevée par Berthonnaud et al.<sup>13</sup> dans leur étude chez les adultes sains. A posteriori par contre, tenter d'expliquer ou de prédire la posture globale par un ou plusieurs paramètres segmentaires semble futile. Ce concept peut paraître intéressant lorsqu'on analyse uniquement les sujets sains. Par contre, pour les patients atteints d'une pathologie rachidienne, l'orientation d'un segment spécifique peut être complètement altérée alors que le patient maintiendra une posture équilibrée. Dans le spondylolisthésis par exemple, les patients présentent une déformation locale à L5-S1 qui affecte directement l'inclinaison lombaire et qui requiert des ajustements des autres segments afin de conserver une posture équilibrée. La découverte d'un paramètre segmentaire unique expliquant globalement l'équilibre spino-pelvien serait donc surprenant. Au contraire, il faut s'attarder sur les relations entre les différents segments spino-pelviens comme nous l'avons fait dans le cinquième article et évaluer comment ces relations agissent sur l'équilibre spino-pelvien global (e.g. mesure de la position de C7 par rapport à S1 ou aux têtes fémorales). Ce dernier point n'a pas été pris en considération de façon optimale dans cet article (Chapitre 5) et représente la principale faiblesse de l'étude, ce qui a d'ailleurs été corrigé dans l'article suivant (Chapitre 6).

#### **7.4 Hypothèse et objectif 4**

Après avoir démontré que la posture chez les enfants et adolescents sains dépendait de l'interdépendance des segments adjacents thoraco-lombo-sacro-pelviens, nous avons évalué dans le Chapitre 6 si l'équilibre spino-pelvien global était différent entre les sujets sains et ceux atteints de spondylolisthesis (hypothèse 4). Un des points forts du sixième article est d'avoir divisé les sujets avec spondylolisthesis de haut-grade selon les deux types définis par Hresko et al.<sup>85</sup> En effet, ces derniers suggèrent dans leur article que l'équilibre spino-pelvien diffère entre les deux groupes mais ils n'ont rapporté que des paramètres segmentaires du rachis et du bassin, sans mesurer les corrélations entre les différents segments ou même l'équilibre sagittal global (e.g. position de C7 par rapport à S1 ou aux têtes fémorales).

Nous nous sommes donc inspirés du modèle postural préliminaire développé dans le Chapitre 5 afin de permettre une meilleure vue d'ensemble des corrélations entre les segments adjacents spino-pelviens. Par contre, pour tenir compte de la déformation locale lombosacrée présente dans le spondylolisthesis, nous avons dû apporter quelques modifications au modèle postural. Dans le modèle postural global présenté dans le sixième article (Chapitre 6), des paramètres locaux caractérisant le segment lombosacrée (pourcentage de glissement et orientation lombosacrée) ont été ajoutés. Ces deux paramètres ont été choisis puisqu'ils sont couramment utilisés afin d'évaluer la sévérité du spondylolisthesis. Pour déterminer l'orientation lombosacrée, nous avons opté pour l'angle entre le plateau inférieur de L5 et le plateau supérieur de S1 puisque la reproductibilité de la mesure a été démontrée comme étant excellente dans notre étude préalable (Chapitre 3) et parce que cette mesure est recommandée par le SDSG.<sup>158</sup> Pour modéliser la transition entre le bassin et le rachis lombaire, nous avons intercalé un nouveau paramètre, soit l'orientation du plateau inférieur de L5. La technique employée pour mesurer ce paramètre est similaire à celle employée pour mesurer la pente sacrée. Conceptuellement, la relation entre le plateau inférieur de L5 et le reste du rachis lombaire dans le spondylolisthesis est similaire à la relation entre la pente sacrée et le rachis lombaire chez les sujets normaux. Stratégiquement, ce

paramètre a été utile puisque sa corrélation avec la lordose lombaire et l'inclinaison lombaire était encore plus forte que la corrélation entre la pente sacrée et les paramètres lombaires chez les sujets normaux (Chapitre 5).

En plus d'introduire un modèle postural global du spondylolisthesis, le sixième article évalue également l'équilibre spino-pelvien global, ce qui était déficient dans l'article précédent. Deux conclusions majeures ressortent de cette analyse. Premièrement, autant pour les sujets sains que pour ceux avec un spondylolisthesis, les différents segments spino-pelviens interagissent entre eux dans le but ultime de maintenir un équilibre spino-pelvien global adéquat, tel que confirmé par la très faible variabilité de l'orientation de la ligne joignant les têtes fémorales au centre du corps vertébral de C7. Il apparaît donc crucial en clinique d'évaluer l'équilibre sagittal global en mesurant la position de C7 par rapport aux têtes fémorales, et non par rapport au sacrum comme le veut la pratique courante.<sup>65,104,158</sup> En effet, la mesure de la position de C7 par rapport au sacrum néglige l'apport primordial du segment sacro-pelvien dans le maintien d'un équilibre spino-pelvien global adéquat.

Deuxièmement, l'étude de l'équilibre spino-pelvien global sur les sujets avec spondylolisthesis a permis de démontrer que le segment sacro-pelvien réagit directement à l'altération de l'équilibre rachidien (mesuré entre C7 et S1) produit par la déformation locale à L5-S1, dans le but de maintenir un équilibre spino-pelvien global (mesuré entre C7 et les têtes fémorales) relativement constant. Ce mécanisme de compensation est frappant chez les sujets avec spondylolisthesis de haut-grade. En comparant spécifiquement les sujets avec un bassin équilibré et ceux avec un bassin rétroversé, on s'aperçoit que l'équilibre spino-pelvien global est similaire (varie de moins d'un degré en moyenne), alors que l'équilibre rachidien varie de façon significative par plus de 5°. Deux mécanismes potentiels expliquant ce phénomène de rétroversion du bassin sont proposés dans l'article. La "théorie biomécanique" implique que le déplacement antérieur du centre de gravité secondaire à la déformation locale lombosacrée est tel que le patient n'est plus en mesure de

compenser suffisamment (en diminuant la cyphose thoracique, en augmentant la lordose lombaire ou en recrutant plus de segments lordotiques) pour maintenir un équilibre rachidien négatif, comme c'est habituellement le cas chez les sujets normaux. Lorsque les mécanismes de compensation spécifiques au patient ont atteint leur limite, le bassin adopte alors une position rétroversé dans l'espoir d'obtenir un équilibre spino-pelvien global adéquat. Une "théorie neurologique" est également proposée dans laquelle la compression neurologique (sténose foraminale ou centrale) causée par la déformation locale lombosacrée provoque une rétroversion du bassin associée à une inclinaison antérieure du rachis dans le but d'ouvrir les foramens intervertébraux et le canal spinal, et ainsi minimiser la compression des racines nerveuses ou de la cauda equina.

La vérification des deux théories précédentes pourrait toutefois s'avérer très difficile. Pour vérifier la première théorie, on pourrait penser à vérifier sur des clichés en extension si effectivement les patients avec un bassin rétroversé ont atteint la limite de diminution de cyphose thoracique, d'augmentation de lordose lombaire ou recrutement de segments lordotiques. Pour vérifier la deuxième théorie, il faudrait idéalement évaluer le status neurologique chez les deux sous-groupes de sujets avec spondylolisthésis de haut-grade lors de mouvements faisant varier la version pelvienne et l'équilibre rachidien, et démontrer qu'une antéversion du bassin ou un déplacement postérieur de l'équilibre rachidien provoque ou accroît l'atteinte neurologique.

L'originalité du dernier article réside principalement dans la comparaison de l'équilibre spino-pelvien entre les sujets sains et ceux avec spondylolisthésis à l'aide du modèle postural global proposé. Tel que démontré dans les figures 4 et 5 du Chapitre 6, l'équilibre spino-pelvien est similaire entre les sujets sains et les sujets atteints de spondylolisthésis de bas-grade. La morphologie sacro-pelvienne (mesurée par l'incidence pelvienne) détermine l'orientation du bassin (mesurée par la pente sacrée et la version pelvienne). La pente sacrée est fortement reliée à l'orientation du



plateau inférieur de L5, qui elle-même est fortement corrélée à la géométrie lombaire (lordose et inclinaison lombaires). Pour les sujets avec spondylolisthésis de bas-grade, le pourcentage de glissement ainsi que la cyphose lombosacrée influencent également l'orientation du plateau inférieur de L5. La géométrie lombaire est reliée de façon modérée à la géométrie thoracique (cyphose et inclinaison thoracique). Au point de vue clinique, les résultats suggèrent que les sujets avec spondylolisthésis de bas-grade présentent une posture similaire à celle des sujets normaux permettant de compenser pour la déformation locale lombosacrée. Parallèlement, un traitement chirurgical par fusion in situ du spondylolisthésis pourrait être préféré puisque la posture est relativement normale au départ. C'est probablement pourquoi les études cliniques montrent que la fusion in situ reste le traitement de choix dans le spondylolisthésis de bas-grade. <sup>18,60,80,156,192,226</sup>

En ce qui concerne le spondylolisthésis de haut-grade, les résultats montrent que l'équilibre sagittal spino-pelvien est différent de celui des sujets normaux, suggérant une posture différente. Possiblement, les sujets avec spondylolisthésis utilisent des mécanismes posturaux normaux jusqu'à ce que ceux-ci soient dépassés, ce qui fait que la compensation pour la déformation locale lombosacrée n'est plus efficace. Dans ce cas, le concept d'interdépendance et de corrélations entre les différents segments adjacents spino-pelviens n'est plus valide. Alors que la déformation locale lombosacrée tend à déplacer le centre de gravité vers l'avant, la compensation se fait initialement via le rachis lombaire (augmentation de la lordose lombaire, recrutement de segments lordotiques, inclinaison lombaire plus postérieure) puisque c'est la portion la plus mobile du rachis. Lorsque ce mécanisme de compensation est dépassé, le bassin essaie de compenser pour éviter un déplacement antérieur du centre de gravité en augmentant la version pelvienne. Conformément à cela, la relation entre la version pelvienne et l'incidence pelvienne disparaît chez les sujets avec spondylolisthésis de haut-grade, de même que la relation entre la pente sacrée et la géométrie lombaire (Figure 6). Ces résultats démontrent le rôle critique du bassin dans l'équilibre sagittal global.

Le rôle prédominant du bassin dans la posture est encore mieux représenté par l'analyse séparée des sous-types de spondylolisthesis de haut-grade décrits par Hresko et al.<sup>85</sup> La présente étude démontre que les mécanismes de maintien de l'équilibre sagittal diffèrent entre les groupes avec bassin équilibré et avec bassin rétroversé. Les sujets avec un spondylolisthesis de haut-grade et un bassin équilibré présentent des caractéristiques posturales et un schéma de corrélations à peu près similaires à celles des sujets normaux puisque leur rachis lombaire est encore capable de compenser pour la déformation locale lombosacrée. Conséquemment, l'orientation du bassin reste dans les limites de la normale, ce qui est mis en évidence par la préservation de la relation entre l'incidence pelvienne et la version pelvienne, de même que la relation entre la pente sacrée et la géométrie lombaire.

Au contraire, les sujets avec spondylolisthesis de haut-grade ayant un bassin rétroversé présentent une posture complètement différente des sujets normaux. Dans ce cas, l'interdépendance et les corrélations entre les différents segments adjacents spino-pelviens disparaissent et le moyen ultime pour conserver un équilibre spino-pelvien global relativement normal est d'augmenter de façon importante la version pelvienne. Dans ces cas, il est logique de penser qu'une réduction du spondylolisthesis augmenterait les chances de parvenir à une posture adéquate en restaurant des corrélations significatives entre les segments adjacents spino-pelviens. Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait utiliser le modèle postural développé et l'appliquer sur des patients ayant subi une réduction chirurgicale de leur spondylolisthesis.

Afin de renforcer la portée des conclusions, il serait intéressant de compléter l'analyse avec plus de sujets avec spondylolisthesis de haut-grade, particulièrement dans le groupe avec bassin rétroversé. Il est possible que le nombre restreint de sujets dans ce groupe (n=25) soit en partie responsable de l'absence de corrélations significatives. Cependant, il est à noter que même avec un nombre encore plus limité de sujets

(n=15), nous avons observé plusieurs corrélations statistiquement significatives dans le groupe de sujets avec bassin équilibré. Par ailleurs, il serait aussi intéressant d'évaluer séparément les sujets avec spondylolisthesis de bas-grade et bassin rétroversé afin de savoir si ceux-ci présentent également une posture anormale.

## Conclusions et perspectives

Ce projet visait à étudier les liens entre la morphologie sacro-pelvienne et l'équilibre sagittal spino-pelvien dans le spondylolisthésis développemental de l'enfant, en vue de développer un modèle postural décrivant les relations entre les différents segments anatomiques spino-pelviens. Globalement, cette thèse a permis de documenter l'équilibre spino-pelvien autant chez les sujets normaux que chez ceux atteints de spondylolisthésis pour qu'ultimement, les stratégies de traitement puissent être adaptées afin d'obtenir une posture équilibrée. Concrètement, les cinq recommandations suivantes ressortent de cette thèse.

Premièrement, une technique de mesure assistée par ordinateur est recommandée pour évaluer les paramètres d'équilibre spino-pelvien à cause de la reproductibilité supérieure et de l'économie de temps qu'elle procure. Idéalement, une technique telle que celle utilisée dans ce projet devrait faire partie intégrante des systèmes de radiographies numériques utilisées en clinique. Pour l'utiliser de façon efficace, elle doit être basée sur l'identification de repères anatomiques permettant le calcul simultané de multiples indices à partir de la position des repères anatomiques identifiés.

Deuxièmement, une évaluation clinique adéquate de l'équilibre sagittal global doit se faire en fonction des têtes fémorales plutôt que de se limiter au sacrum afin de tenir compte de l'influence significative du bassin dans le maintien d'une posture globale équilibrée. Nous recommandons donc de mesurer l'orientation de la ligne joignant C7 aux têtes fémorales, paramètre qui présente une très faible variabilité, autant chez les sujets normaux que chez ceux atteints de spondylolisthésis.

Troisièmement, il est important en clinique d'évaluer spécifiquement l'équilibre sacro-pelvien (par la version pelvienne et la pente sacrée) dans le spondylolisthésis car il renseigne sur la capacité du patient à utiliser adéquatement ses mécanismes de

compensation afin d'obtenir une posture équilibrée minimisant les dépenses énergétiques. Contrairement à la mesure de l'équilibre spino-pelvien global, nous avons pu montrer que la mesure de l'équilibre sacro-pelvien permettait de déterminer si la posture était relativement normale ou non. En effet, la présence d'un bassin rétroversé (détecté selon la formule décrite par Hresko et al.<sup>85</sup>) doit être identifiée car elle est associée à un équilibre spino-pelvien anormal avec une perte de l'interdépendance entre les différents segments adjacents spino-pelviens.

Quatrièmement, cette étude suggère qu'il faut considérer fortement la réduction chirurgicale du spondylolisthesis de haut-grade dans les cas de bassin rétroversé afin de restaurer un équilibre spino-pelvien normal. Il faut donc viser chez les patients avec un bassin rétroversé l'obtention d'un bassin équilibré après la chirurgie afin de restaurer les corrélations entre les différents segments adjacents spino-pelviens. Il est encore impossible en ce moment de définir exactement le type et le degré de réduction chirurgicale à effectuer pour obtenir un bassin équilibré et une posture équilibrée. Dans les études subséquentes, nous tenterons de définir la technique optimale de réduction en fonction de la morphologie sacro-pelvienne et lombaire. Par ailleurs, les résultats de cette thèse suggèrent que la posture des sujets atteints d'un spondylolisthesis de bas-grade est similaire à celle des contrôles, suggérant qu'une fusion in situ est adéquate dans la plupart des cas.

Finalement, le modèle proposé pourrait s'avérer un outil important dans la comparaison des différents traitements dans les études futures, particulièrement dans le traitement du spondylolisthesis de haut-grade. En effet, le modèle pourrait être utilisé afin de déterminer quel traitement permet de mieux restaurer un équilibre spino-pelvien normal. Incidemment, nous avons proposé récemment une nouvelle classification du spondylolisthesis (Annexe) qui prend en considération l'équilibre sacro-pelvien.<sup>127</sup> Alors que ce concept était plutôt intuitif au départ, la présente étude montre que l'équilibre sacro-pelvien est intimement lié au maintien d'une posture équilibrée et qu'il doit être pris en considération dans le traitement du

spondylolisthesis. Ultimentement, nous espérons que l'utilisation du modèle et de la technique d'analyse développés dans cette thèse permettra d'améliorer la classification déjà proposée<sup>127</sup> et d'y associer un algorithme de traitement du spondylolisthesis lombosacré pédiatrique.

Dans le futur, trois éléments pourraient permettre d'implémenter le modèle postural existant afin qu'il soit utilisé en clinique. Premièrement, il devra être incorporé dans le système de radiographies numériques et donc directement accessible au clinicien. Ensuite, il faudra mieux déterminer la technique optimale pour mesurer les différents paramètres spino-pelviens. Les paramètres actuels ont été choisis à cause de leur excellente reproductibilité mais surtout parce qu'ils permettent de bien modéliser l'interdépendance entre les segments anatomiques adjacents spino-pelviens, conformément à une des hypothèses de l'étude. Or, certains paramètres tels que la cyphose lombosacrée, la lordose lombaire et la cyphose thoracique peuvent être mesurés de façon différente, et la présente étude ne permet pas de déterminer spécifiquement quelle technique de mesure est la plus pertinente cliniquement. Pour répondre à cette question, des études subséquentes devront être réalisées dans le but de déterminer les techniques de mesure qui sont les mieux corrélées avec la qualité de vie et la satisfaction des patients atteints de spondylolisthesis. Enfin, le modèle postural devrait également comprendre un volet "prédictif" permettant, à partir de la morphologie sacro-pelvienne et de l'équilibre spino-pelvien de chaque patient avant la chirurgie, de prédire le résultat chirurgical et ainsi guider le chirurgien dans sa planification chirurgicale.

Par ailleurs, il serait intéressant de répéter les analyses en utilisant la technique de Cobb non contrainte pour mesurer la cyphose thoracique et la lordose lombaire. En effet, elle tient compte de la variabilité dans le niveau de transition entre la cyphose thoracique et la lordose lombaire qui est fréquemment importante dans le spondylolisthesis. Il existe néanmoins une certaine réserve par rapport à l'utilisation de cette technique dans le modèle postural développé. En premier lieu, la technique

de Cobb non contrainte est plus complexe et moins répandue chez les cliniciens. De plus, l'interprétation d'une corrélation entre la cyphose thoracique et la lordose lombaire dans le contexte où la vertèbre transitionnelle est variable demeure totalement inconnue. Autrement dit, comment comparer des cas où la cyphose thoracique et la lordose lombaire sont similaires, mais qui présentent des niveaux de transition entre ces deux courbures qui sont complètement différents?

Enfin, certains nouveaux paramètres pourraient également être incorporés dans le modèle postural. En particulier, il serait intéressant d'évaluer la pertinence de la mesure du centre de gravité et l'influence d'un dôme sacré sur les autres paramètres d'équilibre spino-pelvien.

## Références

- 1 Albanese M, Pizzutillo PD. Family study of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1982;2:496-499
- 2 Amundson G, Edwards CC, Garfin SR. Spondylolisthesis, 3<sup>rd</sup> edition. In: Herkowitz HN, Garfin SR, Balderston RA, et al., eds. *The Spine*. Philadelphia, PA: W.B. Saunders Company; 1992:913-969
- 3 Amuso SJ, Neff RS, Coulson DB, et al. The surgical treatment of spondylolisthesis by posterior element resection. *J Bone Joint Surg Am* 1970;52:529-536
- 4 Ani N, Keppler L, Biscup RS, et al. Reduction of high-grade slips (grade III-V) with VSP instrumentation. Report of a series of 41 cases. *Spine* 1991;16(6S):S302-S310
- 5 Antoniadou SB, Hammerberg KW, Dewald RL. Sagittal plane configuration of the sacrum in spondylolisthesis. *Spine* 2000;25:1085-1091
- 6 Askar Z, Wardlaw D, Koti M. Scott wiring for direct repair of lumbar spondylolysis. *Spine* 2003;28:354-357
- 7 Baker D, McHollick W. Spondylolysis and spondylolisthesis in children. *J Bone Joint Surg Am* 1956;38:933-934
- 8 Barash HL, Galante JO, Lambert CN, et al. Spondylolisthesis and tight hamstrings. *J Bone Joint Surg Am* 1970;52:1319-1328
- 9 Basu PS, Hilali Noordeen MH, Elsebaie H. Spondylolisthesis in osteogenesis imperfecta due to pedicle elongation: report of two cases. *Spine* 2001;26:E506-E509
- 10 Bell DF, Ehrlich MG, Zaleske DJ. Brace treatment for symptomatic spondylolisthesis. *Clin Orthop* 1988;236:192-198
- 11 Bellah RD, Summerville DA, Treves ST, et al. Low-back pain in adolescent athletes: detection of stress injury to the pars interarticularis with SPECT. *Radiology* 1991;180:509-512



- 12 Bernhardt M, Bridwell KH. Segmental analysis of the sagittal plane alignment of the normal thoracic and lumbar spines and thoracolumbar junction. *Spine* 1989;14:717-721
- 13 Berthonnaud É, Dimnet J, Roussouly P, et al. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord Tech* 2005;18:40-47
- 14 Berthonnaud É, Labelle H, Roussouly P, et al. A variability study of computerized sagittal spinopelvic radiologic measurements of trunk balance. *J Spinal Disord Tech* 2005;18:66-71
- 15 Beutler WJ, Fredrickson BE, Murtland A, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. 45-year follow-up evaluation. *Spine* 2003;28:1027-1035
- 16 Blackburne JS, Velikas EP. Spondylolisthesis in children and adolescents. *J Bone Joint Surg Br* 1977;59:490-494
- 17 Bohlman HH, Cook SS. One-stage decompression and posterolateral and interbody fusion for lumbosacral spondyloptosis through a posterior approach. *J Bone Joint Surg Am* 1982;64:415-418
- 18 Boos N, Marchesi D, Aebi M. Treatment of spondylolysis and spondylolisthesis with Cotrel-Dubousset instrumentation: a preliminary report. *J Spinal Disord* 1991;4:472-479
- 19 Boos N, Marchesi D, Zuber K, et al. Treatment of severe spondylolisthesis by reduction and pedicular fixation. A 4-6 years follow-up study. *Spine* 1993;18:1655-1661
- 20 Borkow SE, Kleiger B. Spondylolisthesis in the newborn. A case report. *Clin Orthop* 1971;81:73-76
- 21 Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, et al. Anatomical reliability of two fundamental radiological and clinical pelvic parameters: incidence and thickness. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2005;15:197-204

- 22 Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, et al. Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *Eur Spine J* 2006;15:415-422
- 23 Boxall D, Bradford DS, Winter RB, et al. Management of severe spondylolisthesis in children and adolescents. *J Bone Joint Surg Am* 1979;61:479-495
- 24 Bradford DS, Iza J. Repair of the defect in spondylolysis or minimal degrees of spondylolisthesis by segmental wire fixation and bone grafting. *Spine* 1985;10:673-679
- 25 Bradford DS. Management of spondylolysis and spondylolisthesis. *Instruct Course Lect* 1983;32:151-162
- 26 Bradford DS. Spondylolysis and spondylolisthesis. *Curr Pract Orthop Surg* 1979;8:12-37
- 27 Bradford DS, Boachie-Adjei O. Treatment of severe spondylolisthesis by anterior and posterior reduction and stabilization. *J Bone Joint Surg Am* 1990;72:1060-1066
- 28 Buck JE. Direct repair of the defect in spondylolisthesis. Preliminary report. *J Bone Joint Surg Br* 1970;52:432-437
- 29 Burkus JK, Lonstein JE, Winter RB, Denis F. Long-term evaluation of adolescents treated operatively for spondylolisthesis. A comparison of in situ arthrodesis only with in situ arthrodesis and reduction followed by immobilization in a cast. *J Bone Joint Surg Am* 1992;74:693-704
- 30 Carman DL, Browne RH, Birch JG. Measurement of scoliosis and kyphosis radiographs. Intraobserver and interobserver variation. *J Bone Joint Surg Am* 1990;72:328-333
- 31 Cil A, Yazici M, Uzumcugil A, et al. The evolution of sagittal segmental alignment of the spine during childhood. *Spine* 2004;30:93-100
- 32 Cobb JR. Outline for the study of scoliosis. *The American Academy of Orthopaedic Surgeons. Instr Course Lect* 1948; 5:261-275.

- 33 Cohen J. Statistical power analysis for the behavioural sciences, 2<sup>e</sup> éd. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1988
- 34 Collier BD, Johnson RP, Carrera GF. Painful spondylolysis or spondylolisthesis studied by radiography and single-photon emission computed tomography. *Radiology* 1985;154:207-211
- 35 Cunningham BW, Lewis SJ, Long J, et al. (2002) Biomechanical evaluation of lumbosacral reconstruction techniques for spondylolisthesis. An in vitro porcine model. *Spine* 27:2321-2327
- 36 Curylo LJ, Edwards C, DeWald RW. Radiographic markers in spondyloptosis. Implications for spondylolisthesis progression. *Spine* 2002;27:2021-2025
- 37 Cyron BM, Hutton WC. Variations in the amount and distribution of cortical bone across the partes interarticularis of L5. A predisposing factor in spondylolysis? *Spine* 1979;4:163-167
- 38 Danielson B, Frennered K, Irstam L. Roentgenologic assessment of spondylolisthesis. I. A study of measurement variations. *Acta Radiol* 1988;29:345-351
- 39 Danielson B, Frennered K, Selvik G, et al. Roentgenologic assessment of spondylolisthesis. II. An evaluation of progression. *Acta Radiol* 1989;30:65-68
- 40 Deguchi M, Rapoff AJ, Zdeblick TA. Biomechanical comparison of spondylolysis fixation techniques. *Spine* 1999;24:328-333
- 41 de Jonge T, Dubousset J, Illés T. Sagittal plane correction in idiopathic scoliosis. *Spine* 2002;27:754-761
- 42 Descamps H, Commare-Nordmann MC, Marty C, et al. Modifications des angles pelviens, dont l'incidence, au cours de la croissance humaine. *Biom Hum Anthropol* 1999;17:59-63
- 43 DeWald RL, Faut MM, Taddonio RF, Neuwirth MG. Severe lumbosacral spondylolisthesis in adolescents and children: reduction and staged circumferential fusion. *J Bone Joint Surg Am* 1981;63:619-626

- 44 d'Hemecourt PA, Zurakowski D, Kriemler S, et al. Spondylolysis: returning the athlete to sports participation with brace treatment. *Orthopedics* 2002;25:653-657
- 45 Dick WT, Schnebel B. Severe spondylolisthesis: Reduction and internal fixation. *Clin Orthop* 1988;232:70-79
- 46 Dietrich M, Kurowski P. The importance of mechanical factors in the etiology of spondylolysis. A model analysis of loads and stresses in human lumbar spine. *Spine* 1985;10:532-542
- 47 Dubousset J. Treatment of spondylolysis and spondylolisthesis in children and adolescents. *Clin Orthop* 1997;337:77-85
- 48 During J, Goudfrooij H, Keessen W, et al. Towards standards for posture. Postural characteristics of the lower back system in normal and pathologic conditions. *Spine* 1985;10:83-87
- 49 Duval-Beaupère G, Schmidt C, Cosson P. A barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng* 1992;20:451-462
- 50 Edwards CC. High-grade spondylolisthesis: gradual instrumentation reduction. Presented at the Scoliosis Research Society CME Course, September 10, 2003
- 51 Eisenstein S. Spondylolysis: a skeletal investigation of two population groups. *J Bone Joint Surg Br* 1978;60:488-494
- 52 El Fegoun AB, Schwab F, Gamez L, et al. Center of gravity and radiographic posture analysis: a preliminary review of adult volunteers and adult patients affected by scoliosis. *Spine* 2005;30:1535-1540
- 53 Fabris DA, Costantini S, Nena U. Surgical treatment of severe L5-S1 spondylolisthesis in children and adolescents: results of intraoperative reduction, posterior interbody fusion, and segmental pedicle fixation. *Spine* 1996;21:728-733
- 54 Farfan HF, Osteria V, Lamy C. The mechanical etiology of spondylolysis and spondylolisthesis. *Clin Orthop* 1976;117:40-55

- 55 Ferguson RJ, McMaster JH, Stanitski CL. Low back pain in college football linemen. *J Sports Med* 1975;2:63-69
- 56 Fernand R, Fox DE. Evaluation of lumbar lordosis: A prospective and retrospective study. *Spine* 1985;10:799-803
- 57 Fidas A, MacDonald HL, Elton RA, et al. Prevalence and patterns of spina bifida occulta in 2707 normal adults. *Clin Radiol* 1987;38:537-542
- 58 Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1984;66:699-707
- 59 Freeman 3<sup>rd</sup> BL, Donati NL. Spinal arthrodesis for severe spondylolisthesis in children and adolescents. A long-term follow-up study. *J Bone Joint Surg Am* 1989;71:594-598
- 60 Frennered AK, Danielson BI, Nachemson AL. Natural history of symptomatic isthmic low-grade spondylolisthesis in children and adolescents: a seven-year follow-up study. *J Pediatr Orthop* 1991;11:209-213
- 61 Friberg S. Studies on spondylolisthesis. *Acta Chir Scand* 1939;82(Suppl):56
- 62 Gaines RW, Nichols WK. Treatment of spondyloptosis by two stage L5 vertebrectomy and reduction of L4 onto S1. *Spine* 1985;10:680-686
- 63 Gaines RW. L5 vertebrectomy for the surgical treatment of spondyloptosis. Thirty cases in 25 years. *Spine* 2005;30(6S):66-70
- 64 Geiger EV, Müller O, Niemeier T, et al. Adjustment of pelvispinal parameters preserves the constant gravity line position. *Int Orthop* 2007;31:253-258
- 65 Gelb DE, Lenke LG, Bridwell KH, et al. An analysis of sagittal spinal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. *Spine* 1995;20:1351-1358
- 66 Gill GG, Manning JG, White HL. Surgical treatment of spondylolisthesis without spine fusion. *J Bone Joint Surg Am* 1955;37:493-520
- 67 Gillet P, Petit M. Direct repair of spondylolysis without spondylolisthesis, using a rod-screw construct and bone grafting of the pars defect. *Spine* 1999;24:1252-1256

- 68 Grogan JP, Hemminghytt S, Williams AL, et al. Spondylolysis studied with computed tomography. *Radiology* 1982;145:737-742
- 69 Grzegorzewski A, Kumar SJ. In situ posterolateral spine arthrodesis for grades III, IV, and V spondylolisthesis in children and adolescents. *J Pediatr Orthop* 2000;20:506-511
- 70 Hammerberg EM, Wood KB. Sagittal profile of the elderly. *J Spinal Disord* 2003;16:44-50
- 71 Hammerberg KW. New concepts on the pathogenesis and classification of spondylolisthesis. *Spine* 2005;30(6S):S4-S11
- 72 Hanson DS, Bridwell KH, Rhee JM, et al. Dowel fibular strut grafts for high-grade dysplastic isthmic spondylolisthesis. *Spine* 2002;27:1982-1988
- 73 Hanson DS, Bridwell KH, Rhee JM, et al. Correlation of pelvic incidence with low- and high-grade isthmic spondylolisthesis. *Spine* 2002;27:2026-2029
- 74 Harms J. True spondylolisthesis reduction and monosegmental fusion in spondylolisthesis. Dans: Bridwell KH, DeWald RL (éds) *The Textbook of Spinal Surgery* 1997, 2<sup>e</sup> éd. Lippincott-Raven, Philadelphia, pp 1337-1347
- 75 Harris IE, Weinstein SL. Long-term follow-up of patients with grade-III and IV spondylolisthesis. Treatment with and without posterior fusion. *J Bone Joint Surg Am* 1987;69:960-969
- 76 Harrison DE, Cailliet R, Harrison DD, et al. Reliability of Centroid, Cobb, and Posterior Tangent methods: which to choose for analysis of thoracic kyphosis. *Spine* 2001;26:E227-E234
- 77 Harrison DE, Harrison DD, Caillet R, et al. Radiographic analysis of lumbar lordosis: Centroid, Cobb, TRALL, and Harrison posterior tangent methods. *Spine* 2001;26:E235-E242
- 78 Harrison DE, Tadeusz JJ, Harrison DD, et al. Can the kyphosis be modeled with a simple geometric shape? The results of circular and elliptical modeling in 80 asymptomatic patients. *J Spinal Disord* 2002;15:213-220
- 79 Haukipuro K, Keranen N, Koivisto E, et al. Familial occurrence of lumbar spondylolysis and spondylolisthesis. *Clin Genet* 1978;13:471-476

- 80 Helenius I, Lamberg T, Österman K, et al. Scoliosis Research Society outcome Instrument in evaluation of long-term surgical results in spondylolysis and low-grade spondylolisthesis in young patients. *Spine* 2005;30:336-341
- 81 Helenius I, Lamberg T, Österman K, et al. Posterolateral, anterior, or circumferential fusion in situ for high-grade spondylolisthesis in young patients: a long-term evaluation using the Scoliosis Research Society questionnaire. *Spine* 2006;31:190-196
- 82 Herbinaux G. *Traité sur divers accouchements laborieux et sur les polypes de la matrice*. Brussels, Belgium: JL DeBoubers, 1782
- 83 Herman MJ, Pizzutillo PD, Cavalier R. Spondylolysis and spondylolisthesis in the child and adolescent athlete. *Orthop Clin North Am* 2003;34:461-467
- 84 Herman MJ, Pizzutillo PD. Spondylolysis and spondylolisthesis in the child and adolescent. A new classification. *Clin Orthop* 2005;434:46-54
- 85 Hresko MT, Labelle H, Roussouly P, et al. Classification of high-grade spondylolisthesis based on pelvic version and spine balance: possible rationale for reduction. *Spine* 2007;32:2208-2213
- 86 Hu SS, Bradford DS. Spondylolysis and spondylolisthesis. In: Weinstein SL, ed. *The Pediatric Spine Principles and Practice*. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins;2001:433-451
- 87 Hu SS, Bradford DS, Transfeldt EE, et al. Reduction of high-grade spondylolisthesis using Edwards instrumentation. *Spine* 1996;21:367-371
- 88 Huang RP, Bohlman HH, Thompson GH, et al. Predictive value of pelvic incidence in progression of spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:2381-2385
- 89 Hutton WC, Stott JR, Cyron BM. Is spondylolysis a fatigue fracture? *Spine* 1977;2:202-209
- 90 Ikata T, Miyake R, Katoh S, et al. Pathogenesis of sports-related spondylolisthesis in adolescents. Radiographic and magnetic imaging study. *Am J Sports Med* 1996;24:94-98
- 91 Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K. Radiographic classification of L5 isthmic spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. *Spine* 2002;27:831-838

- 92 Jackson DW, Wiltse LL, Cirincoine RJ. Spondylolysis in the female gymnast. *Clin Orthop* 1976;117:68-73
- 93 Jackson RP, McManus AC. Radiographic analysis of sagittal plane alignment and balance in standing volunteers and patients with low back pain matched for age, sex and size. A prospective controlled clinical study. *Spine* 1994;14:1611-1618
- 94 Jackson RP, Perterson MD, McManus AC, et al. Compensatory spinopelvic balance over the hip axis and better reliability in measuring lordosis to the pelvic radius on standing lateral radiographs of adult volunteers and patients. *Spine* 1998;23:1750-1767
- 95 Jackson RP, Kanemura T, Kawakami N, et al. Lumbopelvic lordosis and pelvic balance on repeated standing lateral radiographs of adult volunteers and untreated patients with constant low back pain. *Spine* 2000;25:575-586
- 96 Jackson RP, Hales C. Congruent spinopelvic alignment on standing lateral radiographs of adult volunteers. *Spine* 2000;25:2808-2815
- 97 Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:151-160
- 98 Johnson GV, Thompson AG. The Scott wiring technique for direct repair of lumbar spondylolysis. *J Bone Joint Surg Br* 1992;74:426-430
- 99 Johnson JR, Kirwan EO. The long-term results of fusion in situ for severe spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Br* 1983;65:43-46
- 100 Kajiura K, Katoh S, Sairyō K, et al. Slippage mechanism of pediatric spondylolysis: biomechanical study using immature calf spines. *Spine* 2001;26:2208-2213
- 101 Kakiuchi M. Repair of the defect in spondylolysis. Durable fixation with pedicle screws and laminar hooks. *J Bone Joint Surg Am* 1997;79:818-825
- 102 Kettelkamp DB, Wright DG. Spondylolysis in the Alaskan Eskimo. *J Bone Joint Surg Am* 1971;53:563-566



- 103 Kim YJ, Bridwell KH, Lenke LG, et al. Pseudarthrosis in adult spinal deformity following multisegmental instrumentation and arthrodesis. *JBJS Am* 2006;88:721-728
- 104 Knight RQ, Jackson RP, Killian JT, et al. White paper on sagittal plan alignment. Scoliosis Research Society. [http://www.srs.org/professionals/resources/sagittal\\_plane\\_white\\_paper.pdf](http://www.srs.org/professionals/resources/sagittal_plane_white_paper.pdf)
- 105 Konz RJ, Goel VK, Grobler LJ, et al. The pathomechanism of spondylolytic spondylolisthesis in immature primate lumbar spines. *In vitro* and finite element assessments. *Spine* 2001;26:E38-E49
- 106 Korovessis P, Dimas A, Iliopoulos P, et al. Correlative analysis of lateral vertebral radiographic variables and medical outcomes study short-form health survey. *J Spinal Disord* 2002;15:384-390
- 107 Kuklo TR, Bridwell KH, Lewis SJ, et al. Minimum 2-year analysis of sacropelvic fixation and L5-S1 fusion using S1 and iliac screws. *Spine* 2001;26:1976-1983
- 108 Labelle H, Roussouly P, Chopin D, et al. The importance of spino-pelvic balance after spinal instrumentation for high grade developmental spondylolisthesis. Présenté à la 38<sup>e</sup> Réunion Annuelle de la Scoliosis Research Society, Québec, Canada, 11 au 13 septembre 2003
- 109 Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence, and spinopelvic balance. A correlation study. *Spine* 2004;29:2049-2954
- 110 Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, et al. The importance of spino-pelvic balance in L5-S1 developmental spondylolisthesis. A review of pertinent radiological measurements. *Spine* 2005 (6S):S27-S34
- 111 Labelle H, Hresko T, Roussouly P, et al. Low-grade spondylolisthesis: how pelvic tilt and sacral slope interact with spino-pelvic balance. Présenté à la Sixième Réunion Annuelle de la Société Canadienne du Rachis, Lac Louise, Canada, 22 au 25 mars 2006

- 112 Lafferty JF, Winter WG, Gambaro SA. Fatigue characteristics of posterior elements of vertebrae. *J Bone Joint Surg Am* 1997;58:154-158
- 113 Laurent LE. Spondylolithesis a study of 53 cases treated by spine fusion and 32 cases treated by laminectomy. *Acta Orthop Scand* 1958;27(Suppl 35):1-45
- 114 Laurent LE, Einola S. Spondylolisthesis in children and adolescents. *Acta Orthop Scand* 1961;31:45-64
- 115 Legayer J, Hecquet J, Marty C, et al. Équilibre sagittal du rachis. Relations entre bassin et courbures rachidiennes sagittales en position debout. *Rachis* 1993;5:215-226
- 116 Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, et al. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J* 1998;7:99-103
- 117 Lehmer SM, Steffee AD, Gaines RW Jr. Treatment of L5-S1 spondyloptosis by staged L5 resection with reduction and fusion of L4 into S1 (Gaines procedure). *Spine* 1994;19:1916-1925
- 118 Lenke LG, Bridwell KH. Evaluation and surgical treatment of high-grade isthmic dysplastic spondylolisthesis. *Instruct Course Lect* 2003;52:525-532
- 119 Lenke LG, Bridwell KH, Bullis D, et al. Results of in-situ fusion for isthmic spondylolisthesis. *J Spinal Disord* 1992;5:433-442
- 120 Letts M, Smallman T, Afanasiev R, et al. Fracture of the pars interarticularis in adolescent athletes: a clinical biomechanical analysis. *J Pediatr Orthop* 1986;6:40-46
- 121 Libson E, Bloom RA, Shapiro Y. Scoliosis in young men with spondylolysis or spondylolisthesis. A comparative study in symptomatic and asymptomatic subjects. *Spine* 1984;9:445-447
- 122 Lindholm TS, Ragni P, Ylikoski M, et al. Lumbar isthmic spondylolisthesis in children and adolescents. Radiologic evaluation and results of operative treatment. *Spine* 1990;15:1350-1355
- 123 Lonstein JE. Spondylolisthesis in children. Cause, natural history, and management. *Spine* 1999;24:2640-2648

- 124 Lowe J, Schachner E, Hirschberg E, et al. Significance of bone scintigraphy in symptomatic spondylolysis. *Spine* 1984;9:653-655
- 125 Lusins JO, Elting JJ, Cicoria AD, et al. SPECT evaluation of lumbar spondylolysis and spondylolisthesis. *Spine* 1994;19:608-612
- 126 Mac-Thiong J-M, Berthonnaud É, Dimar II JR, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine* 2004;29:1642-1647
- 127 Mac-Thiong J-M, Labelle H. A proposal for a surgical classification of pediatric lumbosacral spondylolisthesis based on current literature. *Eur Spine J* 2006;15:1425-1435
- 128 Mac-Thiong J-M, Labelle H, Berthonnaud É, et al. Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents. *Eur Spine J* 2007;16:227-234
- 129 Mac-Thiong J-M, Pinel-Giroux F-M, de Guise JA, et al. Comparison between constrained and non-constrained Cobb techniques for the assessment of thoracic kyphosis and lumbar lordosis. *Eur Spine J* 2007;sous presse
- 130 Mac-Thiong J-M, Labelle H, Parent S, et al. Assessment of sacral doming in lumbosacral spondylolisthesis. *Spine* 2007;sous presse
131. Mangione P, Sénégas J. Normal and pathologic sagittal balance of the spine and pelvis [in French]. *Rev Chir Orthop* 1997;83:22-32.
132. Mangione P, Gomez D, Senegas J. Study of the course of the incidence angle during growth. *Eur Spine J* 1997;6:163-167.
- 133 Marchetti PC, Bartolozzi P. Classification of spondylolisthesis as a guideline for treatment. In: Bridwell KH, DeWald RL, Hammerberg KW, et al., eds. *The Textbook of Spinal Surgery*, 2<sup>nd</sup> ed. Philadelphia, PA: Lippincott-Raven;1997:1211-1254
- 134 Mardjetko S, Albert T, Andersson G, et al. (2005) Spine/SRS spondylolisthesis summary statement. *Spine* 30:3S
- 135 Marty C, Boisaubert B, Descamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J* 2002;11:119-125

- 136 Mau H. Scoliosis and spondylolysis-spondylolisthesis. *Arch Orthop Trauma Surg* 1981;99:29-34
- 137 Maurice HD, Morley TR. Cauda equina lesions following in situ and decompressive laminectomy for severe spondylolisthesis: four case reports. *Spine* 1989;14:214-216
- 138 McCarroll JR, Miller JM, Ritter MA. Lumbar spondylolysis and spondylolisthesis in college football players. A prospective study. *Am J Sports Med* 1986;14:404-406
- 139 McPhee IB, O'Brien JP, McCall IW, et al. Progression of lumbosacral spondylolisthesis. *Australas Radiol* 1981;25:91-95
- 140 Merbs CF. Spondylolysis in Inuit skeletons from Arctic Canada. *Int J Osteoarchaeol* 2002;12:279-290
- 141 Meyerding HW. Spondylolisthesis. *Surg Gynecol Obstet* 1932;54:371-377
- 142 Mihara H, Onari K, Cheng BC. The biomechanical effects of spondylolysis and its treatment. *Spine* 2003;28:235-238
- 143 Miyake R, Ikata T, Katoh S, et al. Morphologic analysis of the facet joint in the immature lumbosacral spine with special reference to spondylolysis. *Spine* 1996;21:783-789
- 144 Molinari RW, Bridwell KH, Lenke LG, et al. Complications in the surgical treatment of pediatric high-grade, isthmic dysplastic spondylolisthesis. A comparison of three surgical approaches. *Spine* 1999;24:1701-1711
- 145 Molinari RW, Bridwell KH, Lenke LG, et al. (2002) Anterior column support in surgery for high-grade, isthmic spondylolisthesis. *Clin Orthop* 394:109-120
- 146 Möller H, Hedlund R. Instrumented and noninstrumented posterolateral fusion in adult spondylolisthesis. A prospective randomized study: part 2. *Spine* 2000;25:1716-1721
- 147 Montgomery DM, Fischgrund JS. Passive reduction of spondylolisthesis on the operating room table: a prospective study. *J Spinal Disord* 1994;7:167-172
- 148 Monticelli G, Ascani E. Spondylolysis and spondylolisthesis. *Acta Orthop Scand* 1975;46:498-506

- 149 Mouchet A, Roederer C. Le spondylolisthésis. *Presse Méd* 1931;39:569-574
- 150 Muschik M, Zippel H, Perka C. Surgical management of severe spondylolisthesis in children and adolescents: anterior fusion in situ versus anterior spondylodesis with posterior transpedicular instrumentation and reduction. *Spine* 1997;22:2036-2043
- 151 Naderi S, Manisali M, Acar F, et al. Factors affecting reduction in low-grade lumbosacral spondylolisthesis. *J Neurosurg* 2003;99 (Spine 2):151-156
- 152 Natarajan RN, Garretson III RB, Biyani A, et al. Effects of slip severity and loading directions on the stability of isthmic spondylolisthesis: a finite element model study. *Spine* 2003;28:1103-1112
- 153 Nathan H. Spondylolysis: its anatomy and mechanism of development
- 154 Nematbakhsh A, Crawford AH. Non-adjacent spondylolisthesis in Ehlers-Danlos syndrome. *J Pediatr Orthop B* 2004;13:336-339
- 155 Newman PH, Stone KH. The etiology of spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Br* 1963;45:39-59
- 156 Newton PO, Johnston II CE. Analysis and treatment of poor outcomes following in situ arthrodesis in adolescent spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1997;17:754-761
- 157 O'Brien MF. Low-grade isthmic/lytic spondylolisthesis in adults. *Instruct Course Lect* 2003;52:511-524
- 158 O'Brien MF, Kuklo TR, Blanke KM, et al. Spinal Deformity Study Group. Radiographic measurement manual. Medtronic Sofamor Danek 2004
- 159 O'Neil DB, Micheli LJ. Postoperative radiographic evidence for fatigue fracture as the etiology in spondylolysis. *Spine* 1989;14:1342-1255
- 160 Osterman K, Lindholm TS, Laurent LE. Late results of removal of the loose posterior (Gill's operation) in the treatment of lytic lumbar spondylolisthesis. *Clin Orthop* 1976;117:121-128
- 161 Pedersen AK, Hagen R. Spondylolysis and spondylolisthesis. Treatment by internal fixation and bone-grafting of the defect. *J Bone Joint Surg Am* 1988;70:15-24

- 162 Pennell RG, Maurer AH, Bonakdarpour A. Stress injuries of the pars interarticularis: radiologic classification and indications for scintigraphy. *AJR Am J Roentgenol* 1985;145:763-766
- 163 Petraco DM, Spivak JM, Cappadona JG, et al. An anatomic evaluation of L5 nerve stretch in spondylolisthesis reduction. *Spine* 1996;21:1133-1139
- 164 Phalen GS, Dickson JA. Spondylolisthesis and tight hamstrings. *J Bone Joint Surg Am* 1961;43:505-512
- 165 Pinel-Giroux F-M, Mac-Thiong J-M, de Guise JA, et al. Computerized assessment of sagittal curvatures of the spine. Comparison between Cobb and tangent circles techniques. *J Spinal Disord Tech* 2006;19:507-512
- 166 Pizzutillo PD, Hummer 3<sup>rd</sup> CD. Nonoperative treatment for painful adolescent spondylolysis or spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1989;9:538-540
- 167 Pneumaticos SG, Esses SI. Scoliosis associated with lumbar spondylolisthesis: a case presentation and review of the literature. *Spine J* 2003;3:321-324
- 168 Polly DW Jr, Kilkelly FX, McHale KA, et al. Measurement of lumbar lordosis: evaluation of intraobserver, interobserver, and technique variability. *Spine* 1996;21:1530-1535
- 169 Potter BK, Rosner MK, Lehman Jr RA, et al. Reliability of end, neutral and stable vertebra identification in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 2005;30:1658-1663
- 170 Poussa M, Schlenzka D, Seitsalo S, et al. Surgical treatment of severe isthmic spondylolisthesis in adolescents. Reduction or fusion in situ. *Spine* 1993;18:894-901
- 171 Poussa M, Remes V, Lamberg T, et al. Treatment of severe spondylolisthesis in adolescence with reduction or fusion in situ: long-term clinical, radiologic, and functional outcome. *Spine* 2006;31:583-590
- 172 Rajnics P, Pomero V, Templier A, et al. Computer-assisted assessment of spinal sagittal plane radiographs. *J Spinal Disord* 2001;14:135-142

- 173 Rajnics P, Templier A, Skalli W, et al. The association of sagittal spinal and pelvic parameters in asymptomatic persons and patients with isthmic spondylolisthesis. *J Spinal Disord* 2002;15:24-30
- 174 Rask MR. Spondylolisthesis resulting from osteogenesis imperfecta: report of a case. *Clin Orthop* 1979;139:164-166
- 175 Rillardon L, Levassor N, Guigui P, et al. Validation d'un outil de mesure des paramètres pelviens et rachidiens de l'équilibre sagittal du rachis. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 2003;89:218-227
- 176 Robin H, Damsin JP, Filipe G, et al. Déformations rachidiennes de la maladie de Marfan. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1992;78:464-469
- 177 Roca J, Iborra M, Cavanilles-Walker JM, et al. Direct repair of spondylolysis using a new pedicle screw hook fixation. *J Spinal Disord* 2005;18(Suppl 1):S82-S89
- 178 Rosenberg NJ, Bargar WL, Friedman B. The incidence of spondylolysis and spondylolisthesis in nonambulatory patients. *Spine* 1981;6:35-37
- 179 Roussouly P, Transfeldt E, Berthonnaud É, et al. Changes in spinal and pelvic sagittal parameters after high grade isthmic spondylolisthesis. *Eur Spine J* 2001;10(suppl 1):19
- 180 Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud É, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis in the presence of L5-S1 isthmic lysis and low-grade spondylolisthesis. *Spine* 2006;31:2484-2490
- 181 Roussouly P, Gollogly S, Nosedá O, et al. The vertical projection of the sum of the ground reactive forces of a standing patient is not the same as the C7 plumb line. A radiographic study of the sagittal alignment of 153 asymptomatic volunteers. *Spine* 2006;31:E320-E325
- 182 Rowe GG, Roche MB. The etiology of separate neural arch. *J Bone Joint Surg Am* 1953;35:102-109
- 183 Ruf M, Koch H, Melcher RP, et al. Anatomic reduction and monosegmental fusion in high-grade developmental spondylolisthesis. *Spine* 2006;31:269-274

- 184 Sagi HC, Jarvis JG, Uthoff HK. Histomorphologic analysis of the development of the pars interarticularis and its association with isthmic spondylolysis. *Spine* 1998;23:1635-1639
- 185 Sailhan F, Gollogly S, Roussouly P. The radiographic results and neurologic complications of instrumented reduction and fusion of high-grade spondylolisthesis without decompression of the neural elements: a retrospective review of 44 patients. *Spine* 2006;31:161-169
- 186 Sakamaki T, Sairyo K, Katoh S, et al. The pathogenesis of slippage and deformity in the pediatric lumbar spine: a radiographic and histologic study using a new rat *in vivo* model. *Spine* 2002;28:645-650
- 187 Sairyo K, Katoh S, Sakamaki T, et al. Vertebral forward slippage in immature lumbar spine occurs following epiphyseal separation and its occurrence is unrelated to disc degeneration. Is the pediatric spondylolisthesis a physis stress fracture of vertebral body? *Spine* 2004;29:524-527
- 188 Sairyo K, Katoh S, Ikata T, et al. Development of spondylolytic olisthesis in adolescents. *Spine J* 2001;1:171-175
- 189 Saraste H. Long-term clinical and radiological follow-up of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1987;7:631-638
- 190 Saraste H, Brostrom LA, Aparisi T. Prognostic radiographic aspects of spondylolisthesis. *Acta Radiol Diagn* 1984;25:427-432
- 191 Scaglietti O, Frontino G, Bartolozzi P. Technique of anatomical reduction of lumbar spondylolisthesis and its surgical stabilization. *Clin Orthop* 1976;117:164-175
- 192 Schlenzka D, Remes V, Helenius I, et al. Direct repair for treatment of symptomatic spondylolysis and low-grade isthmic spondylolisthesis in young patients: no benefit in comparison to segmental fusion after a mean follow-up of 14.8 years. *Eur Spine J* 2006;15:1437-1447
- 193 Schoenecker PL, Cole HO, Herring JA, et al. Cauda equina syndrome after in situ arthrodesis for severe spondylolisthesis at the lumbosacral junction. *J Bone Joint Surg Am* 1990;72:369-377



- 194 Seitsalo S, Osterman K, Hyvarinen H, et al. Progression of spondylolisthesis in children and adolescents. A long-term follow-up of 272 patients. *Spine* 1991;16:417-421
- 195 Seitsalo S, Osterman K, Poussa M, et al. Spondylolisthesis in children under 12 years of age: long-term results of 56 patients treated conservatively or operatively. *J Pediatr Orthop* 1988;8:516-521
- 196 Seitsalo S. Operative and conservative treatment of moderate spondylolisthesis in young patients. *J Bone Joint Surg Br* 1990;72:908-913
- 197 Shipley JA, Beukes CA. The nature of the spondylolytic defect. Demonstration of a communicating synovial pseudarthrosis in the pars interarticularis. *J Bone Joint Surg Br* 1998;80:662-664
- 198 Shrout PE, Fleiss JL. Intraclass correlation: uses in assessing rater reliability. *Psychol Bull* 1979;86:420-428
- 199 Shufflebarger HL, Geck MJ. High grade isthmic dysplastic spondylolisthesis. Monosegmental surgical treatment. *Spine* 2005;30(6S):42-48
- 200 Simper LB. Spondylolysis in Eskimo skeletons. *Acta Orthop Scand* 1986;57:78-80
- 201 Singer KP, Jones TJ, Bredahl PD. A comparison of radiographic and computer-assisted measurements of thoracic and thoracolumbar sagittal curvature. *Skeletal Radiol* 1990;19:21-26
- 202 Smith JA, Deviren V, Berven S, et al. Clinical outcome of trans-sacral interbody fusion after partial reduction for high-grade L5-S1 spondylolisthesis. *Spine* 2001;26:2227-2234
- 203 Smith MD, Bohlman HH. Spondylolisthesis treated by a single stage operation combining decompression with in situ posterolateral and anterior fusion. An analysis of eleven patients who had long-term follow-up. *J Bone Joint Surg Am* 1990;72:415-421
- 204 Sponseller PD, Hobbs W, Riley 3<sup>rd</sup> LH, et al. The thoracolumbar spine in Marfan syndrome. *J Bone Joint Surg Am* 1995;77:867-876

- 205 Stagnara P, De Mauroy JC, Dran G, et al. Reciprocal angulation of vertebral bodies in the sagittal plane: approach to references for the evolution of kyphosis and lordosis. *Spine* 1982;7:335-342
- 206 Standaert CJ. Spondylolysis in the adolescent athlete. *Clin J Sport Med* 2002;12:119-122
- 207 Stanton RP, Meehan P, Lovell WW. Surgical fusion in childhood spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1985;5:411-415
- 208 Steiner ME, Micheli LJ. Treatment of symptomatic spondylolysis and spondylolisthesis with the modifier Boston brace. *Spine* 1985;10:937-943
- 209 Stewart T. The age incidence of neural arch defects in Alaskan natives, considered from the standpoint of etiology. *J Bone Joint Surg Am* 1953;35:937-959
- 210 Stokes IAF, Bigalow LC, Moreland MS. Three-dimensional spinal curvature in idiopathic scoliosis. *J Orthop Res* 1987;5:102-113
- 211 Sys J, Michielsen J, Bracke P, et al. Nonoperative treatment of active spondylolysis in elite athletes with normal X-ray findings: literature review and results of conservative treatment. *Eur Spine J* 2001;10:498-504
- 212 Taillard WF. Le spondylolisthésis chez l'enfant et l'adolescent. Étude de 50 cas. *Acta Orthop Scand* 1954;24:115-144
- 213 Taillard WF. Etiology of spondylolisthesis. *Clin Orthop* 1976;117:30-39
- 214 Takahashi K, Yamagata M, Takayanagi K, et al. Changes in the sacrum in severe spondylolisthesis: a possible key pathology of the disorder. *J Sci Orthop* 2000;5:18-24
- 215 Taylor LJ. Severe spondylolisthesis and scoliosis in association with Marfan's syndrome. Case report and review of the literature. *Clin Orthop* 1987;221:207-211
- 216 Timon SJ, Gardner MJ, Wanich T, et al. Not all spondylolisthesis grading instruments are reliable. *Clin Orthop* 2005;434:157-162









- 217 Tiusanen H, Schlenzka D, Seitsalo S, et al. Results of a trial of anterior or circumferential lumbar fusion in the treatment of severe isthmic spondylolisthesis in young patients. *J Pediatr Orthop B* 1996;5:190-194
- 218 Tonino A, van der Werf G. Direct repair of lumbar spondylolysis: 10-year follow-up of 12 previously reported cases. *Acta Orthop Scand* 1994;65:91-93
- 219 Tower SS, Pratt WB. Spondylolysis and associated spondylolisthesis in Eskimo and Athabaskan populations. *Clin Orthop* 1990;250:171-175
- 220 Transfeldt EE, Dendrinos GK, Bradford DS. Paresis of proximal lumbar roots after reduction of L5-S1 spondylolisthesis. *Spine* 1989;14:884-887
- 221 Turner RH, Bianco A Jr. Spondylolysis and spondylolisthesis in children and teen-agers. *J Bone Joint Surg Am* 1971;53:1298-1306
- 222 Vallois HV, Lozarthes G. Indices lombaires et indice lombaire total. *Bull Soc Anthropol* 1942;3:117
- 223 van der Oever M, Merrick MV, Scott JH. Bone scintigraphy in symptomatic spondylolysis. *J Bone Joint Surg Br* 1987;69:453-456
- 224 Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J* 2002;11:80-87
- 225 Vedantam R, Lenke LG, Keeney JA, et al. Comparison of standing sagittal spinal alignment in asymptomatic adolescents and adults. *Spine* 1998;23:211-215
- 226 Velikas EP, Blackburne JS. Surgical treatment of spondylolisthesis in children and adolescents. *J Bone Joint Surg Br* 1981;63:67-70
- 227 Vialle R, Levassor N, Rillardon L, et al. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. *J Bone Joint Surg Am* 2005;87:260-267
- 228 Vialle R, Schmit P, Dauzac C, et al. Radiological assessment of lumbosacral dystrophic changes in high-grade spondylolisthesis. *Skeletal Radiol* 2005;34:528-535

- 229 Vialle R, Ilharreborde B, Dauzac C, et al. Intra and inter-observer reliability of determining degree of pelvic incidence in high-grade spondylolisthesis using a computer assisted method. *Eur Spine J* 2006;15:1449-1453
- 230 Vialle R, Ilharreborde B, Dauzac C, et al. Is there a sagittal imbalance of the spine in isthmic spondylolisthesis? A correlation study. *Eur Spine J* 2007;sous presse
- 231 Voutsinas SA, MacEwen GD. Sagittal Profiles of the Spine. *Clin Orthop* 1986;210:235-242
- 232 Wang Z, Parent S, Mac-Thiong J-M, et al. Influence of sacropelvic morphology in developmental spondylolisthesis. *Soumis à Spine*
- 233 Whitesides Jr TE, Horton WC, Hutton WC, et al. Spondylotic spondylolisthesis. A study of pelvic and lumbosacral parameters of possible etiologic effect in two genetically and geographically distinct groups with high occurrence. *Spine* 2005;30(6S):S12-S21
- 234 Wiltse LL, Newman PH, Macnab I. Classification of spondylolysis and spondylolisthesis. *Clin Orthop* 1976;117:23-29
- 235 Wiltse LL. Spondylolisthesis in children. *Clin Orthop* 1961;21:156-163
- 236 Wiltse LL, Rothman LG. Spondylolisthesis: classification, diagnosis, and natural history. *Semin Spine Surg* 1993;5:264-280
- 237 Wiltse LL. The etiology of spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1962;44:539-560
- 238 Wiltse LL, Widell E Jr, Jackson DW. Fatigue fracture: the basic lesion in isthmic spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1975;57:17-22
- 239 Wiltse LL, Jackson DW. Treatment of spondylolisthesis and spondylolysis in children. *Clin Orthop* 1976;117:92-100
- 240 Winter RB. Severe spondylolisthesis in Marfan's syndrome: report of two cases. *J Pediatr Orthop* 1982;2:51-55
- 241 Wright JG, Bell D. Lumbosacral joint angles in children. *J Pediatr Orthop* 1991;11:748-751

- 242 Wu SS, Lee CH, Chen PQ. Operative repair of symptomatic spondylolysis following a positive response to diagnostic pars injection. *J Spinal Disord* 1999;12:10-16
- 243 Wynne-Davies R, Scott JH. Inheritance and spondylolisthesis: a radiologic family survey. *J Bone Joint Surg Br* 1979;61:301-305
- 244 Yue W-M, Brodner W, Gaines RW. Abnormal spinal anatomy in 27 cases of surgically corrected spondyloptosis. Proximal sacral endplate damage as a possible cause of spondyloptosis. *Spine* 2005;30(6S):S22-S26

# Annexe

## Classification du spondylolisthésis

Grade	Pelvic balance	Dysplasia	Example
Low-grade	Nutcracker type	Low-dysplastic	 Type 1
		High-dysplastic	 Type 2
	Shear type	Low-dysplastic	 Type 3
		High-dysplastic	 Type 4
High-grade	Balanced pelvis	Low-dysplastic	 Type 5
		High-dysplastic	 Type 6
	Unbalanced pelvis	Low-dysplastic	 Type 7
		High-dysplastic	 Type 8

Classification de Maigne et al. (1984)