

b

Université de Montréal

**Influence de la morphologie sacro-pelvienne
dans l'évolution du spondylolisthesis
L5-S1 développemental**

par
Zhi Wang

Département de Chirurgie
Faculté de Médecine

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

Avril 2010

© Zhi Wang 2010

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :
Influence de la morphologie sacro-pelvienne
dans l'évolution du spondylolisthesis
L5-S1 développemental

présenté par :
Zhi Wang

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Alain Jodoin / Marc Isler	Président-rapporteur
Stefan Parent	Directeur de recherche
Yvan Petit	Co-Directeurs de recherche
Jean Ouellet / Patrick Lavigne	Membres du jury

Mémoire accepté le : le 1^{er} février, 2011

Sommaire

La spondylolyse et le spondylolisthesis sont une déformité bien connue dans le domaine de l'orthopédie. Par contre, il persiste des confusions et des débats sur différents aspects de cette pathologie incluant l'étiologie, l'histoire naturelle et le traitement. Récemment, deux études ont démontré l'influence significative de la morphologie du sacrum dans le spondylolisthesis par Inoue et al. et Whitesides et al.^{4,5} Ces trouvailles ont renouvelé l'intérêt dans l'évaluation radiologique de la balance sagittale de cette condition.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'influence de la forme et l'orientation du sacrum chez les patients atteints de spondylolisthesis. Pour ce faire, nous avons construit une base de données de patients présentant un spondylolisthesis et d'un groupe contrôle. Par la suite les radiographies de ces sujets ont été analysées par un programme d'ordinateur afin de calculer tous les paramètres pertinents.

Ce travail nous a tout d'abord permis de déterminer à partir des radiographies de 120 volontaires pédiatriques et plus de 130 patients pédiatriques atteints de la spondylolisthesis, les valeurs moyennes et la variation des paramètres angulaires qui influencent l'équilibre sagittal du rachis. Cette base de données est la première existante dans la population pédiatrique. Ces données seront d'une grande utilité pour le futur lors d'études concernant diverses conditions spinales. Nous avons remarqué une différence significative de la morphologie sacrée chez les sujets présentant le spondylolisthesis. Par ailleurs, l'étude de corrélation nous a également permis d'établir une forte relation entre le sacrum, le bassin et la colonne dans le profil sagittal. Finalement, ce travail a permis une meilleure compréhension globale de la posture sagittale chez les sujets normaux et chez les sujets atteints du spondylolisthesis qui pourra servir pour mieux analyser cette condition et pour ajuster les traitements selon l'analyse.

Mots Clés

Spondylolyse

Spondylolisthesis

Morphologie sagittale

Incidence pelvienne

sacrum

Summary

Developmental spondylolysis and spondylolisthesis is a well known and described sagittal spinal deformity in the literature. However, there is still an ongoing debate on different aspects about this pathology including its etiology, pathophysiology, natural evolution and preferred treatment. Numerous parameters and radiologic measures have been described in order to precisely quantify the abnormal relationship between L5 and S1. So far none of these parameters have been proven reliable to predict the evolution in the spinal deformity. Recently, two interesting studies showed that sacral morphology has a significant influence on spondylolisthesis.^{4,5} These findings have a direct implication to the evaluation and treatment of spondylolisthesis. This also renews our scientific interest in the sagittal morphology in this condition.

The principal objective of this work is to evaluate the influence of the sacral form and orientation in patients with spondylolisthesis. First of all, we constructed a large database of all patients with spondylolisthesis with a comparable control group. After the radiographs are analyzed by computer to calculate all possible sagittal parameters described in the current literature.

This project has first of all allowed us to establish an ongoing database of all patients with spondylolysis and spondylolisthesis. So far this database is the largest in the literature and consists of more than 120 subjects. This database allows us to analyze retrospectively and prospectively on the influence of sacropelvic sagittal morphology in subjects with spondylolisthesis.

Key words:

Spondylolysis

Spondylolisthesis

Pelvic incidence

Sacral morphology

Sagittal balance

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 - REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1.1 DESCRIPTION DE LA SPONDYLOLYSE ET DU SPONDYLOLISTHESIS	3
1.2 ÉVALUATION DES DEFORMATIONS SAGITTALES	5
1.2.1 <i>Classification</i>	5
1.2.2 <i>Histoire naturelle</i>	8
1.2.3 <i>Histoire et examen physique</i>	9
1.2.4 <i>Examen radiologique</i>	12
1.2.5 <i>Examens para-cliniques</i>	14
1.2.5.1 SPECT	14
1.2.5.2 CT scan.....	16
1.2.5.3 Résonance magnétique (IRM)	16
1.3 PARAMETRES RADIOLOGIQUES SUR L'EQUILIBRE SAGITTALE.....	17
1.4 TRAITEMENT CONSERVATEUR DU SPONDYLOLISTHESIS	19
1.5 TRAITEMENT CHIRURGICAL DU SPONDYLOLISTHESIS	22
CHAPITRE 2 - OBJECTIFS ET HYPOTHESES	23
2.1 RESUME DE LA PROBLEMATIQUE.....	23
2.2 OBJECTIF GLOBAL	24
2.3 HYPOTHESES	25
2.5 PRESENTATION DES ARTICLES	26
CHAPITRE 3 - ARTICLE 1 : A VARIABILITY STUDY OF COMPUTERIZED SAGITTAL SACRAL MEASURES.....	27
CHAPITRE 4 - ARTICLE 2 : INFLUENCE OF SACRAL MORPHOLOGY IN DEVELOPMENTAL SPONDYLOLISTHESIS	46
CHAPITRE 5 - ARTICLE 3 : THE INFLUENCE OF SACRAL AND SACROPELVIC MORPHOLOGY IN DEVELOPMENTAL LUMBOSACRAL SPONDYLOLISTHESIS: ARE THEY EQUALLY IMPORTANT?.....	79
CHAPITRE 6 - DISCUSSION	87
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	98
REFERENCES.....	93

Liste des tableaux

Tableau I – Système de classification pour la spondylolyse et le spondylolisthesis.	6
--	---

Liste des figures

Figure 1 – La classification de Meyerding.	7
Figure 2 – Présentation clinique du spondylolisthésis	11
Figure 3 – Angle de glissement (slip angle)	12
Figure 4 – SPECT d'un patient souffrant du spondylolisthésis.....	15
Figure 5 – CT coupe axiale d'un spondylolisthésis.....	18
Figure 6 – La morphologie pelvienne.....	18
Figure 7 – La relation entre la morphologie et l'orientation pelvienne.....	19
Figure 8 – La morphologie du sacrum.....	20
Figure 9 – La morphologie segmentaire du sacrum.....	91

Liste des sigles et abréviations

2D : deux dimensions ou bidimensionnel

3D : trois dimensions ou tridimensionnel

AC : courant alternatif

AP : antéro-postérieur

CT scan : tomographie axiale assistée par ordinateur

DC : courant continu

DTT : dispositifs de traction transversale

FRÉOM : fondation de recherche en orthopédie à l'Université de Montréal

IRM : imagerie à résonance magnétique

LAT : latéral

PA : postéro-antérieur

PI : incidence pelvienne (ang : pelvic incidence)

PT: version pelvienne (ang: pelvic tilt)

SIA : scoliose idiopathique adolescente

SPECT: Single photon emission computed tomography

SRS : Scoliosis Research Society

SS: pente sacrée (ang: sacral slope)

STA: angle table sacrée (ang: sacral table angle)

STI: index table sacrée (ang: sacral table index)

S1A : angle S1 supérieur

S2A : angle S2 inférieur

SK : la cyphose sacrée

Remerciements

Premièrement, je voudrais remercier mes co-directeurs de recherche, les Drs Hubert Labelle, Stefan Parent et Yvan Petit pour m'avoir attribué ce sujet original et pour la confiance qu'ils m'ont témoignée tout au long de cette maîtrise. Ils ont contribué de façon inestimable à ma formation scientifique et ont suscité mon intérêt envers la recherche.

J'aimerais souligner le support et les conseils reçus de mon collègue de travail, Jean-Marc Mac-Thiong. Je tiens également à remercier le personnel du centre de recherche de l'hôpital Sainte-Justine. J'aimerais en particulier remercier Dominic Branchaud pour le soutien technique et informatique dans l'utilisation du logiciel IdeFx.

Ce travail de recherche a été financé par le la Fondation de l'hôpital Sainte-Justine, le programme de MENTOR et la Fondation de recherche en orthopédie de l'Université de Montréal (FREOM).

Finalement, j'aimerais sincèrement remercier ma douce moitié, Lina, pour la compréhension, le support et la patience dont elle m'a fait preuve durant ce long cheminement.

Introduction

La spondylolyse est un terme utilisé pour décrire un défaut de continuité au niveau de l'isthme interarticulaire d'une vertèbre sans déplacement du corps vertébral. Le spondylolisthésis a été définie par Taillard⁶ comme 'le glissement en avant d'un corps vertébral, ses pédicules et ses apophyses transverses par la rupture de la continuité ou l'élongation de l'isthme intervertébral'. La spondylolyse et le spondylolisthésis peuvent coexister ou se développer de façon indépendante. Ils peuvent théoriquement apparaître à un ou plusieurs niveaux vertébraux mais l'atteinte de la 5^e vertèbre lombaire est de loin la plus fréquente.

La spondylolyse et le spondylolisthésis sont une des causes de lombalgie chez les enfants et les adolescents. La posture debout et la marche semblent être des facteurs contribuant au développement de ces conditions. Ces lésions ne s'observent pas chez les sujets non marchants⁷ à l'exception des patients athétosiques. La spondylolyse est rarement rapportée dans la littérature chez les nourrissons, mais à l'âge de 6 ans, l'incidence est à 5% ce qui se rapproche de l'incidence chez les adultes.^{7,8} L'hypothèse est que les lésions apparaissent après l'acquisition de la marche et que le profil sagittal sur le point vue biomécanique jouent un rôle essentiel dans ce processus.^{1,3,6} À l'hôpital Sainte-Justine, de 100 à 150 nouveaux cas de la spondylolyse et du spondylolisthésis sont référés à la clinique externe pour évaluation, traitement et suivi. La majorité de ces enfants sont asymptomatiques. Par contre, la lésion peut parfois évoluer vers un déplacement progressif associé aux lombalgies aiguës et chroniques et même jusqu'à la présence d'atteinte neurologique. Malgré le fait que la spondylolyse et le spondylolisthésis aient été décrits il y a plus de deux siècles, les controverses persistent toujours sur les multiples aspects de cette condition. Suite à de nombreuses études biomécaniques, anatomiques, et radiologiques, la majorité des experts sont d'accords que l'étiologie est probablement multifactorielle.^{8,12}

Nombreux paramètres et mesures radiologiques ont été décrits afin de quantifier cette relation anormale entre le L5 et S1. Malheureusement, aucun de ces paramètres n'a été validé pour prédire l'évolution de la maladie. Récemment, Inoue et al. et Whitesides et al.^{4,5} ont démontré que la morphologie du sacrum a une association significative dans le spondylolisthésis. Ces trouvailles ont une implication importante dans l'évaluation et le traitement du spondylolisthésis

et ont renouvelé l'intérêt dans l'évaluation radiologique de la balance sagittale de cette condition. L'objectif principal de ce projet consiste donc à analyser l'importance de la morphologie du sacrum et la relation de celle-ci dans le profil sagittal chez un enfant ou un adolescent avec le spondylolisthésis au niveau L5-S1.

Ce mémoire de maîtrise contient six chapitres. Le premier comprend une revue de la littérature sur la spondylolyse et le spondylolisthésis, 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 premier article (Chapitre 3) étudie la fiabilité des mesures radiologiques assistées par ordinateur de la morphologie sacrée chez les sujets atteints de spondylolisthésis. Ceci permet de valider de façon scientifique les paramètres afin de les utiliser dans les études à venir. Le second article (Chapitre 4) évalue l'influence de la morphologie sacrée sur l'évolution du spondylolisthésis au niveau L5-S1 chez les enfants et les adolescents. Le troisième (Chapitre 5) porte sur la relation entre la morphologie pelvienne et sacrée afin de mieux comprendre la balance sagittale dans cette condition. Le traitement médical et chirurgical dépend d'une meilleure compréhension des mécanismes physiopathogéniques. Finalement, une discussion de l'ensemble des résultats et la conclusion se trouvent au chapitre 6.

- Revue de la littérature

Description de la spondylolyse et du spondylolisthésis

La spondylolyse est une perte de continuité de l'isthme articulaire (pars interarticularis), situé entre les deux apophyses articulaires supérieure et inférieure de l'arc vertébral postérieur. Elle survient le plus souvent au niveau d'un étage vertébral lombaire bas, habituellement le dernier étage mobile. Elle peut être unilatérale ou bilatérale, induisant alors une micro mobilité ou une mobilité de l'arc postérieur. Elle peut être aiguë, traumatique⁷⁴, correspondant à un trait de fracture vrai, ou chronique, sans notion de vrai traumatisme. La perte de continuité s'organise alors sous la forme d'un tissu fibreux⁷⁵ ou plus rarement pseudo kystique⁷⁶ plus ou moins hypertrophique dit "nodule de Gill", qui peut être agressant pour les racines nerveuses au contact. La lyse peut survenir dans l'enfance, mais aussi à l'âge adulte⁷⁷. La plupart des enfants ou adolescents ne sont pas symptomatiques de leur condition et leur diagnostic est souvent trouvé de façon fortuite.

Le spondylolisthésis est un déplacement permanent du corps vertébral en avant sur le corps vertébral sous jacent, constituant un antélisthésis. Il est deux à trois fois moins fréquent que la spondylolyse isthmique^{18,20,26}. Dans sa forme dite isthmique, il survient à la faveur d'une spondylolyse vraie, ou d'un allongement "dysplasique" de l'isthme sans perte de continuité qui est peut-être le résultat de lésions traumatiques consolidées.

La spondylolyse et le spondylolisthésis sont des anomalies axiales qui sèment la controverse et la polémique depuis plus de deux siècles après leur description initiale. L'une des principales controverses est l'étiologie de cette particularité clinique. Il existe une certaine hérédité dans la survenue des lésions, mais le nombre de cas rapportés provenant d'une même famille est négligeable. L'incidence de la spondylolyse est variable d'une ethnie à l'autre. Le taux de 20-60% chez les Inuits d'Amérique du Nord est régulièrement cité.^{8,18,19,20} Il se retrouve un taux de 5.6%

chez les sujets de race blanche, 1.9% chez les sujets de race noire et jusqu'à 60% dans la communauté Inuit.¹⁴ Un traumatisme important à haute énergie ne provoque pas de spondylolyse isolée. Ceci est toujours accompagné d'autres fractures associées. En revanche, les activités qui sollicitent le rachis en extension et compression sont régulièrement décrites comme génératrices d'un fort taux de spondylolyse.^{16,17} L'incidence de spondylolyse est rapportée aussi élevée que 47% chez les athlètes élités qui participent aux sports à risque comme le plongeon et la gymnastique. Le point en commun avec ces sports à haut risque est la sollicitation exagérée et répétée de l'extension de la colonne. Il existe également des facteurs dysplasiques qui peuvent prédisposer l'apparition du spondylolisthésis. L'élément le plus fréquemment retrouvé est l'existence d'un spina bifida occulta associé à la dystrophie de l'arc postérieur. L'hypertrophie des articulations inférieures de L4 est également un facteur régulièrement mentionné. Elle exercerait des traumatismes répétés sur l'isthme de L5 provoquant un effet de 'coupe-cigare'.^{14,18,20} L'équilibre sagittal du rachis a fait l'objet de travaux importants au cours de la dernière décennie. La plupart de ces auteurs considèrent que l'équilibre sagittal du rachis est déterminé à partir de l'orientation du bassin et que cette relation est perturbée dans le spondylolisthésis.^{2,3,10} Un grand nombre de paramètres a été décrit visant à établir des corrélations entre les facteurs locaux architecturaux et l'équilibre sagittal global. Ceci sera discuté en détail dans la section des paramètres radiologiques de l'équilibre sagittal.

Après de nombreuses années de discussions, les chercheurs sont venus en accord sur un point: l'erreur est d'essayer de trouver une seule cause à la spondylolyse et au spondylolisthésis. L'origine de la spondylolyse est manifestement multifactorielle.

Évaluation des déformations sagittales

Une évaluation clinique (section 1.1.1) peut comprendre une inspection visuelle et une série de mesures spécifiques. Généralement, un examen radiographique (section 1.1.4) accompagne l'examen clinique. Diverses techniques d'investigation paraclinique (section 1.1.5) ont aussi été développées afin d'évaluer le spondylolisthésis mais ne sont pas utilisées de façon courante en clinique.

1.1.1 Classification

La classification de Wiltse-Newman (Tableau 1) est la classification la plus utilisée et acceptée pour le spondylolisthésis. Les types dysplasique et isthmique sont les deux types qui existent chez les enfants et les adolescents. Pour le type I, la dysplasie est référée aux anomalies congénitales à l'articulation lombosacrée incluant les facettes mal-orientées et hypoplasiques ou les déficiences sacrées. Les pars qui sont immatures permettent une élongation graduelle ou une séparation éventuelle de L5 sur S1 avec les forces compressives répétitives. Le type I représente environ 14 à 21% des spondylolisthésis dans les séries publiées.²¹ Le type II, ou isthmique, est défini comme un défaut dans les pars interarticulaires. Ce groupe est sous-divisé en trois : le type IIa est le plus commun, il serait le résultat d'une fracture de stress au niveau des pars par les forces répétitives ; la pathophysiologie proposée de type IIb est caractérisé par une élongation qui est le résultat de petites microfractures consolidées. Il est parfois difficile d'essayer de distinguer entre le type IIa et le type IIb ; Le type IIc est relié à une fracture de l'isthme suivant un trauma à haute énergie. Wiltse a écrit dans son article que les défauts isthmiques sont le résultat de forces compressives chroniques exercées sur les pars articulaires chez des individus qui ont une prédisposition génétique.²²

Marchetti et Bartolozzi (Tableau 1) a proposé une classification plus simplifiée avec deux larges catégories : développementale et acquise.⁹ La catégorie développementale regroupe le type dysplasique et isthmique de la classification Wiltse, donc s'applique davantage à la population pédiatrique. La catégorie acquise

est définie comme un échec des pars interarticulaires secondaire aux forces répétitives appliquées ou aux blessures directes ou indirectes portées sur ces pars. Malgré le fait que la classification de Marchetti et Bartolozzi s'applique davantage à la population pédiatrique, l'acceptation n'est pas encore universelle en raison des termes qui ne sont pas clairement définies. Un exemple est le degré de dysplasie qui est seulement caractérisé par la description et varie d'un individu à l'autre. Notre institution avec le groupe SRS (Scoliosis Research Society) recommande l'usage de cette classification parce qu'il souligne la pathogenèse de différents types de spondylolisthésis. Alors ceci peut avoir potentiellement plus d'impact sur l'histoire naturelle, le risque de progression et le type de traitement.

Tableau 1 – Systèmes de classification pour la spondylolyse et le spondylolisthésis

Systèmes de classification pour le spondylolisthésis	
Wiltse-Newman	Marchetti-Bartolozzi
<p>I. <u>Dysplasique</u></p> <p>II. <u>Isthmique</u></p> <p>a. Disruption des pars secondaire au fracture de stress</p> <p>b. Élongation des pars</p> <p>c. Fracture aiguë à travers des pars</p> <p>III. <u>Dégénérative</u></p> <p>IV. <u>Traumatique</u></p> <p>V. <u>Pathologique</u></p>	<p><u>Developpementale</u></p> <p>Dysplasie haute Avec lyse Avec élongation</p> <p>Dysplasie basse Avec lyse Avec élongation</p> <p><u>Acquise</u></p> <p>Traumatique Fracture aiguë Fracture de stress</p> <p>Post chirurgicale</p> <p>Pathologique</p> <p>Dégénérative</p>

Meyerding²⁶ a proposé en 1932 une classification établie en fonction du déplacement basé sur une radiographie latérale en position debout (Fig 1). Elle est modifiée plus tard pour inclure les cinq grades.

Figure 1 La classification radiologique de Meyerding

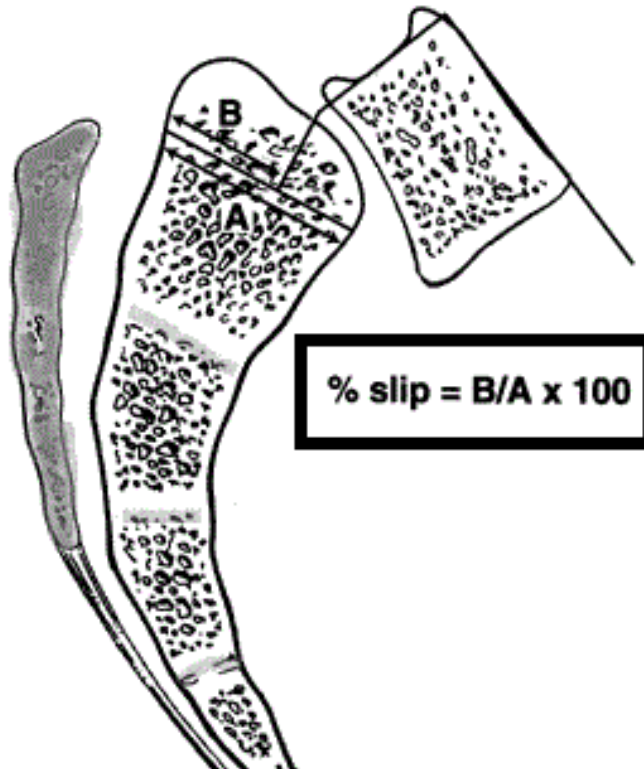


Figure 1. La classification Meyerding est utilisée pour quantifier le degré de spondylolisthésis. Grade I est 0-25% de glissement, Grade II est de 26-50% de glissement, Grade III est de 51-75%, Grade IV est de 76-100% et le Grade V est plus que 100% de glissement. A = la largeur du plateau supérieure de S1, B = distance entre le rebord postérieur du plateau inférieur du L5 et le rebord postérieur du plateau supérieur

1.1.2 Histoire naturelle

La littérature a très bien documenté les réactions de stress au niveau des éléments postérieurs chez les athlètes élités surtout à la gymnastique et au plongeon.¹⁷ Cette réaction osseuse est due au stress répétitif en extension avec ou sans rotation exercée surtout au niveau jonction L5-S1. Ayant une immobilisation, un corset ou un repos strict, il arrive que cette lésion puisse guérir avec une consolidation osseuse surtout si le défaut est unilatéral. Si non-traitée ou si le patient continue ses entraînements, la guérison est moins prévisible et le défaut au niveau des pars peut apparaître. Pour certaines raisons qui demeurent inconnues, un certain pourcentage des patients avec la spondylolyse (défaut de la continuité des pars) progresse vers un déplacement en avant de L5 sur le sacrum. Lorsque cette progression est sévère, la sténose lombaire peut se développer et provoquer une radiculopathie L5 et une dysfonction sphinctérienne en raison de la compression sur les racines sacrées.

Comme la classification de Marchetti et Bartolozzi est récente, la plupart des études longitudinales utilise la classification de Wiltse. Malgré ceci, peu d'études font la distinction entre le type dysplasique et le type isthmique et la plupart sont des études rétrospectives. McPhee et al²³ a rapporté une plus grande fréquence de progression avec le type dysplasique (32%) comparé avec le type isthmique (4%). Également, le type dysplasique requiert plus fréquemment une chirurgie de stabilisation.^{24,25}

Le type isthmique est le type le plus commun chez les enfants et les adolescents, il a une incidence de 4.4% à l'âge de six ans et augmente à 6% à l'âge de 18 ans dans la population générale.⁷ La plupart des sujets avec la spondylolyse ou le spondylolisthésis sont asymptomatiques et ne souffrent pas de cette condition. Il est fort probable que la spondylolyse apparaisse avant le glissement vertébral (le spondylolisthésis), c'est pourquoi les patients avec la spondylolyse et le spondylolisthésis sont souvent considérés ensemble. Une majorité des patients démontre un certain pourcentage de glissement au moment du diagnostic, mais seulement 4% des enfants et adolescents démontrent une progression de glissement à travers la période de croissance.²³ Les enfants qui sont diagnostiqués avant le pic de

croissance et se présentent avec plus de 50% de glissement ont une plus grande tendance à progresser.²¹ Harris et Weinstein²⁷ ont publié en 1987 une étude à long terme sur les patients avec un glissement de Meyerding de plus que 51% et ont démontré que 36% des patients traités de façon non-chirurgicale sont asymptomatique, 55% ont parfois des lombalgies, et 45% ont des symptômes neurologiques. Avec un suivi moyen de 18 ans, tous les patients ont une vie active et ont eu besoin de simples ajustements dans leurs activités quotidiennes.

1.1.3 Histoire et examen physique

L'élément le plus étonnant de la spondylolyse et du spondylolisthésis est certainement leur caractère asymptomatique et tolérable dans la majorité des cas. Il n'en reste pas moins important de déterminer les origines possibles des douleurs. Les indications thérapeutiques découlent en grande partie de cette analyse.

Lombalgie aigue ou subaiguë

L'enfant ou l'adolescent se présente typiquement avec une lombalgie d'effort survenant lors de la pratique sportive ou lors d'efforts prolongés. La blessure aigue est possible, mais un début insidieux est plus commun. Il est important dès ce moment de questionner le patient sur le type d'activités sportives pratiquées. Sur le plan histologique, cette lyse est constituée d'une pseudoarthrose riche en fibroblastes associés à des nodules ostéocartilagineux de Gill et des neurofilaments riches en substance P.^{14, 20, 22}

Radiculopathie L5

Il s'agit de la compression de la racine L5 dans le foramen intervertébral L5-S1. Elle concerne les spondylolisthésis associés à une spondylolyse. La compression peut être liée à une compression par le processus inflammatoire ou simplement par le glissement antérieur du corps vertébral.

La radiculalgie S1 avec le syndrome de la queue de cheval

Ces symptômes de dysfonction sphinctérienne signifient une compression des racines sacrées dans la pince formée par le bord supérieur du sacrum et la lame de L5. C'est donc l'apanage des formes très déplacées et surtout sur des vertèbres dysplasiques avec isthme intact. Un examen neurologique porté sur le plan de la motricité, de la sensibilité, des réflexes tendineux et abdominaux et le tonus anal est toujours indiqué.

Contracture des ischiojambiers

La démarche devra être observée chez le patient habillé seulement avec un pantalon court pour mieux observer les membres inférieurs. Une diminution de la longueur des pas avec une flexion au niveau des hanches et genoux peuvent être observées chez les patients avec un grade avancé de spondylolisthésis (Figure 2).

Troubles statiques du rachis sus-jacents

Ils s'expriment dans deux plans de l'espace :

Le plan coronal: une scoliose est fréquemment observée dite scoliose olisthésique. Il s'agit d'une courbure lombaire dont la vertèbre limite inférieure est L5. Ces formes sont l'apanage des formes à sacrum vertical.

Le plan sagittal : une hyperlordose thoracolombaire (un grand dos creux) et un aplatissement de la cyphose thoracique de type compensatoire peuvent être observés.^{28,29} Le sacrum peut apparaître de façon verticale et une déformité visible de type l'escalier peut être facilement palpable. Les mouvements de flexion et d'extension peuvent être limités et l'hyperextension provoque souvent de la douleur.

Figure 2 Présentation clinique du spondylolisthésis

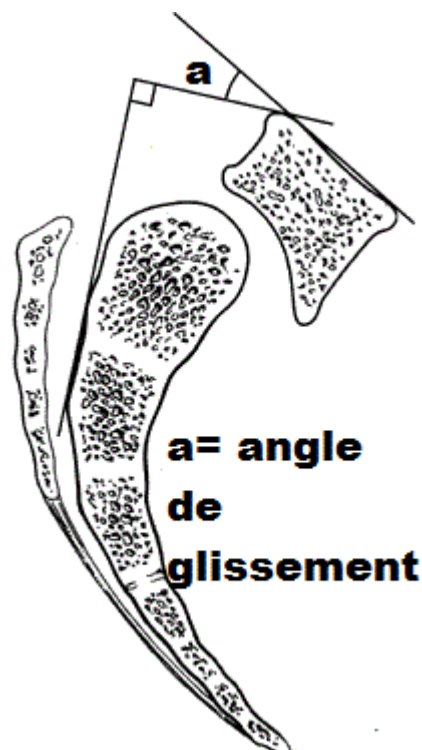


Figure 2. Une fille de 9 ans avec un grade IV de L5-S1 spondylolisthésis développemental. Notez la flexion au niveau des genoux et des hanches. .

1.1.4 Examen radiologique

Une radiographie standard avec la vue postérieur-antérieure (PA) et une radiographie en latéral en position debout centré sur la jonction lombosacrée sont les plus utiles pour l'évaluation initiale d'un patient qui se présente pour lombalgie avec suspicion de spondylolisthésis. La vue en PA est nécessaire pour éliminer si une difformité scoliotique co-existe. Une radiographie en vue oblique ou un « spot » sur la jonction lombosacrée peut identifier le défaut des pars ou une réaction périostéale envers le stress répétitif. L'angle de glissement (Slip Angle) peut être calculé à partir d'une radiographie latérale qui quantifie le degré de cyphose lombosacrée (Figure 3). Un angle de glissement de plus de 50° est associé avec une augmentation de risque de progression de glissement, d'instabilité et de développement de pseudoarthrose post-opératoire. Parfois les radiographies simples ne permettent pas de détecter les anomalies dans la jonction lombosacrée, alors nous devons avoir recours aux autres modalités pour poser le diagnostic.

Figure 3. Angle de glissement (slip angle)



1.1.5 Examens para-cliniques

D'autres techniques non invasives sont parfois utilisées dans le but de compléter l'évaluation clinique et radiologique, ou de réduire les risques de cancers inhérents à la prise de radiographies pour le spondylolisthésis.³⁰⁻³¹

1.1.5.1 Single photon emission computed tomography (SPECT)

Le SPECT est la méthode la plus efficace pour détecter le spondylolisthésis si les rayons x simples sont normaux malgré l'examen physique et que l'histoire suggèrent ce diagnostic.^{33,34} Une augmentation de trace radionucléée même dans des pars intacts signifie une réaction au stress (Figure 4). Cette modalité peut être utilisée pour le suivi des patients avec le spondylolisthésis symptomatique. Une diminution relative à l'examen précédent a démontré une corrélation avec les symptômes et les signes cliniques du patient.¹¹

Figure 4. SPECT d'un patient souffrant du spondylolisthésis

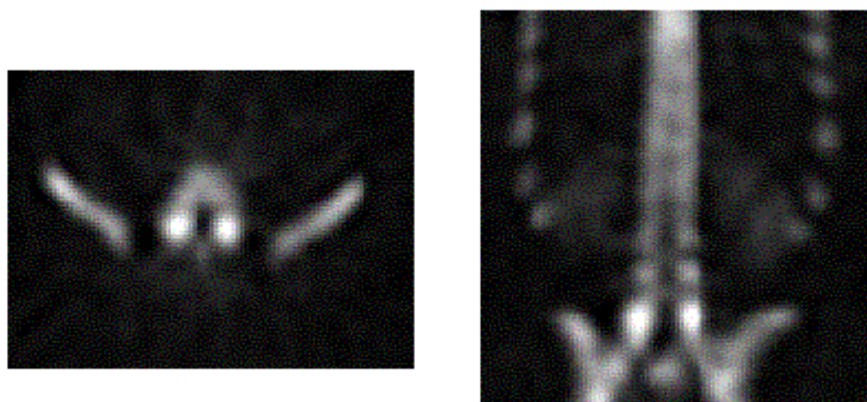
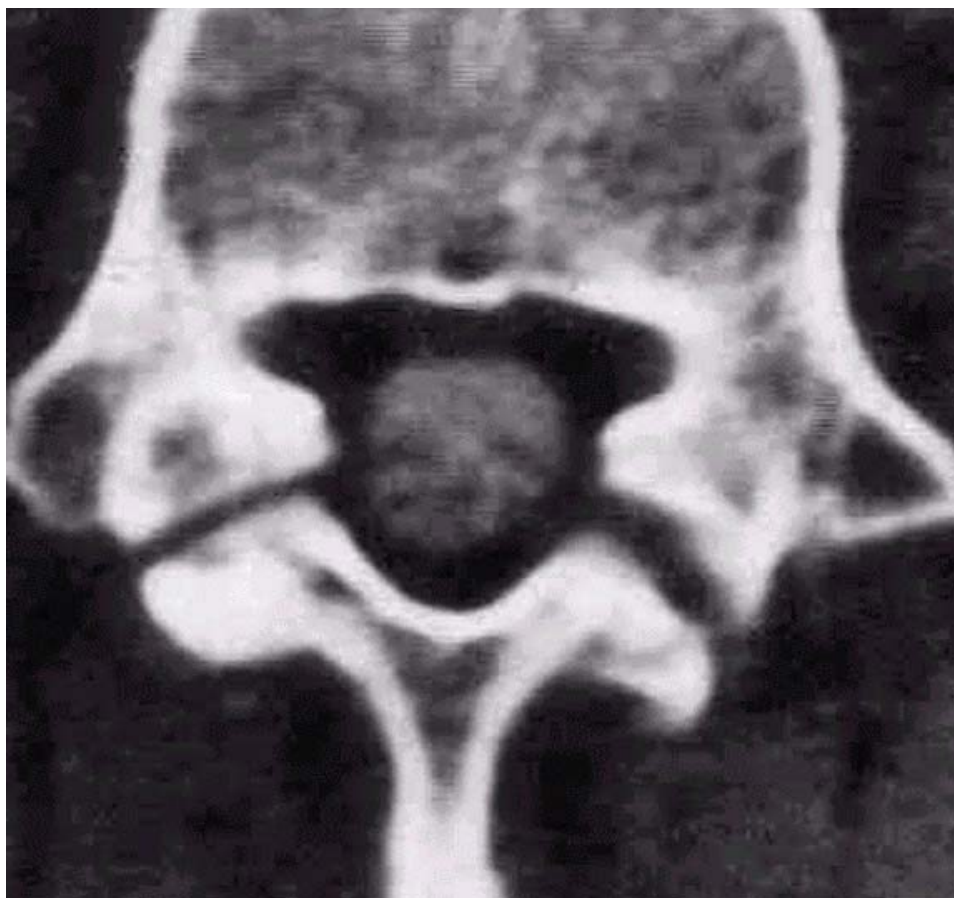


Figure 4. Un SPECT d'un patient qui souffre de façon symptomatique de la spondylolyse L5-S1. L'examen démontre une augmentation de captation d'isotopes sur la jonction L5-S1 qui confirme le diagnostic.

1.1.5.2 Tomodensitométrie (TDM ou CT-scan)

Les coupes fines de CT-scan sont la meilleure modalité pour mieux définir l'anomalie osseuse dans le spondylolisthésis. L'imagerie peut différencier un défaut cortical, une réaction périostée, une sclérose et même documenter la guérison des pars avec les CT-scans sériés (Figure 5). Le CT-scan est aussi utile pour identifier le nidus dans l'ostéome ostéoïde qui est aussi une autre cause fréquente de lombalgie associée avec une augmentation de captation au SPECT.

Figure 5 CT-scan en coupe axiale du spondylolisthésis



1.1.5.3 Imagerie par résonance magnétique (IRM)

L'IRM est indiquée lorsque le patient se présente avec des symptômes et des signes neurologiques associés au spondylolisthesis. L'examen est nécessaire pour éliminer les autres sources de compressions médullaires, par exemple une néoplasie, une infection ou une anomalie discale. Il est également suggéré de faire une IRM dans le cas d'un spondylolisthesis avancé (Grade III-IV) pour planifier la chirurgie.

Paramètres radiologiques sur l'équilibre sagittal

Dans le plan sagittal, la posture d'un être humain dans la position debout peut être vue comme une série de sections qui s'articulent ensemble: la tête est balancée sur le tronc par la colonne cervicale, le tronc s'articule avec le bassin qui s'articule avec les membres inférieurs par les hanches. Ceci permet de maintenir une posture stable et de dépenser le moins d'énergie possible. La prise en considération des paramètres de l'équilibre sagittal du rachis tient actuellement une place importante dans l'analyse et le traitement de nombreuses pathologies rachidiennes.^{35,36,37} Cette relation semble être perturbée dans la spondylolyse et le spondylolisthésis.

L'importance que la morphologie pelvienne exerce sur le spondylolisthésis a été précisée récemment dans plusieurs articles. Différents paramètres ont été utilisés pour décrire la morphologie pelvienne basée sur une radiographie latérale en position debout. During et al³⁵ ont défini l'angle sacropelvien (PSA-pelvic sacral angle), Jackson et al³⁶ ont suggéré l'angle rayon-pelvien (PRA pelvic radius angle) et finalement Duval-Beaupère et al¹ ont introduit l'incidence pelvienne (PI-pelvic incidence) qui est l'angle complémentaire du PSA (Figure 6). Ces angles sont similaires et représentent tous une bonne méthode pour analyser la morphologie pelvienne. Jackson et al³⁹ ont même trouvé une fiabilité inter et intra-observateur similaires à toutes ces mesures. Selon la préférence des différents auteurs, la PI a été utilisée dans la majorité des recherches publiées pour étudier la morphologie pelvienne. La PI demeure relativement constante dans l'enfance et augmente de façon significative dans la période de l'adolescence et atteint un maximum à l'âge d'adulte.^{40,41}

Figure 6. La morphologie pelvienne

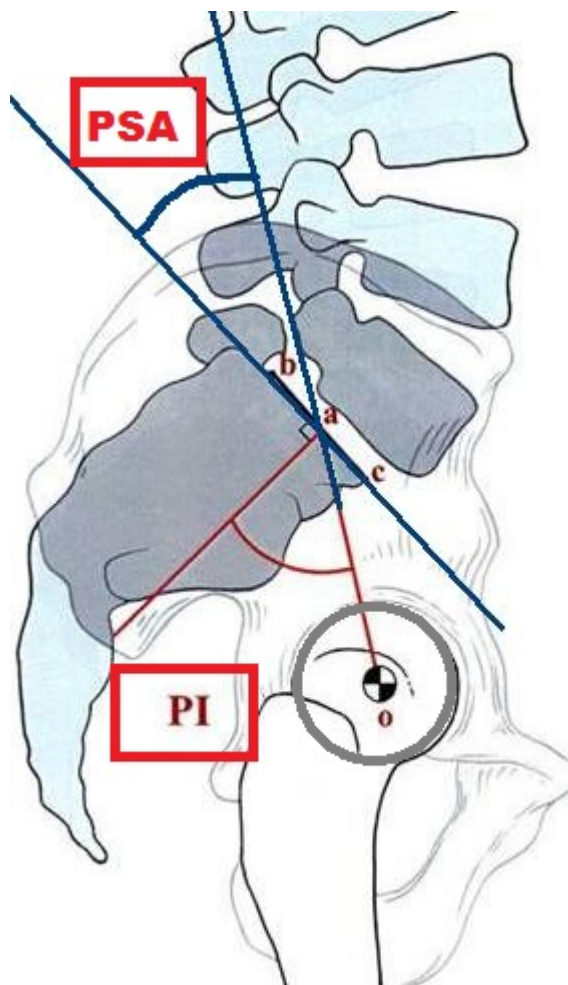


Figure 6. La PI est définie par l'angle mesuré entre la ligne oa, qui est dessinée à partir du centre des deux têtes fémorales au point milieu du plateau sacré supérieur et une ligne perpendiculaire au plateau sacré. Le PSA est l'angle complémentaire du PI.

La PI est un paramètre fondamental anatomique du bassin qui est spécifique et constant pour chaque individu. Il est important de différencier un paramètre anatomique (morphologie) avec un paramètre positionnel qui décrit l'orientation du

segment. Une mesure anatomique de la morphologie n'est pas affectée par le changement de la posture du sujet et demeure la même que le sujet soit en position debout, couchée ou assise avec l'articulation sacro-iliaque immobile. Par ailleurs, la version pelvienne (PT-pelvic tilt) et la pente sacrée (SS-sacral slope) sont des variables positionnelles parce qu'elles sont mesurées en référence à une ligne verticale et horizontale pour caractériser l'orientation spatiale du bassin. Il est déterminé par une équation mathématique que le PI est la somme de PT et SS (Figure 7). En raison de cette relation mathématique, la morphologie pelvienne qui est quantifiée par la PI est un déterminant essentiel de l'orientation spatiale du bassin dans la position debout : plus la PI est grande, plus la SS et la PT sont grandes.

Figure 7 Relation entre la morphologie et l'orientation pelvienne

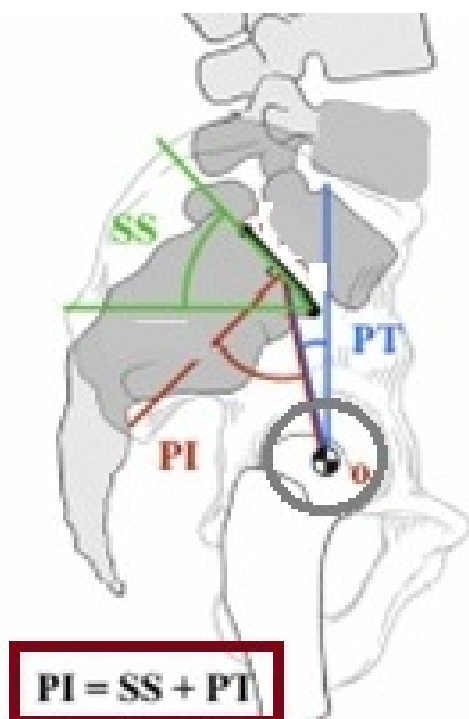
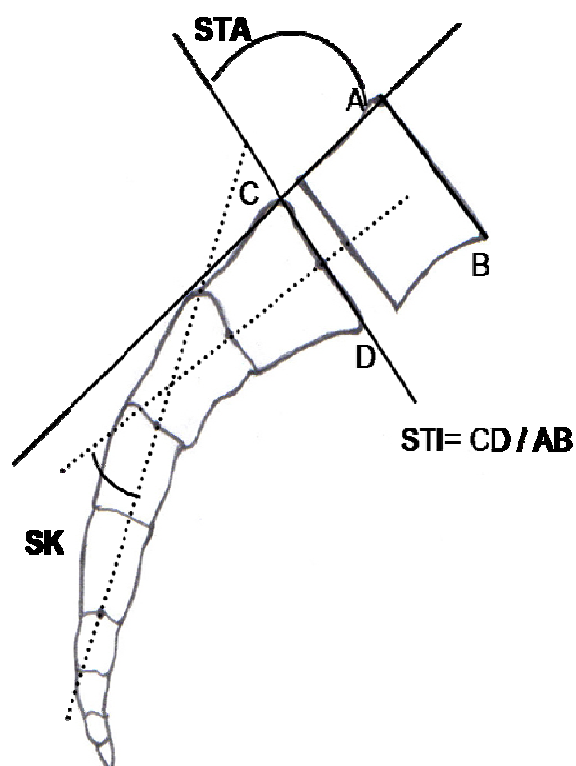


Figure 7. La relation entre la morphologie et l'orientation pelvienne. PI: l'incidence pelvienne; SS : la pente sacrée; PT : la version pelvienne;

Plus récemment, Inoue et al⁴ ont décrit l'angle de la Table-Sacrée (STA-sacral table angle) qui décrit particulièrement la morphologie du sacrum qui n'est pas affectée par le positionnement du sujet (Figure 8). Plusieurs auteurs ont présenté des preuves qu'il existe une relation significative entre la morphologie du sacrum et le spondylolisthésis. On remarque également une modification probablement secondaire au niveau du plateau supérieur S1. La mesure de l'Indice Sacrée (STI-sacral table index) et le dôme ont été utilisés pour décrire cette observation. Il existe également d'autres mesures pour caractériser la configuration sagittale du sacrum, par exemple la cyphose sacrée (SK-sacral kyphosis). Les mesures de la morphologie du S1 et S2 ont été également décrites dans la littérature.⁴² Ces mesures vont être discutées en détail dans le deuxième article.

Figure 8 La morphologie du sacrum



1.4 Traitement conservateur du spondylolisthésis

Type secondaire à la réaction envers le stress

Les fractures de stress de type spondylolyse sans interruption corticale sont rapportées à un taux de 47% dans l'étude de Micheli et Wood.¹⁷ Ce type de réaction symptomatique a une possibilité de consolidation avec une guérison osseuse. Le pronostic est meilleur lorsqu'il y a une atteinte unilatérale seulement.⁴⁴ C'est pour cela qu'un CT-scan est souvent indiqué pour mieux évaluer la lésion pour déterminer le traitement et le pronostic approprié. Le traitement précoce avec un corset TLSO pour une période de 6 à 12 semaines a eu des résultats supérieurs comparés aux simples modifications des activités.^{45,46} Une période de physiothérapie pour renforcer les musculatures du tronc peut être indiquée. Si les symptômes sont disparus mais le CT-scan ne démontre pas de guérison osseuse, alors une union fibreuse aura lieu. Les patients avec une union fibreuse demeurent être tout à fait fonctionnels et peuvent recommencer les activités sportives en surveillant les symptômes.^{44,45} La chirurgie est indiquée si les symptômes persistent malgré une période de 6-12 mois de traitements conservateurs.

Type avec un défaut d'interruption des pars

Le but du traitement avec un défaut spondylolyse est de soulager les symptômes et augmenter la mobilité et non pas une consolidation osseuse. La plupart des patients répondent au repos relatif et à une cessation des activités sportives. Le corset est seulement nécessaire si les patients ne répondent pas au traitement de repos. La période de repos pour ces cas est de 6 à 8 semaines. La physiothérapie avec des exercices spécifiques semble apporter des bénéfices chez ce groupe de patients.⁴⁷ Un suivi étroit avec un examen radiologique et clinique est nécessaire pour des patients symptomatiques ou qui développent des difformités cliniques.

Spondylolisthésis

Dans deux études publiées sur les enfants et les adolescents avec un spondylolisthésis symptomatique de type bas grade (Meyerding Grade 1-2), deux tiers d'une  tude⁴⁸ et tous les patients de l'autre  tude⁴⁹ ont répondu au traitement conservateur incluant le repos, la physiothérapie et le corset. Lorsque les symptômes ont diminué, les

ischiojambiers sont plus souples. De plus il y a eu une augmentation de la mobilité spinale et le patient peut retourner graduellement à ses activités. Il est rare de noter une progression du spondylolisthesis. Ce dernier se justifie par le fait qu'il y a seulement moins de 4% des sujets avec un spondylolisthesis qui progresse dans la période de croissance^{7,11}. Il n'existe pas de paramètres ou de signes cliniques qui peuvent prédire la progression du spondylolisthesis. Ceci sera élaboré plus en détail dans mon objectif de travail ci-dessous.

Les patients avec un spondylolisthesis de type haut grade symptomatique ne répondent pas de façon favorable au traitement conservateur. Une série a rapporté seulement moins de 10% des patients qui ont eu un soulagement symptomatique avec le traitement conservateur.⁴⁸ Il n'y a également aucune preuve scientifique portant à considérer une fixation chirurgicale prophylactique chez les patients avec un spondylolisthesis de haut grade, cependant asymptomatique.

Traitement chirurgical du spondylolisthesis

Le traitement chirurgical peut être indiqué chez un patient avec une spondylolyse ou un spondylolisthesis de bas grade qui ne réponde pas à une période minimum de 6 mois de traitement conservateur. La chirurgie est également indiquée chez un patient avec un haut grade de spondylolisthesis progressif, chez les patients avec symptômes neurologiques ou simplement les hauts grades symptomatiques persistants. Une investigation plus avancée est primordiale afin de rechercher d'autres sources de douleur avant d'entreprendre un traitement chirurgical.

Il persiste plusieurs controverses entre les experts sur l'indication et le choix de la procédure chirurgicale, surtout chez le haut grade de spondylolisthesis. Ceci dépasse le but principal de cette thèse et ne sera pas discuté ici.

- Objectifs et hypothèses

Résumé de la problématique

Les études biomécaniques faites par Cyron et Hutton⁵⁰⁻⁵³ suggèrent que le spondylolyse est une défaillance de fatigue et donne une fracture des pars. Cette fracture cause un changement dans la mécanique du segment de mobilité, qui est la plus fréquente au niveau de L5/S1, qui résulte en un glissement vertébral nommé le spondylolisthesis. L'erreur principale est d'essayer de mettre une cause sur ce phénomène. À travers de nombreuses études radiologiques, anatomiques, et biomécaniques, plusieurs facteurs sont mis en question dans la pathogénèse du spondylolisthesis. Les études sur la balance sagittale ont démontré un lien intéressant entre les mesures de la morphologie pelvienne et du sacrum avec le spondylolisthesis. Par contre, pour tous les paramètres radiographiques décrits, aucune étude n'a démontrée de façon significative que ceci peut être étiologique dans le spondylolisthesis. La déformation pelvienne et sacrée jouent-elles un rôle étiologique ou sont-elles simplement une adaptation secondaire? La morphologie pelvienne a déjà été étudiée par Labelle et al³ qui démontrent une corrélation de celle-ci avec le spondylolisthesis. Par contre, une étude par Huang et al.⁵⁴ n'arrive pas à prouver que la PI peut prédire la progression dans le spondylolisthesis. Les études récentes^{4,5,42} suggèrent qu'il y a probablement une association entre la morphologie du sacrum et le spondylolisthesis chez les adultes et certains groupes génétiques. Ceci n'a pas encore été étudié chez la population pédiatrique (moins de 25 ans). En outre, la relation entre la morphologie pelvienne et du sacrum, qui semble logique, n'a pas été démontrée de façon scientifique également.

Objectif global

Puisqu'il n'existe actuellement aucune mesure qui peut identifier les patients à risque de progression du spondylolisthésis, l'objectif principal de cette étude est d'établir l'influence de la morphologie du sacrum sur le spondylolisthésis L5-S1 développemental et la relation sacropelvienne dans cette entité clinique.

La rationnelle pour ce projet de recherche est basée sur les observations suivantes:

1. L'absence d'étude évaluant l'influence de la morphologie du sacrum et le besoin de la compréhension de celle-ci sur le spondylolisthésis;
2. La nécessité de déterminer la relation entre la morphologie du sacrum et la morphologie pelvienne dans le spondylolisthésis;
3. Le besoin pour les cliniciens d'identifier par les paramètres radiologiques les patients avec spondylolisthésis à risque de progression;

Objectifs spécifiques

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

Objectif 1 : La dysplasie lombosacrée est bien connue dans le spondylolisthésis L5-S1. Cette dysplasie amène un arrondissement du plateau sacrée, un émoussement de la bordure osseuse, et un remaniement osseux secondaire. Ces derniers peuvent créer des erreurs reliées à l'identification des repères anatomiques sur les radiographies dans la mesure de la géométrie sagittale qui peuvent affecter la précision des

indices mesurés. Il faut donc s'assurer que, malgré les erreurs engendrées par ces trois facteurs, les indices calculés sont suffisamment fiables et reproductibles pour être utilisés dans un contexte clinique et de recherche.

Objectif 2 : Un des buts dans la recherche sur le sujet est d'identifier les facteurs importants dans l'évaluation de l'évolution de cette entité clinique. Il faut identifier le groupe à risque de progression du spondylolisthesis afin de pouvoir débiter un traitement soit conservateur ou chirurgical de façon précoce et minimaliser les complications tardives. Nous identifierons à partir de notre base de données des indices géométriques du sacrum qui peuvent avoir une influence directe sur l'évolution du spondylolisthesis L5-S1 chez les enfants et les adolescents.

Objectif 3 : Il existe une relation significative entre la morphologie du bassin et celle du sacrum dans le spondylolisthesis développemental L5-S1. Par contre, la relation et également la contribution individuelle de la morphologie du bassin et du sacrum sur le spondylolisthesis demeurent toujours inconnues. Nous essayons de comprendre le lien entre la morphologie pelvienne et sacrée afin de mieux comprendre la relation sagittale intersegmentaire. Nous essayons de démontrer que cette relation est non-négligeable chez les sujets avec le spondylolisthesis L5-S1.

Hypothèses

À partir de ces objectifs, les hypothèses principales de ce projet de recherche sont proposées :

Hypothèse 1 :

Nous proposons qu'il est fiable de mesurer par la méthode assistée par ordinateur les paramètres morphologiques sacrées malgré les difformités observées chez les sujets avec du spondylolisthesis de haut grade lorsque la technique de mesure est constante.

Hypothèse 2 :

Il existe une différence significative sur l'anatomie sagittale du sacrum entre les enfants ou les adolescents atteints du spondylolisthesis développementale et les enfants ou les adolescents normaux.

Nos sous-hypothèses sont :

H2.1 : Le STA et les autres mesures de la morphologie du sacrum sont anormales chez les enfants et les adolescents avec le spondylolisthesis développemental L5-S1 lorsque comparés à une population contrôle normale.

H2.2 : Il existe une corrélation significative entre le STA et la sévérité du glissement dans le spondylolisthesis L5-S1.

H2.3 : Il existe également une différence significative sur la morphologie de S1 et S2 dans la population du spondylolisthesis lorsque comparée à une population normale.

Hypothèse 3 :

Nous proposons qu'il existe une relation significative entre la morphologie pelvienne et la morphologie sacrée chez les enfants et les adolescents atteints de spondylolisthesis développemental. Nous croyons que la morphologie sacrée exerce une plus grande importance sur le spondylolisthesis développemental lorsque comparé à la morphologie pelvienne.

Présentation des articles

Le premier article (Chapitre 3) décrit la fiabilité et la reproductibilité des mesures assistées par ordinateur sur les mesures sacrées chez les sujets avec le spondylolisthesis L5-S1. Il y a trois individus qui vont faire des mesures sur trente radiographies à deux occasions pour évaluer la précision inter et intra-observateur de ces mesures. En plus, les radiographies incluent trois groupes de sujets : normal, spondylolisthesis bas grade, et spondylolisthesis haut grade. Ces derniers permettent de comparer si les chercheurs sont toujours capables de mesurer les angles avec précision même s'il y a une dysplasie lombosacrée surtout dans le haut grade de spondylolisthesis.

Le deuxième article (Chapitre 4) décrit l'influence de la morphologie sacrée chez les enfants et les adolescents avec le spondylolisthesis L5-S1. Cette étude compare la morphologie sagittale du bassin de 131 patients atteints de spondylolisthesis avec un groupe contrôle standard de 120 patients normaux. L'objectif est d'identifier une différence significative entre les deux groupes par rapport à leur géométrie du bassin. L'étude servira également à vérifier s'il y a une corrélation entre les angles et la sévérité de la difformité du spondylolisthesis.

Le dernier article (Chapitre 5) décrit la corrélation entre les mesures sacrées et les mesures pelviennes dans la même cohorte de sujets avec L5-S1 spondylolisthesis. Cette étude tente de déterminer l'importance relative de celles-ci dans le spondylolisthesis. Nous espérons que ceci apportera une meilleure compréhension de la balance sagittale chez l'humain.

Chapitre 3 - Article 1

Ce manuscrit a été soumis à la revue Spine le 28 décembre 2008. La version soumise, conforme aux normes de présentation de cette revue, est présentée aux pages suivantes. Les tables et figures citées dans le manuscrit sont situées à la fin du chapitre.

Ce manuscrit a été accepté pour publication par Spine le 23 juillet 2009. L'article a été publiée par Spine, le premier janvier, 2010.

A Variability Study of Computerized Sagittal Sacral

Radiologic Measures

Zhi Wang, MD^{1,2} Stefan Parent, MD, PhD,^{1,2} Jacques A de Guise, PhD³, Hubert Labelle, MD,^{1,2}

A Variability Study of Computerized Sagittal Sacral Radiologic Measures

Zhi Wang, MD^{1,2} Stefan Parent, MD, PhD,^{1,2} Jacques A de Guise, PhD³, Hubert Labelle, MD,^{1,2}

¹ Research Center, Sainte-Justine University Hospital Center, 3175 Côte-Sainte-Catherine, Montréal, Québec, Canada, H3T 1C5

² Department of Orthopaedic Surgery, Université de Montréal, PO Box 6128, Station Centre-ville, Montréal, Canada, H3C 3J7

³ Department of Mechanical Engineering, École Polytechnique, PO Box 6079, Station Centre-ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3A7

Address correspondence and reprint requests to:

Hubert Labelle, MD

Division of Orthopaedics, Sainte-Justine University Hospital Center

Acknowledgments:

Supported by MENTOR, a strategic training program of the Canadian Institutes of Health Research, FREOM (fondation de recherche et d'éducation en orthopédie de Montréal) and in part by the Spinal Deformity Study Group and an educational non-commercial research grant from Medtronic Sofamor Danek,

Abstract

Objectives: Recent studies have shown differences in sacral morphology among patients with spondylolisthesis. The sacral table angle (STA) is a fundamental sacral anatomical parameter that is specific and constant to each individual, while the S1 superior and S2 inferior angles are defined as anatomic measures specific to S1 and S2. Sacral kyphosis measured by Ferguson or Cobb's method has also been used to evaluate the sagittal shape of the sacrum. Currently, computerized measures are gaining popularity for the study of sagittal balance, but their reliability has never been properly evaluated. The purpose of this study was to evaluate the inter and intraobserver variability of computer measurements of sacral morphology.

Methods: The standing lateral x-rays of 30 adolescents were randomly selected from the radiographic database of our institution: 10 radiographs of asymptomatic individuals, 10 of subjects with low grade L5/S1 spondylolisthesis and 10 with high grade L5/S1 developmental spondylolisthesis. Three surgeons measured sacral morphological variables on the 30 x-rays at two occasions, with a 15 days interval between the two sessions, using a computer assisted technique. Intraclass correlation coefficients (ICCs) were used for statistical analysis.

Results: The ICC values measured within observers varied between 0.951 to 0.995, whereas the ICC measured between observers varied between 0.957 to 0.995. There was a slight decrease of the ICC measured in the high grade L5/S1 spondylolisthesis group compared to the normal subjects. However, the difference was not statistically significant.

Conclusion: These results confirm the reliability and repeatability of computer-assisted angular measurement of sacral morphology in subjects with L5/S1 spondylolisthesis, even in the presence of lumbosacral junction dysplasia. The use of

computerized measurements can be recommended for the evaluation of the sagittal sacral anatomy in future clinical and research studies.

Introduction

The measurement of sagittal balance in a standing subject has become an important consideration for the evaluation and treatment of many spinal disorders.¹⁻³ Numerous radiological measurements have been proposed and shown to have an abnormal relationship in spondylolisthesis. Duval-Beaupère et al.^{3,4} described pelvic incidence (PI) as a fundamental parameter of the geometric configuration of the pelvis. An association between PI and spondylolisthesis has been reported in many publications.⁴⁻⁷ Recently, attention has turned to the sagittal configuration of the sacrum as an important factor in the occurrence and progression of developmental spondylolisthesis.⁸⁻¹⁰ Sacral morphology, measured by the sacral table angle (STA) (Figure 1) has been found to be significantly different in cadaveric specimens with a high occurrence rate of spondylolysis in the study of Whitesides et al.¹⁰ Inoue et al.⁹ found a significant decrease in STA in an adult cohort with low grade spondylolisthesis. The abnormalities of the sacral sagittal configuration are not limited to the superior endplate of S1. Marty et al.⁸ showed a significant difference in S1 and S2 segmental morphology in an adult population with spondylolisthesis. In addition, a significant sacral kyphosis was also noted in subjects with spondylolisthesis.¹⁵ Two methods have been reported in the literature to measure sacral kyphosis, one using the standard Cobb angle method and the other with the Ferguson technique. Because the anterior and posterior aspects of the sacrum often appear eroded in spondylolisthesis, the Ferguson method has been thought more reliable than the Cobb method, a presumption which has yet been demonstrated.

Because of the difficulty and time involved in the manual measurements of these pelvic and sacral morphological parameters on radiographs, the use of various computer assisted softwares^{8,11,12,16} has been advocated to increase the accuracy and simplify this task. These computer assisted methods have been shown by Rillardon et al.¹¹ and Berthonnaud et al.¹² not only to provide a significant saving in time but also to allow for significantly smaller inter and intra-observer variability when compared to manual tracing techniques. However, the validity of the computer assisted

techniques in these studies has been demonstrated only in a normal population without any apparent radiological abnormality.

High grade L5-S1 spondylolisthesis is associated with a variable degree of dysplasia, including rounding of the upper sacral endplate (sacral doming), an abnormal superior sacral facet with bony stress reaction, and increased sacral kyphosis which can significantly impair the identification of radiological anatomical markers. Vialle et al¹⁶ recently demonstrated the reliability and repeatability of computerized measurements of pelvic incidence in a group of subjects with high grade spondylolisthesis, but sacral measurements were not reported and the reliability was not compared to a control group.

Prior to any further studies on the importance of sacral morphology in spondylolisthesis, the measuring techniques of the various angular anatomical measurements proposed need to be assessed independently to evaluate their reliability. Therefore, the purpose of this study was to compare the reliability of all available sacral sagittal morphological parameters in a high grade spondylolisthesis, low grade spondylolisthesis and asymptomatic cohorts with a computer assisted method.

Material and Methods

The standing lateral radiographs of 30 adolescents (10 males, 20 females) aged between 10 and 17 were selected randomly from the database of the spine clinic of a pediatric university center hospital. All participants had previously accepted to participate in the research and the study was approved by the institutional ethic committee. A similar radiological protocol was used for all participants, with a lateral digital radiograph of 30-90 cm obtained with each subject in a comfortable standing position with the knees fully extended. For the upper limbs, the arms were in slight forward flexion while the elbows were fully flexed and the fists were resting

on the clavicles. The X-Ray beam was centered on the 12th thoracic vertebrae in order to visualize the entire axial skeleton from C7 to the femoral heads.

Three groups of ten radiographs were selected for this study. The first group consists of 10 asymptomatic subjects. All control subjects had a documented normal physical examination and had a similar digital lateral standing radiograph done as part of a scoliosis screening program. The next 10 radiographs were chosen randomly from the low grade (slippage less than 50%) spondylolisthesis database. Finally, the last 10 radiographs were also randomly selected, but from the high grade spondylolisthesis database (slippage more than 50%). In this last group, all subjects presented evidence of L5-S1 dysplastic changes (sacral doming, facet dysplasia, trapezoidal shape of L5). All radiographs were digital images obtained with a Fuji FCR machine (Fuji, Tokyo, Japan). Since computer assisted measurement methods has been proven to have better reliability than manual tracing technique in previous studies,^{11,12} all measurements done in this study were computerized radiologic measurements of sacral sagittal morphological parameters made using the IdeFX software (LIO, Montreal, Canada). This application is a research version developed for Biospace Med (Paris, France), and includes options such as zooming, contrast and sharpness modulation controls to allow better visualization of each radiograph. The following steps were done in order to obtain the computerized geometric sacropelvic measurements. First, thirteen points were identified on each sagittal radiograph using a mouse pointing device (Figure 1): one point at each end of the upper and lower endplate of L5 and S1, two points on the anterior and posterior limit of the S2 vertebra and two other points located on the anterior and posterior limit of the S4 vertebra. Last, a point on the apex of upper sacral endplate was obtained to measure the sacral doming when present, as proposed by the Spinal Deformity Study Group¹⁴. The following parameters could then be calculated:

1. Sacral table angle (STA), described by Österman and Österman¹³ as the angle between a line along the sacral endplate and a line drawn along the posterior aspect of the S1 vertebral body. (Figure 2)

2. S1 superior (S1), defined as the angle between the median of S1 and the line perpendicular to the middle of the upper endplate of the S1 vertebra. This is an anatomical parameter for the S1 vertebra.⁸ (figure 2)
3. S2 inferior (S2), likewise an anatomical parameter for the S2 vertebra, measured as the angle between the perpendicular of the middle of the lower endplate of S2 and the median of S1.⁸ (Figure 2)
4. Sacral Kyphosis (SKF), defined by Ferguson as the angle between a line joining the midpoint of the superior and inferior borders of S1 and the line joining the midpoint of the inferior borders of S2 and S4. (Figure 3)
5. Sacral kyphosis measured by the Cobb angle method (SKC) using the superior endplate of S1 and inferior endplate of S4. (Figure 3)

Three individuals, one senior spine surgeon, one fellowship trained spine surgeon and an orthopedic senior resident used the software to measure all sacral variables on the 30 X-rays on two occasions within a 15 days interval. One individual, the principal investigator had extensive experience with the program. The fellowship trained spine surgeon had moderate experience and the senior spine surgeon had limited experience with its use. The order of X-rays was randomized for both sessions. The average time needed for calculation of all parameters for one subject varied between 3-5 minutes depending on the experience of the user and the degree of sacral dysplasia present for subjects with spondylolisthesis.

A commercial software, SPSS 16.0 ® (SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA), was used to evaluate the repeatability of the measurements. The intra-observer reliability of the computer-assisted method was assessed by comparing measurement that were made on two occasions by the same observer. The inter-observer reliability was evaluated by comparing measurement made on two separate occasions by three different authors. Statistical analysis was done using analysis of variance to calculate the intraclass correlation coefficients (ICCs). An ICC of one means total agreement and a value less than one implies less than perfect agreement.

Results

Table 1 provides the raw data from all observers for the five sacral morphological parameters for the 10 asymptomatic subjects, the 10 subjects with low grade L5-S1 spondylolisthesis, and the 10 subjects with high grade L5-S1 spondylolisthesis. The average standard deviation for the asymptomatic subjects was around 1.5° with a maximum error ranging from 2.6 to 4.7° . The average standard deviation for the subjects with low grade spondylolisthesis was around 2.0° with a maximum error ranging from 3.3° to 8.6° . For subjects with high grade spondylolisthesis, the standard deviation averaged 3° with a maximum error ranging from 4.7° to 8.8° . The variations observed were not significant between the three groups. However, it can be noted that the variation had a tendency to increase with increasing deformity (sacral doming) at the L5-S1 junction. It can also be noted that the S2 inferior parameter had a larger standard deviation compared to the other sacral morphology measures in the asymptomatic, low grade as well as high grade subjects.

Table 2 provides the results of the ICC calculation for all five parameters in the 3 subject groups, along with the intra-observer and inter-observer reliability of these parameters. The intraobserver reliability for all the measures was very high with an ICC ranging 0.95 to 0.99, the lowest values found being for the STA and the highest for the S1 superior angle. The interobserver reliability for all the measures was also very high with an ICC ranging from 0.95 to 0.99, the lowest being the S2 inferior angle and the highest for the SK Ferguson angle.

The ICCs were not significantly different when comparing the low grade and the high grade groups to the asymptomatic controls. However, there was a tendency for slightly smaller ICC values for all five parameters in the high grade group when compared to the asymptomatic group, but the observed differences were not statistically significant. The details of the statistical analysis are reported in Table 3.

Discussion

Several authors have previously demonstrated the importance of the anatomic configuration of the sacrum in sagittal balance.^{3-5, 8-10} The sacral morphology can be measured by different angles described in the literature which include predominantly the sacral table angle (STA), S1 superior angle, S2 inferior angle, and sacral kyphosis measured by the Cobb method and/or the Ferguson method. Among these descriptors of sacral morphology, the STA is the most commonly used and cited in the literature. All authors⁸⁻¹⁰ have reported a significant difference of sacral morphology in L5/S1 spondylolisthesis in their study population. Controversy exists for high grade spondylolisthesis where there can be significant dystrophic changes at the lumbosacral junction (sacral doming, trapezoidal L5 body), which can render difficult the accurate measurement of angles involving the L5 or S1 endplates. The report of Marty et al. is the only one that included a validity analysis of the sacral morphologic parameters studied. However, the validity study was done only on two radiographs without any specification on the amount of dysplasia present at the L5-S1 junction. To our knowledge, there is no adequate study in the literature that has confirmed the reliability of the various sacral morphologic parameters in the presence of L5-S1 dystrophic changes.

We used the standardized SDSG method to measure the sacral endplate, as proposed by Labelle et al.¹⁴ Our results show a very high intra and inter observer reliability with the computer assisted method. The intra and inter observer reliability remained very high even in the presence of dystrophic changes in the high grade L5-S1 spondylolisthesis group, therefore suggesting that computer measurements of sacral morphology are reliable even in the presence of lumbosacral dysplasia, as long as evaluators use the same reference points.

Comparing all sacral variables, we found that the S1 superior angle has the highest ICC value for intra and inter observer reliability in the asymptomatic and spondylolisthesis groups. In contrast to the STA which only uses the posterior wall of S1 as reference in the sacrum, the S1 superior angle uses both the anterior and

posterior sacral reference points at the S1 and S2 vertebrae. This can help to better define the sacral configuration when the posterior elements of the sacrum are blurred by dystrophic changes. We suggest the use of the S1 superior angle in future studies for the evaluation of sacral morphology.

The results presented support the value of using computerized measurement of sagittal balance in the clinical setting and provides valuable information to the clinician or the researchers the evaluation of spinal pathology. In summary, this study confirms the reliability and repeatability of computer-assisted angular measurement of sacral morphology in subjects with L5/S1 spondylolisthesis, even in the presence of lumbosacral junction dysplasia. The use of computerized measurements can be recommended for the evaluation of the sagittal sacral anatomy in future clinical and research studies.

References

1. 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* 1994,19:1611-1618.
2. Legaye J, Hecquet J, Marty C, Duval-Beaupère G: Equilibre sagittal du rachis. Relations entre bassin et courbures rachidiennes sagittales en position debout. *Rachis* 1993,5:215-226
3. Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, Marty C: Pelvic incidence : a fundamental pelvic parameter for three dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J* 1998,7:99-103.
4. Duval-Beaupère G, Schmidt C, Cosson P: A Barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an ergonomic standing position. *Ann Biomed Eng* 1992,20:451-462.
5. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence and sagittal spino-pelvic balance: a correlation study. *Spine* 2004,29:2049-54.
6. Huang RP, Bohlman HH, Thompson GH, et al. Predictive value of pelvic incidence in spondylolisthesis. *Spine* 2003,28:2381-5.
7. 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
8. Marty C, Boisaubert B, Deschamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J* 2002,11:119-25.
9. Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K. Radiographic classification of L5 isthmic spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. *Spine* 2002,27:831-838.
10. Whitesides T.E., Horton W.C., Hutton W.C., et al. Spondylolytic 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:S12-S21.
11. 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 Orthopédique* 2003,89: 218-227.
12. Berthonnaud E, Labelle H, Roussouly P. et al. A variability study of computerized sagittal spinopelvic radiologic measurements of trunk balance. *J Spinal Disord Tech* 2005,18(1):66-71.
13. Österman K, Österman H. Experimental lumbar spondylolisthesis in growing rabbits. *Clin Orthop* 1996,332:274-80.
14. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J, O'Brien M. The importance of spino-pelvic balance in L5-S1 developmental spondylolisthesis: a review of pertinent radiologic measurements. *Spine* 2005,30:S27-S34.

15. Antoniadis SB, Hammerberg KW, DeWald RI. Sagittal plane configuration of the sacrum in spondylolisthesis. *Spine* 2000;25:1085-91.

16. 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(10):1449-53.

Table 1. Raw data values from all 3 measurers

	<u>STA</u>	<u>S1 sup.</u>	<u>S2 inf.</u>	<u>SK Ferguson</u>	<u>SK Cobb</u>
<u>10 X-rays: asymptomatic</u>					
SD (degree)	+/- 0.52	+/- 0.77	+/-1.48	+/-0.64	+/- 1.24
Maximum error (degree)	+/- 4.46	+/- 2.51	+/-4.65	+/- 2.67	+/- 3.33
<u>10 X-rays: low grade</u>					
SD (degree)	+/- 0.77	+/- 1.04	+/- 2.97	+/- 0.89	+/- 2.11
Maximum error (degree)	+/- 6.19	+/- 3.30	+/- 6.69	+/- 4.22	+/- 8.61
<u>10 X-rays: high grade</u>					
SD (degree)	+/- 0.99	+/- 1.49	+/- 3.34	+/- 1.36	+/- 2.82
Maximum error (degree)	+/- 7.64	+/- 6.83	+/- 8.80	+/- 4.74	+/- 8.8

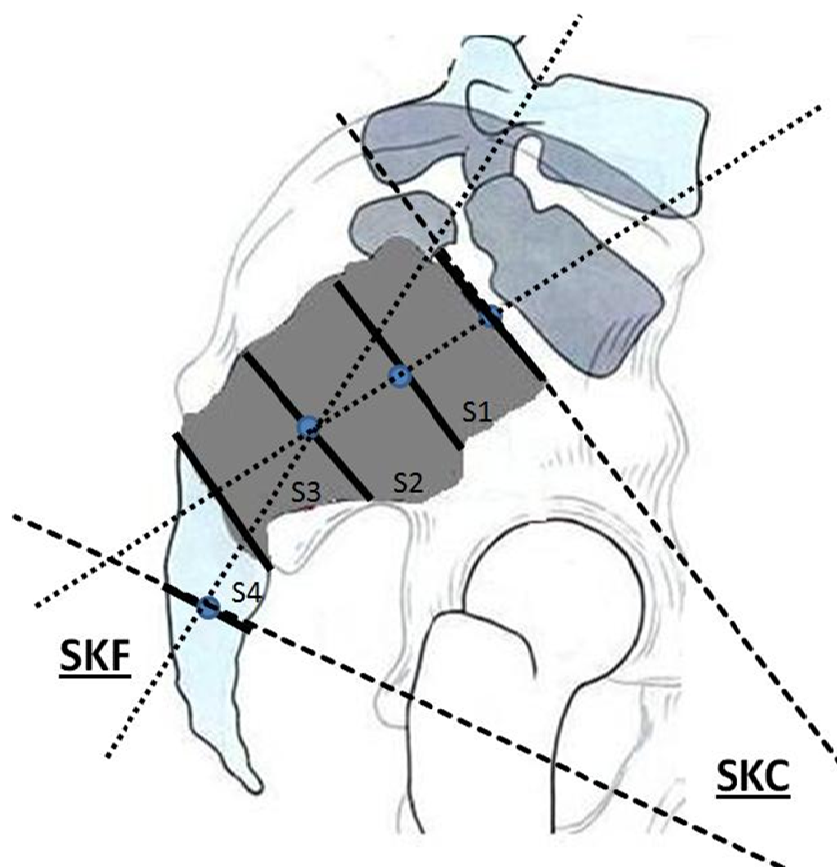
**Table 2. Details of Intraclass coefficients (ICC) study for all subjects
(Asymptomatic, Low grade and High grade groups altogether)**

<u>Morphologic Variables</u>	<u>ICC</u>	<u>Confidence Interval</u> Lower interval ($\alpha=0.05$)	<u>Confidence Interval</u> Upper interval ($\alpha=0.05$)
<u>Intra-observer STA</u>	<u>0.951</u>	<u>0.939</u>	<u>0.962</u>
Inter-observer STA	0.966	0.945	0.986
<u>Intra-observer S1 sup</u>	0.991	0.989	<u>0.993</u>
Inter-observer S1 sup	0.987	0.981	0.993
<u>Intra-Observer S2 inf</u>	<u>0.963</u>	<u>0.949</u>	<u>0.981</u>
Inter-Observer S2 inf	<u>0.949</u>	<u>0.906</u>	<u>0.992</u>
<u>Intra-observer SK Ferg</u>	<u>0.995</u>	<u>0.990</u>	<u>1.001</u>
Inter-observer SK Ferg	0.995	<u>0.989</u>	1.000
<u>Intra-observer SK Cobb</u>	0.967	<u>0.956</u>	<u>0.978</u>
Inter-Observer SK Cobb	0.957	0.931	0.983

Table 3. Comparison of intraclass coefficients (ICC) study between the three groups of subjects

<u>Morphologic</u> Variables	<u>Asymptomatic</u> Subjects	Low grade L5/S1 Spondylolisthesis	High grade L5/S1 spondylolisthesis
<u>Intra-observer STA</u>	<u>0.978</u>	<u>0.984</u>	0.889
Inter-observer STA	0.975	0.981	<u>0.941</u>
<u>Intra-observer S1 sup</u>	<u>0.991</u>	<u>0.99</u>	<u>0.991</u>
Inter-observer S1 sup	0.989	0.99	0.982
<u>Intra-Observer S2 inf</u>	<u>0.987</u>	<u>0.946</u>	<u>0.954</u>
Inter-Observer S2 inf	0.984	0.9505	0.913
<u>Intra-observer SK</u> <u>Ferg</u>	<u>0.993</u>	<u>0.997</u>	<u>0.992</u>
Inter-observer SK Ferg	0.997	0.995	0.991
<u>Intra-observer SK</u> <u>Cobb</u>	<u>0.987</u>	<u>0.946</u>	<u>0.9666</u>
Inter-Observer SK Cobb	0.985	0.9505	0.9355

Figure 3.
Sacral kyphosis measured by the Cobb method (SKC) and Ferguson method (SKF)



Chapitre 4 – Article 2

Une copie conforme de l'article publié dans la revue Spine se trouve dans les pages suivantes.

Influence of sacral morphology in developmental spondylolisthesis

Zhi Wang, MD, Stefan Parent, MD,PhD, Jean-Marc Mac-Thiong, MD, Yvan Petit, PhD, Hubert Labelle, MD.

Spine. 2008. Oct 1; 33 (21) : 2316-25

Influence of sacral morphology in developmental spondylolisthesis

Zhi Wang, MD^{1,2} Stefan Parent, MD,PhD,^{1,2} Jean-Marc Mac-Thiong, MD,^{1,2}

Yvan Petit, PhD,³ Hubert Labelle, MD,^{1,2}

¹ Sainte-Justine University Center Hospital, 3175 Côte-Sainte-Catherine,
Montreal, Quebec, Canada, H3T 1C5

² Department of Orthopaedic Surgery, University of Montreal, PO Box 6128,
Station Centre-ville, Montreal, Canada, H3C 3J7

³ Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure,
PO Box 6079, Station Centre-ville, Montreal, Quebec, Canada, H3C 3A7

Address correspondence and reprint requests to:

Stefan Parent, MD

Division of Orthopaedics, Sainte-Justine University Center Hospital

Supported by the Spinal Deformity Study Group and funded by an educational non-commercial research grant from Medtronic Sofamor Danek, and from MENTOR, a strategic training programme of the Canadian Institutes of Health Research and FREOM (fondation de recherche et education de l'orthopédie de Montréal)

Special acknowledgement to the effort and technical support received from the Image and orthopedics laboratory (LIO) and especially Dominic Branchaud for the IdeFx software.

Abstract

Study design:

A radiographic and morphologic study was conducted to investigate sacral morphology in a children and adolescent population with developmental L5/S1 spondylolisthesis.

Objectives:

To determine the relationship between sacral morphology and developmental L5/S1 spondylolisthesis.

Summary and background data:

The anatomy and morphology of the adult sacrum has been recently shown to be abnormal in low grade spondylolisthesis. However, sacral morphology has never been evaluated in a pediatric population where remodeling and secondary changes are less pronounced. It remains unknown if these changes in sacral morphology are primary or secondary in developmental L5-S1 spondylolisthesis.

Methods:

The lateral standing radiographs of 131 subjects, aged 6 to 20 years old with developmental L5-S1 spondylolisthesis (91 low grade and 40 high grade) were analyzed with a dedicated software allowing to measure the following parameters, which were analyzed for each subject by the same individual and compared to a cohort of 120 asymptomatic subjects with similar age and sex distribution: the sacral table index (STI), sacral table angle (STA), sacral kyphosis (SK), S1 superior angle, S2 inferior angle, and grade of spondylolisthesis. Student t tests were used to compare the parameters between the curve types.

Results:

This study demonstrated that STA is significantly smaller ($p < 0.01$) in children and adolescents with L5-S1 spondylolisthesis compared to a similar control group. Furthermore, STA is significantly smaller in high grade spondylolisthesis when compared to subjects with low grade. There is also a significant difference in segmental sacral morphology (S1 and S2 anatomy) in the spondylolisthesis group. Increasing sacral kyphosis is also found to be significantly associated with spondylolisthesis.

Conclusion:

The sagittal sacral morphology is a constant anatomic variable specific to each normal individual. The anatomy of the sacrum in children and adolescents with L5-S1 spondylolisthesis is particular and different from a control group. This study suggests that sacral anatomy may have a direct influence on the development of spondylolisthesis: a lower STA and higher sacral kyphosis may be two factors predisposing to vertebral slip in developmental spondylolisthesis.

Keywords:

Spondylolisthesis, sacrum morphology, sacral table angle, sagittal balance, sacral kyphosis

Introduction

Over the last decade, many studies^{1,6,12,19,20,21} have identified a relationship between spinopelvic sagittal morphology and spondylolisthesis. PI, pelvic incidence described by Duval-Baupère^{2,3} as a constant pelvic anatomical parameter has been found to be increased in adults with low grade isthmic L5-S1 spondylolisthesis.^{4,5,21} Labelle et al. also found that PI is correlated in a direct linear fashion with the severity of slippage, suggesting that a higher PI could predispose to vertebral slip.⁶ Since then, PI has been suggested as a possible etiological factor in the development of isthmic spondylolisthesis.³ However, PI was not found to have any prognostic value for progression of spondylolisthesis in the study of Huang et al.⁷ A cadaveric archeological study by Whitesides et al.¹¹ on two genetically and geographically distinct groups of subjects (Aleut and Arikara groups) with high occurrence rates of spondylolisthesis also does not support the hypothesis that PI is a primary etiologic factor in the Aleut specimens with pars defect compared to the normal Aleut specimens. However, only 19 specimens available for study in the Aleut group.

Similarly, the morphology and orientation of the sacrum and its relationship with spondylolisthesis have gained interest over the past few years. Antoniadou et al.⁸ have reported a significant kyphotic deformity of the sacrum in spondylolisthesis. Inoue et al.¹⁰ further identified two significant anatomical parameters related to spondylolisthesis (Figure 2): sacral table angle (STA) and sacral table index (STI). In a cohort of 367 adult patients (mean age 37.5 years) with only low grade spondylolisthesis, Inoue et al. reported an increased Sacral table index (STI) in the slippage group (102.5%) versus the nonslip group (96.6%) and the control group (94.4%). The STA was also significantly smaller in the slip group (91.6°) versus the other groups. However no significant difference in STA was found between the control group (97.4°) and the nonslip group (97.8°). This can be explained by the fact the study included only a low grade spondylolisthesis population with an average slippage of 14.3%. Using an adult population can, however, introduce a confounding factor since secondary morphological changes are then superimposed on primary developmental anomalies. Also in the study, the control group consisted of an adult population presenting with low back pain. This can not be considered a normal control group as recent studies showed a significant correlation between sagittal alignment and low back pain.^{20,26,27} Whitesides et al reported a study of archeological specimens from genetically isolated groups with high occurrence rate of spondylolysis in an attempt to clarify the significance of these sacral parameters. Their study suggested that there is a genetically determined difference in the upper sacral tilt as described by the Sacral table angle (STA), thus a possible etiology of spondylolisthesis. However, they were unfortunately unable to determine the age and type of spondylolisthesis noted in their cadaveric specimens. Furthermore, the percentage of slip could not be determined since the specimens were disarticulated and could not be studied in the erect posture.

In summary, many radiological parameters describing the shape and orientation of the pelvis and sacrum have been analyzed and found to be significantly different in the

spondylolisthesis population when compared to the normal controls. It remains however unknown if these changes are primary and thus involved in the etiology of the disease, or simply secondary adaptive changes associated with the progression of spondylolisthesis. Ikata et al.⁹ suggested that L5 wedging and S1 doming are adaptive changes due to a growth disturbance in the vertebral endplates, as in Blount's disease.^{37,38} It is also unknown if the morphological changes reported are limited to the first sacral and fifth lumbar vertebra or if there is a generalized dysplasia involving the entire sacrum.

The purpose of this work was therefore to evaluate the sagittal anatomy of the entire sacrum in a large sample of children and adolescents with developmental spondylolisthesis in order to determine if the morphology of the sacrum is already abnormal at a young age, a finding which would support the concept that these changes are primary rather than secondary adaptive changes. In particular, we wanted to verify the following hypotheses: 1) STA and STI are abnormal in children and adolescents with L5-S1 developmental spondylolisthesis, when compared to an age matched control population; 2) STA and other sacral anatomical measures correlate with the severity of L5-S1 developmental spondylolisthesis; 3) The shape of S1 and S2 vertebrae are significantly different, when compared to a control population.

Methods

A retrospective study of 131 consecutive subjects recruited from a spine clinic of a pediatric institution was conducted with the following inclusion criteria for enrollment in the study:

1. A diagnosis of developmental L5-S1 spondylolisthesis according to the classification of Marchetti and Bartholozzi;¹⁶
2. An age between 5 and 21 years old;²²
3. The availability of a standing lateral radiograph of the spine and pelvis in which the spine from C7 to end of sacrum with both femoral heads are clearly visible. Subjects with any associated musculoskeletal syndrome, any significant lower limb abnormality, or any previous spine surgery were excluded from the study.

A similar radiological protocol was used for all participants, with a lateral digital radiograph of the entire spine and pelvis obtained with each subject in a comfortable standing position and the knees fully extended. For the upper limbs, the arms were in slight forward flexion while the elbows were fully flexed and the fists were resting on the clavicles as recommended by Faro et al.³⁹ and Horton et al.,⁴¹ in order to minimize the postural changes in the sagittal plane, while allowing adequate visualization of the spine. All radiographs were then measured by the same observer using a custom computer application (IdeFx, LIO, Montreal, Canada) designed to assess the sagittal alignment of the spine and pelvis. This application has yet to be commercialized but has been used and validated in previous studies (REF???)

Furthremore, the variability and reliability of computerized measurement using various anatomical landmarks of the spine and pelvis using a computer software have been shown to be more accurate and reproducible than similar radiological measures done manually.^{23,31} The following steps are done in order to obtain the computerized geometric sacral measurements: 12 points are identified on the sagittal radiograph using a mouse pointing device; -one point at each end of the upper and lower endplate of L5 and S1, two points on the anterior and posterior limit of the S2 vertebrae and the last two points on the anterior and posterior limit of S4. It can be difficult to perform precise measurement involving the S1 endplate when there is significant doming and anterior slipping of L5 as seen in high grade spondylolisthesis. We used the method recommended by SDSG to define the upper sacral endplate in these cases.²² .

Radiographic parameters measured included the Sacral table angle (STA), Sacral table index (STI), Sacral kyphosis defined by Ferguson, S1 superior angle and S2 inferior angle. (Figure 1 and 2) They are anatomical or morphological parameters that are descriptors of shape of the sacrum, and are independent of the position of the subject in space.

A total of 131 subjects with spondylolisthesis were recruited and subdivided into 91 low grades and 40 high grades. The mean age of subjects recruited was 13.7 +/- 6.4 years with a range of 7 to 21 years, and the ratio of male to female was 0.48. The measurements obtained for the subjects with spondylolisthesis were then compared to a cohort of 120 asymptomatic adolescents with no history of previous spine, hip or pelvic disorders. These study participants consist of children and adolescents referred by their primary physician to rule out scoliosis. All control subjects had a documented normal physical examination, no history of back pain and all had digital lateral standing radiograph done in the same position as previously described. The mean age of the control group was 12.2 +/- 3 years with a range of 7 to 19 years, and the ratio of male to female was 0.49 which are both similar to the spondylolisthesis group (Table 1) The subjects with spondylolisthesis are divided into low grade and high grade group according to the Newman technique. The average slippage was 15% for the low grade group and 77% for the high grade group.

Statistical analysis was performed using commercial software, SPSS 6.0 ® (SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA). Unpaired Student's *t* tests were done to compare the four groups (normals, entire cohort of spondylolisthesis, low grades and high grades) for each anatomical parameters described above. A Pearson correlation study was done between the STA and the Meyerding slippage grade. The level of significance was set at 0.01 rather than 0.05 for both tests in order to account for the multiple testings done and minimize the possibility of a type one statistical error.

Results

The results are summarized in Table 2 which provides the results of the six variables in the normal compared to the spondylolisthesis groups. Furthermore, these sacral parameters are also compared between the low grade and high grade group in the spondylolisthesis population, as shown in Table 3. An increased widening of the upper sacral endplate can be noted, as reflected by the increased sacral table index measure. The STI is 95.8% in the control group, 102.5% in the spondylolisthesis group, 103.3% in the low grade group, and 101.9% in the high grade group. These are significant differences between groups when compared to the control group, but there is no significant difference observed between the low and high grade groups. The sacral table angle (STA) is significantly smaller in the spondylolisthesis group (83.4⁰) compared to the control group (95.2⁰). Interestingly, a large and significant difference is observed between the low grade (88.2⁰) and the high grade group (72.2⁰). The Pearson correlation analysis demonstrates a significant correlation (R= -0.68, P<0.01) between the STA and the Meyerding slip percentage.(Graph 1) This large negative significant correlation indicates that the lower the STA, the higher is the grade of developmental spondylolisthesis.

The segmental morphology of sacrum as measured on S1 and S2 vertebrae was also done to determine if these morphologic changes are only limited to the upper sacral endplate in the spondylolisthesis population. Significant differences (p<0.01) were found for S1 superior angle and S2 inferior angle between the spondylolisthesis (S1 sup=8.0⁰, S2 inf=15.1⁰) and the control population (S1 sup=17.1⁰, S2 inf=10.3⁰). As well, the S1 superior and S2inferior of the high grade group (S1s up=12.2⁰, S2 inf=13.5⁰) were significantly different compared to the low grade group (S1 sup=-4.4⁰, S2 inf=18.5⁰). Interestingly, we also found that sacral kyphosis (SK), a global indicator of the sagittal configuration of the sacrum, is increased significantly in the spondylolisthesis group compared to the control group. However, the SK was not significantly different when comparing the low grade with the high grade group.

Discussion

Based on etiology, Marchetti and Bartolozzi's classification of spondylolisthesis regrouped the isthmic type into a broader category, the developmental form, which distinguishes from the acquired form.¹⁶ There are undoubtedly multiple factors that cause or influence the development of failure at the pars interarticularis junction, including the recent increased interest and studies on the influence of the sagittal alignment of the lumbosacral pelvic area in spondylolisthesis. It has been postulated that spondylolisthesis with an abnormal sacral morphology as seen in the high dysplastic group are more likely to progress, but this has never been accurately documented.^{5,8,10,11}

The present study is the largest reported so far in the literature on sacral morphology in developmental spondylolisthesis in a children and adolescent population including grade I to V degree of slippage. Three important findings are reported: first, sacral morphology is significantly different in children and adolescents with L5/S1 developmental spondylolisthesis, compared to an age and sex-matched control

population. This is shown by a significant decrease of STA and a significant increase of STI in the spondylolisthesis group. (Table 2)

Secondly, we confirmed our other stated hypothesis that STA decreases with increasing slippage severity of L5/S1 developmental spondylolisthesis in children and adolescents. (Table 3) This was also suspected by the study of Inoue et al¹⁰ but could not be proven since all the subjects were classified as low grade only. The wider distribution in terms of severity of the present study including grade I to V, demonstrates a large significant negative correlation ($R = -0.68$) between the STA and grade. (Graph 5) The difference in STA between the subject with spondylolisthesis and a similar control population increases as the severity of the spondylolisthesis increases further supporting the concept that a low STA is an important factor favoring the development and/or progression of the disorder.

The third important finding is that the abnormalities of the sacral shape were not limited to the superior endplate of the first sacral body as implied by the remodeling theory. There is a sharp increase of sacral sagittal kyphosis deformity ($SK = 42.7^\circ$) in adolescent with L5/S1 spondylolisthesis compared to the controls ($SK = 25.7^\circ$). However, no significant difference was found between the high grade group and the low grade group. Therefore, we analyzed our data further by studying the segmental deformity of the sacrum of S1 and S2 vertebrae. The only study published on S1 and S2 morphology is credited to Marty et al. Their study group included 39 adult patients (mean age 30 years) with low grade spondylolisthesis compared to 44 healthy adults (mean age 24 years). They have found an decrease S1 superior angle in the spondylolisthesis group ($13.85^\circ \pm 6.2^\circ$) compared to the control group ($18.97^\circ \pm 6.38^\circ$); while the S2 inferior angle is increased in the spondylolisthesis group ($17.66^\circ \pm 11.27^\circ$) compared to the controls ($12.68^\circ \pm 9.74^\circ$). Our results showed a similar trend to those of Marty et al. The S1 superior angle is significantly smaller in the spondylolisthesis group ($8.0^\circ \pm 12.4^\circ$) compared to the controls ($17.1^\circ \pm 5.3^\circ$) and the S2 inferior angle is increased significantly in the spondylolisthesis group ($15.1^\circ \pm 9.5^\circ$) compared to the control ($10.3^\circ \pm 9.3^\circ$). The difference between our data and the one published by Marty et al. can be explained by the fact that our study includes a high grade group in our spondylolisthesis population. The present study which is a larger study (131 subjects) and includes a wider range of severity than the study of Marty et al, and has an age and sex matched control group confirms that there is a significant difference in S1 and S2 morphology in children and adolescents with L5/S1 developmental spondylolisthesis. Finally, this study also demonstrated that the difference remained significant between the low grade and high grade spondylolisthesis group (Table 2).

Clinical relevance

To our knowledge, this is the first to report in the literature on STA angle in normal children and adolescents. Our average STA value of $95.2^\circ \pm 5.9^\circ$ is similar to that of Inoue et al¹⁰ reported in a normal adult population ($97.4^\circ \pm 4.2^\circ$). On the other

hand, pelvic incidence (PI) has been shown to increase with age in the studies of Mac-Thiong et al³⁰ and Hanson et al⁴. This increase is attributed to age related adaptive changes suggesting that PI may not be etiologic in spondylolisthesis. The similarity of sacral morphology between children and adolescents (skeletally immature) with adult (skeletally mature) population is very interesting because the STA, representing the sacral anatomical property is stable and is little affected by the bony adaptive changes in the process of growth. Thus, this suggests that sacral morphology, as measured by the STA, could be a more constant measure than the pelvic morphology, as measured by PI. We understand that a longitudinal study with age correlation will be needed to confirm this hypothesis.

We can also speculate that sacral morphology represented by the sacral table angle (STA) is an important factor in the etiology of L5-S1 spondylolisthesis in children and adolescents. From a biomechanical point of view, the sacrum acts as a double-lever arm which is fixed to the spine and the pelvis by the sacroiliac and lumbosacral ligaments.²¹ In a subject standing erect, a larger STA which means a lesser slope on the upper sacral endplate will translate into a lesser shear stress on the lumbosacral junction.^{12,14,15} Therefore it would seem logical that a high STA can be a protective factor for a failure of the pars interarticularis. While a low STA determined genetically may be etiologic in the occurrence of pars defect, other factors such as abnormalities of the pars, direct trauma or other factors can also contribute or cause spondylolysis. After a failure at the pars interarticularis junction, the shear stress is only sustained by the disc without any support from the neural arch. A low STA which translates into a steeper sacral slope with a higher shear stress could predispose to further forward slippage.

Some authors believe that the global sagittal deformity of the sacrum and kyphotic sacral deformity are possibly secondary to an axial compression force on the upper sacral endplate causing a secondary abnormal enchondral growth according to Heuter-Volkman's law.^{9,11,42} We argue this by using a young spondylolisthesis population who has less apparent secondary adaptive changes in our study and came to the conclusion that the sacral changes are most likely to be primary changes. Also in the spondylolysis and low grade spondylolisthesis group, there is minimal associated secondary deformities such as endplate abnormalities, L5 vertebral wedging and possible rounding of upper sacral endplate.⁹ In our children and adolescents with spondylolysis or low grade spondylolisthesis, where adaptive changes are minimal, the sacral morphology remained significantly different when compared to the normal control group. A strong significant negative correlation between the slippage percentage and STA further strengthens our speculation. Furthermore, if these changes are adaptive, one would suppose that the changes are limited to the lower L5 and upper sacral endplates in children and young adolescents due to the constraint of time. In contrast, our study in this young spondylolisthesis population has found significant morphological difference in segmental sacrum anatomical properties (S1 superior and S2 inferior angle) and in global sagittal sacral configuration (sacral kyphosis).

Conclusion

Limitations of this study include a relatively small number of high grade group spondylolisthesis subjects compared to the low grade group as well as the retrospective nature of the study. The results of this study clearly demonstrated the anatomy of the sacrum in children and adolescents with L5-S1 spondylolisthesis is particular and different from a normal control group. This study suggests that sacral anatomy may have a direct influence on the development of spondylolisthesis: a lower STA and higher sacral kyphosis may be two factors predisposing to vertebral slip in developmental spondylolisthesis. While a genetically low STA may be etiologic, we recognize that a prospective and longitudinal study is warranted to clearly establish this suggestion. Repeated measurements of the relative sacral measurement such as the Sacral Table Angle should be considered in the evaluation and treatment of spondylolisthesis.

References :

1. Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, Yuan HA, Lubicky JP: The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1984;66:699-707.
2. Duval-Beaupère G, Schimdt 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.
3. Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, et al. Pelvic incidence : a fundamental pelvic parameter for 3D regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J* 1998;7:99-103.
4. Hanson DS, Bridwell KH, Rhee J, et al. Correlation of pelvic incidence with low and high-grade isthmix spondylolisthesis. *Spine* 2002;27:2026-9.
5. Marty C, Boisauvert B, Deschamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J* 2002;11:119-25.
6. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence and sagittal spino-pelvic balance : a correlation study. *Spine* 2004;29:2049-54.
7. Huang RP, Bohlman HH, Thompson GH, et al. Predictive value of pelvic incidence in spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:2381-5.
8. Antonaides SB, Hammerberg KW, DeWald RI. Sagittal plane configuration of the sacrum in spondylolisthesis. *Spine* 2000;25:1085-91.
9. 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;24:94-8.
10. Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K. Radiographic classification of L5 isthmix spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. *Spine* 2002;27:831-838.
11. Whitesides T.E., Horton W.C., Hutton W.C., et al. Spondylolytic 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:S12-S21.
12. Cyron BM, Hutton WC. The fatigue strength of the lumbar neural arch in spondylolysis. *J Bone Joint Surg Br* 1978;60:234-48.
13. Hutton WC, Stott JRR, Cyron BM. Is spondylolisthesis a fatigue fracture? *Spine* 1977;2:202-9.

14. Cyron BM, Hutton WC. Variations in the amount and distribution of cortical bone across the partes interarticulares of L5: a predisposing factor in spondylolysis? *Spine* 1979;4:163–7.
15. Cyron BM, Hutton WC, Troup JD. Spondylolytic fractures. *J Bone Joint Surg Br* 1976;58:462–6.
16. Marchetti PG, Bartolozzi P. Classification of spondylolisthesis as a guideline for treatment. In: Bridwell KW, de Wald RI, eds. *The Textbook of Spinal Surgery*, 2nd ed. Philadelphia: Lippincott-Raven, 1997:1211–54.
17. Wright JG, Bell D. Lumbosacral joint angles in children. *J Pediatr Orthop* 1991;11:748–51.
18. Schwab F, Farcy JP, Roye D. The sagittal pelvic tilt index as a criterion in the evaluation of spondylolisthesis. *Spine* 1997;22:1661–7.
19. 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.
20. Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J* 2002;11:80–7.
21. 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.
22. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J, O'Brien M. The importance of spino-pelvic balance in L5-s1 developmental spondylolisthesis: a review of pertinent radiologic measurements. *Spine* 2005;30(6 suppl):S27–34.
23. 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 Tech Biol Med* 1998;19:411–26.
24. Newman PH. A clinical syndrome associated with severe lumbosacral subluxation. *J Bone Joint Surg Br* 1965;47:472–81.

25. Goh S, Price RI, Leedman PJ, et al. A comparison of three methods for measuring thoracic kyphosis: implication for clinical studies. *Rheumatology* 2000;39:310–5.
26. 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;5:215–26.
27. 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;25:575–86.
28. Curylo L, Edwards C, DeWald RW. Radiographic markers in spondyloptosis: implications for spondylolisthesis progression. *Spine* 2002;27:2021–5.
29. Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:2:151–60.
30. MacThiong JM, Labelle H, Berthonnaud E, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine* 2004;29:1642-7.
31. Berthonnaud E, Labelle H, Grimard G, et al. A variability study of computerized sagittal spinopelvic radiologic measurements of trunk balance. *J Spinal Disord Tech.* 2005 :18:66-71.
32. Österman K, Österman H. Experimental lumbar spondylolisthesis in growing rabbits. *Clin Orthop* 1996;332:274-80.
33. Christenson PC. The radiologic study of the normal spine: Cervical, thoracic, lumbar, and sacral. *Radiolog Clin North AM* 1977;15:133-154
34. Ebraheim NA, Xu R, Challgran E et al. Location of the sacral pedicle, foramina, and ala on the lateral aspect of the sacrum: A radiographic study. *Orthopaedics* 1998;21:703-6.
35. Gal GP. Weight transmission through the sacrum in man. *J Anat* 1989;162:9-17.
36. Peretz AM, Hipp JA, Heggness MH. The internal bony architecture of the sacrum. *Spine* 1998;23:971-4.

37. Kajiura K, Katoh S, Sairyo K, et al. Slippage mechanism of pediatric spondylolysis: biomechanical study using immature calf spines. *Spine* 2001;26:2208-13.
38. 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;28:645-50.
39. 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
40. Geiger EV, Müller O, Niemeyer T, et al. Adjustment of pelvispinal parameters preserves the constant gravity line position. *Int Orthop* 2007;31:253-258
41. 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
42. Frost HM. Biomechanical control of knee alignment: some insights from a new paradigm. *Clin Orthop* 1997;335:335-42.

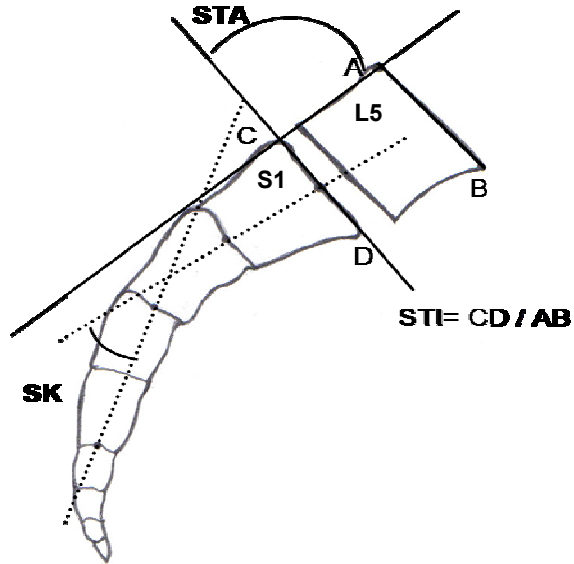


Figure 1. Sacral morphology determined by a) Sacral Table Angle, STA, is described as the angle between a line along the sacral endplate and a line drawn along the posterior aspect of the S1 vertebral body; b) Sacral Table Index, STI, is the maximal anteroposterior diameter of the sacral endplate over the anteroposterior diameter of the upper endplate of L5. This is used to evaluate the widening top of the sacrum; c) Sacral kyphosis, SK, is evaluated using the Ferguson method.

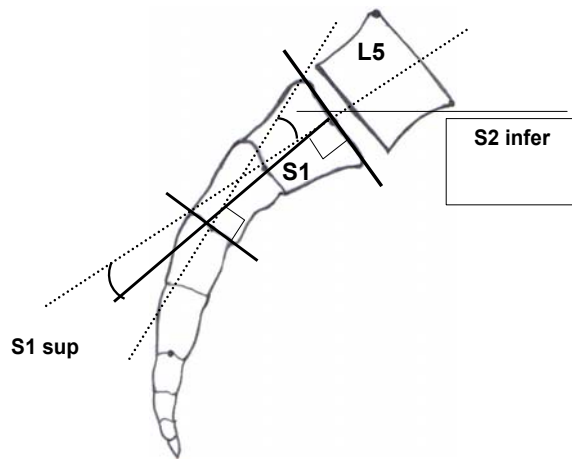


Figure 2. Sagittal view of the sacrum with methods of determining S1 superior angle and S2 inferior angle described by Marty et al. S1 superior angle is defined as the angle between the median of S1 and the line perpendicular to the middle of the upper endplate of the S1 vertebra. This is an anatomical parameter for the S1 vertebra.⁵ S2 inferior angle is likewise an anatomical parameter for the S2 vertebra, and the angle is measured between the perpendicular of the middle of the lower endplate of S2 and the median of S1.⁵

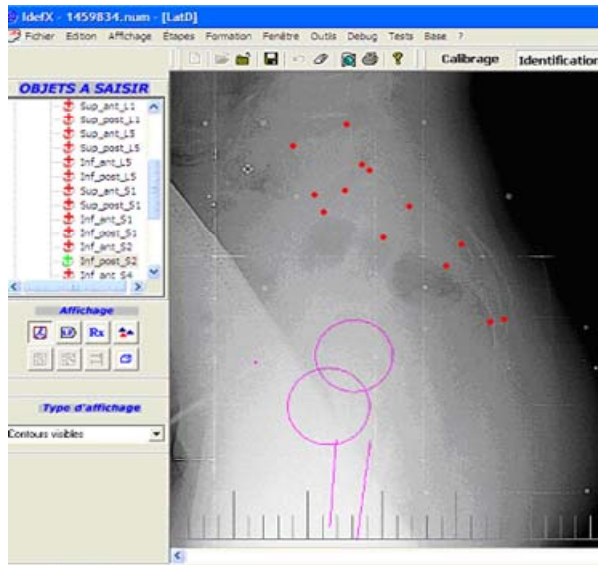
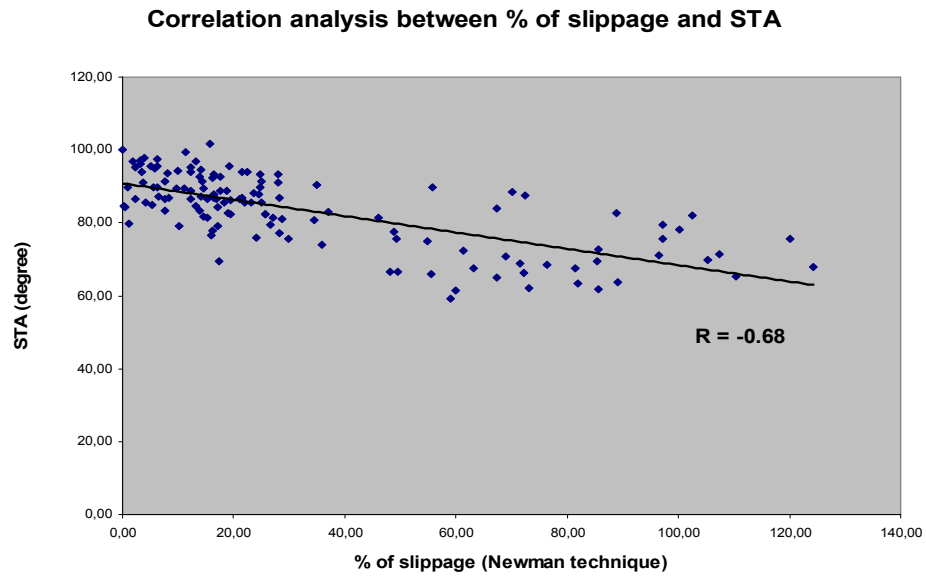


Figure 3. IdeFx, a custom made software is used to perform all measurements. This program allows different features including zooming and contrast to facilitate anatomic landmark identification.



Graph 1. Pearson correlation analysis demonstrated a strong significant ($p < 0.001$) linear correlation between the sacral table angle (STA) and the Newman slippage grade. Thus, the higher the grade of slippage in developmental L5-S1 spondylolisthesis, the lower the STA value.

Table 2. Descriptive statistics for study and control population

	Normal	Spondylolisthesis	Low grade	High grade
N	120	131	90	41
Age (y)	12.2 +/- 3	13.7 +/- 6.4	13.5 +/- 4.1	15.1 +/- 7
Female (F)	80	88	59	39
Male (M)	40	43	32	11
M/ F ratio	0.50	0.48	0.54	0.28

Table 3. Comparison table of sacral parameters between the spondylolisthesis group and the normal

		Normal	Spondylolisthesis
Variables	n	120	131
% of slippage	Mean	5%	34.6%
		(margin of error)	
STA	Mean +/- SD	95.2 +/-5.9	83.4 +/-10.0 *
STI (%)	Mean +/- SD	95.8 +/- 7.3	102.5 +/- 10.0 *
S1 superior	Mean +/- SD	17.1 +/- 5.3	8.0 +/- 12.4 *
S2 inferior	Mean +/- SD	10.3 +/- 9.3	15.1 +/- 9.5 *
Sacral kyphosis	Mean +/- SD	25.7 +/- 14.0	42.7 +/- 15.6 *

(* p<0.01)

Table 4. Comparison table of sacral parameters between low grade and high grade group

Variables	n	Low grade	High grade
% of slippage	Mean	14.7 +/- 9.1 (%)	78.8 +/- 20.2%
STA	Mean +/- SD	88.2 +/- 6.3	72.2 +/- 8.0 *
STI (%)	Mean +/- SD	103.3 +/- 8.1	101.9 +/- 21.1
S1 superior	Mean +/- SD	12.2 +/- 6.4	-4.4 +/- 9.4 *
S2 inferior	Mean +/- SD	13.5 +/- 9.2	18.5 +/- 9.3 *
Sacral kyphosis	Mean +/- SD	42.1 +/- 15.1	44.2 +/- 16.7

(* p<0.01)

Chapitre 5 - Article 3

Ce manuscrit a été soumis à la revue Spine le 30 août 2009. La version soumise, conforme aux normes de présentation de cette revue, est présentée aux pages suivantes. Les tableaux et figures citées dans le manuscrit sont situés à la fin du chapitre.

The influence of sacral and sacro-pelvic morphology in developmental lumbosacral spondylolisthesis: are they equally important?

Zhi Wang, MD^{1,2,3} Jean-Marc Mac-Thiong, MD,PhD,^{1,2,3} Stefan Parent, MD,PhD,^{1,2,3}

Yvan Petit, PhD,⁴ Hubert Labelle, MD,^{1,3}

The influence of sacral and sacro-pelvic morphology in developmental lumbosacral spondylolisthesis: are they equally important?

Zhi Wang, MD^{1,2,3} Jean-Marc Mac-Thiong, MD,PhD,^{1,2,3} Stefan Parent, MD,PhD,^{1,2,3}

Yvan Petit, PhD,⁴ Hubert Labelle, MD,^{1,3}

¹ Department of Surgery, University of Montreal, Montreal, Canada

² Hôpital du Sacré-Coeur, Montreal, Canada

³ CHU Sainte-Justine, Montreal, Canada

⁴ Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure,
Montreal, Canada

This research was assisted by support from the Spinal Deformity Study Group. This research was funded by MENTOR, a training programme of the Canadian Institute of Health Research and by an educational research grant from FREOM and Medtronic Sofamor Danek.

Address correspondence and reprint requests to:

Jean-Marc Mac-Thiong, MD, PhD

Study design:

Retrospective study of the influence of sacral and sacro-pelvic morphology in developmental L5-S1 spondylolisthesis.

Objectives:

To determine and compare the influence of sacral and sacro-pelvic morphology in developmental L5-S1 spondylolisthesis.

Summary and background data:

Recent studies have shown abnormalities in sacral and sacro-pelvic morphology in spondylolisthesis. However, it is still unclear if sacral and sacro-pelvic morphology are correlated and if they are equally important in the etiology and progression of spondylolisthesis.

Methods:

Lateral radiographs of 120 controls and 131 subjects with developmental L5-S1 spondylolisthesis were analyzed. Sacral table angle (STA) and pelvic incidence (PI) were compared using Student t tests. The relationship between STA and PI was assessed separately in the control and spondylolisthesis groups using Pearson's coefficients. The proportion of subjects with abnormal PI but normal STA was compared to the proportion of subjects with abnormal STA but normal PI using chi-square tests.

Results:

STA was significantly lower and PI was significantly higher in the spondylolisthesis group. STA was statistically related to PI in both control ($r=-0.43$) and spondylolisthesis ($r=-0.57$) groups. In the spondylolisthesis group, STA ($r=-0.45$) and PI ($r=0.35$) were significantly related to slip percentage. STA remained statistically related to slip when controlling for PI. A significantly greater proportion of subjects in the spondylolisthesis group had normal STA and abnormal PI, rather than normal PI and abnormal STA.

Conclusion:

The significant relationship between PI and STA validates that geometrically sacral morphology depends on sacro-pelvic morphology. This study failed to demonstrate a clear predominant role of either STA or PI in the etiology of spondylolisthesis.

Keywords:

Morphology, pelvis, sacrum, sagittal balance, spine, spondylolisthesis

Précis

Sacral and sacro-pelvic morphology was evaluated in 120 controls and 131 subjects with spondylolisthesis. The study failed to demonstrate a clear predominant role of either sacral or sacro-pelvic morphology in the etiology of spondylolisthesis.

Key Points

- Sacral table angle and pelvic incidence are different between controls and subjects with spondylolisthesis
- Sacral table angle and pelvic incidence are correlated in controls and in spondylolisthesis
- Sacral table angle and pelvic incidence are correlated to slip severity in spondylolisthesis

Introduction

Several studies suggest the importance of sacro-pelvic and sacral morphology in spondylolisthesis.¹⁻⁸ Pelvic incidence (PI), described by Duval-Baupère's group⁹ as a constant sacro-pelvic morphological parameter, has been found to be increased in L5-S1 spondylolisthesis.^{2,4,5,6} Some studies^{4,6} have also found that PI is related to severity of slip in spondylolisthesis. Similarly, sacral morphology and its relationship to spondylolisthesis has also been reported.^{1,3,5,7,8} In particular, Inoue et al.³ proposed the sacral table angle (STA) as an important morphological sacral parameter in adult spondylolisthesis. Another study⁷ also showed a significant decrease in STA in pediatric L5/S1 spondylolisthesis as compared to an age- and sex-matched control group, and that the decrease in STA was related to slip grade. Whitesides et al.⁸ presented their results from an archeological skeletal study and suggested that STA, rather than PI, may be involved in the etiology of spondylolisthesis.

However, the relationship as well as the individual contribution of sacral and sacro-pelvic morphology in spondylolisthesis remains largely unclear. Consequently, it is still unknown whether sacral and sacro-pelvic morphology are equally important and should both be assessed clinically when evaluating spondylolisthesis. The purpose of this work is to evaluate and compare the influence of sacral and sacro-pelvic morphology in developmental L5-S1 spondylolisthesis. More specifically, the relationship between the sacral (STA) and sacro-pelvic (PI) morphology in pediatric L5-S1 spondylolisthesis and in a control group, as well as their relationship with slip

severity was investigated. In addition, in order to investigate if the abnormality in STA precedes the abnormality in PI (and vice versa) in spondylolisthesis, subjects with normal STA or PI were evaluated separately with the assumption that at the onset of spondylolisthesis, the parameter (STA vs. PI) that is most likely to be etiologic will be abnormal while the other is still normal.

Materials and Methods

This retrospective study involves 120 controls and 131 consecutive subjects with developmental L5-S1 spondylolisthesis aged between 7 and 21 years old seen at the spine clinic of a single pediatric institution. A cohort of 120 asymptomatic children and adolescents with no history of previous spine, hip, or pelvis disorders formed the control group. These controls were referred by their primary physician to rule out scoliosis but they all presented with normal physical examination, no history of back pain, and normal radiographs of spine and pelvis. A similar radiological protocol was used for all participants, with postero-anterior and lateral digital radiographs of entire spine and pelvis obtained in a comfortable standing position with the knees fully extended. For the upper limbs, the arms were in slight forward flexion while the elbows were fully flexed and the fists were resting on the clavicles as recommended by Faro et al.¹⁰ and Horton et al.,¹¹ in order to minimize postural changes, while allowing adequate visualization of the spine. The mean age in the control group was 12.2 ± 3.0 years (range:7-19, male-to-female ratio:0.49). In the spondylolisthesis group, there were 91 low-grade (<50% slip) and 40 high-grade ($\geq 50\%$ slip) subjects,

with a mean age of 13.7 ± 6.4 (range:7-21, male-to-female ratio:0.48). Age and sex distribution was similar between the two groups.

All radiographs were assessed by the same observer using a custom software (LIO, CHUM Notre-Dame, Montreal, Canada) specifically designed to assess the alignment of the spine and pelvis. Eight anatomical landmarks were identified on the lateral radiograph (antero-inferior and postero-inferior corners of L5 vertebral body; antero-superior, postero-superior, antero-inferior and postero-inferior corners of S1 vertebral body; right and left femoral heads). In the presence of sacral doming, the method recommended by the Spinal Deformity Study Group was used to define the antero-superior and postero-superior corner of S1 vertebral body, corresponding to the 2 points where the best fit lines along the anterior and posterior borders of the sacrum lose contact with the anterior and posterior borders of S1, respectively.^{12,13} The software automatically computed all three parameters (slip percentage, STA, PI) used in the current study based on the position of identified anatomical landmarks.

- **Percentage of slip** was used to assess the severity of spondylolisthesis. It was measured by the translation of the postero-inferior corner of L5 vertebral body with respect to the postero-superior corner of S1 vertebral body and expressed in percentage of length of the superior endplate of S1 vertebral body.
- **Pelvic incidence (PI)** was used to assess sacro-pelvic morphology. It is defined as the angle between the perpendicular to the upper endplate of S1 vertebral body at its midpoint and the line connecting this point to the midpoint of a line connecting the femoral heads (Figure 1).

- **Sacral table angle (STA)**, as described originally by Österman and Österman,¹⁴ was used to assess sacral morphology. It is defined as the angle between a line along the upper endplate of S1 vertebral body and a line drawn along the posterior aspect of the S1 vertebral body (Figure 2).

Statistical analysis was performed using SPSS 14.0 software (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA). The level of significance was set to 0.05 in this study for all statistical analyses. In addition to descriptive statistics, STA and PI were compared between control and spondylolisthesis groups using bilateral Student t tests. The correlation between STA and PI was assessed separately in control and spondylolisthesis groups using Pearson's coefficients. The relationship between morphological parameters (STA and PI) and slip percentage was also assessed using Pearson's coefficients. Second-order partial correlations were also performed between each morphological variables (STA or PI) and slip percentage, while controlling for the other morphological variable, in order to determine if STA and/or PI are individually related to severity of slip.

Spondylolisthetic subjects with normal STA were then assessed separately in order to evaluate their PI. Similarly, STA of subjects with normal PI was evaluated. The abnormality in STA was assumed to precede that in PI when STA was abnormal in the presence of normal PI. Conversely, the abnormality in PI was assumed to precede that in STA when PI was abnormal despite normal STA. The proportion of subjects with abnormal PI and normal STA was compared to the proportion of subjects with abnormal STA and normal PI using chi-square tests. This analysis was performed

twice using two different criteria to identify abnormal STA and PI: 1) greater than one standard deviation from the mean in the control group, and 2) greater than two standard deviations from the mean in the control group.

Results

Slip percentage was $34.3 \pm 32.5\%$ in the spondylolisthesis group. Mean and standard deviation for STA and PI in each group is shown in Table 1. STA was significantly lower ($p < 10^{-16}$), while PI was significantly higher ($p < 10^{-23}$) in the spondylolisthesis group when compared to the control group. Standard deviations were slightly increased in the spondylolisthesis group for both STA and PI.

STA was significantly related to PI in both control ($r = -0.43$, $p < 10^{-6}$) and spondylolisthesis ($r = -0.57$, $p < 10^{-11}$) groups. In the spondylolisthesis group, STA was also significantly related to slip percentage ($r = -0.45$, $p < 10^{-7}$). The correlation coefficient was smaller between PI and slip percentage ($r = 0.35$, $p < 10^{-4}$) but it was also statistically significant. When controlling for PI, STA remained significantly related to slip percentage ($r = -0.32$, $p < 10^{-3}$). However, when controlling for STA, PI was no longer correlated with slip percentage ($r = 0.14$, $p = 0.12$).

When defining abnormal PI and STA by a difference greater than one standard deviation from the mean in the control group, STA was considered abnormal when smaller than 88.1° and PI was abnormal when higher than 59.6° . Accordingly in the

spondylolisthesis group, there were 60 subjects with normal STA and 41 with normal PI ($p=0.016$). Of those with normal STA, 30 (50%) had an abnormal PI, while 11 (27%) of those with normal PI had an abnormal STA ($p=0.020$).

When defining abnormal PI and STA by a difference greater than two standard deviations from the mean in the control group, STA was considered abnormal when smaller than 81.3° and PI was abnormal when higher than 71.0° . Accordingly in the spondylolisthesis group, there were 96 subjects with normal STA and 80 with normal PI ($p=0.035$). Of those with normal STA, 24 (25%) had abnormal PI, while 7 (9%) of those with normal PI had an abnormal STA ($p<10^{-2}$).

Discussion

This study compares the importance of sacral and sacro-pelvic morphology in developmental L5-S1 spondylolisthesis. In accordance with previous publications,²⁻⁸ STA and PI were respectively lower and higher in spondylolisthesis when compared to controls. STA directly measures sacral morphology, while PI is a descriptor of sacro-pelvic morphology and attempts to quantify the transition between the lumbar spine and lower extremities. Basically, PI depends on sacral morphology and on the position of the sacrum with respect to the femoral heads. Therefore, as recognized by Whitesides et al.,¹⁰ PI should be influenced by STA. Consequently, we found a significant relationship between PI and STA both in the control and spondylolisthesis groups.

While it is commonly believed that the etiology of spondylolisthesis is multifactorial,¹⁵⁻¹⁶ some authors^{4,5,8,17} have raised a possible etiologic role of sacral and/or sacro-pelvic morphology in lumbosacral spondylolisthesis. Roussouly et al.¹⁷ hypothesized two different mechanisms of low-grade isthmic spondylolisthesis based on sacro-pelvic morphology (PI) and orientation (sacral slope and pelvic tilt). High pelvic incidence typically associated with high sacral slope should increase the shear stresses at L5-S1 and then induce more tension on the pars interarticularis of L5. On the contrary, smaller pelvic incidence associated with smaller sacral slope would involve impingement of L5 posterior elements between L4 and S1 during extension, thereby causing a “nutcracker” effect. Based on K-means cluster analysis, Labelle et al.¹⁸ confirmed the existence of two distinct subgroups of patients with low-grade developmental spondylolisthesis based on sacro-pelvis morphology: a subgroup with normal or near normal PI values ($<60^\circ$) and a subgroup with high PI values ($\geq 60^\circ$).

Based on three main arguments, Whitesides et al.⁸ instead propose that sacral morphology measured from STA, rather than sacro-pelvic morphology (PI), is involved in the etiology of spondylolisthesis. First, they have found that STA in genetically different populations decreased as the prevalence of pars defect increased. Second, STA was significantly lower in the presence of spondylolysis for both archeological populations. Finally, PI did not differ between normal and spondylolytic specimens in one of two populations (Aleut population). However, the limited number of specimens ($n=19$) for statistical analysis in that last population may be too small to draw definite conclusions on the potential etiologic role of sacral and/or sacro-pelvic morphology in developmental spondylolisthesis. But more

importantly, it is in contradiction with current data^{2,4,5,6} showing a clear increase in PI in developmental spondylolisthesis. It is questionable whether the Aleut population was subject to specific environmental and biomechanical factors that are different from those encountered today. This is suggested by the absence of sacral doming in their specimens and by the absence of high-grade spondylolisthesis in those populations.^{19,20}

As both STA and PI were abnormal in spondylolisthesis, the current authors assumed that if one of these parameters is more relevant than the other in the etiology of spondylolisthesis, it is more likely to be abnormal in the presence of a normal value for the other parameter. Independent of the criterion that was used to define abnormal values in STA and PI in the spondylolisthesis group (one vs. two standard deviations from the mean in the control group), the proportion of subjects with normal STA was greater than the proportion of subjects with normal PI. Similarly, a significantly greater proportion of subjects had normal STA and abnormal PI, rather than normal PI and abnormal STA. These results do not support a predominant role of STA over PI in the etiology of spondylolisthesis, as suggested by Whitesides et al.⁸ In addition, the etiologic role of STA and PI in spondylolisthesis still remains unclear as STA and PI were normal many subjects.

A “dose-response effect” should also be found before one can suggest a causal relationship between sacral and/or sacro-pelvic morphology and progression of spondylolisthesis. Accordingly, the current study specifically investigated that “dose-response effect” by evaluating the relative influence of STA and PI on the severity of

spondylolisthesis. The results showed that STA remained significantly related to slip percentage even after controlling for PI, which supports a possible role of STA in progression of developmental L5-S1 spondylolisthesis once it has occurred. On the opposite, PI was not correlated to slip percentage when controlling for STA. A small STA could potentially lead to abnormal or increased stresses at the upper sacral epiphyseal plate and/or at the pars interarticularis. However, this assumption cannot be fully verified by the current study because it is not known if the abnormality seen in STA is primary or secondary to the appearance of the slip, in which case abnormal stresses at the upper sacral epiphyseal plate would lead to bone remodeling and sacral dysplasia, and subsequent decrease in STA. A longitudinal study on patients with spondylolisthesis will be necessary in the future to determine whether the abnormal STA in spondylolisthesis is primary or secondary.

Conclusion

The exact role of sacral and sacro-pelvic morphology in spondylolisthesis remains unclear mainly because its etiology is multifactorial. Spondylolisthesis involves a heterogeneous group of subjects on which the influence of sacral and sacro-pelvic morphology can vary. Accordingly, this study failed to demonstrate a clear predominant role of either STA or PI in the etiology of spondylolisthesis.

Figure Legends

Figure 1 – Pelvic incidence

Figure 2 – Sacral table angle

References :

1. Antonadies SB, Hammerberg KW, DeWald RI. Sagittal plane configuration of the sacrum in spondylolisthesis. *Spine* 2000;25:1085-1091.
2. Hanson DS, Bridwell KH, Rhee J, et al. Correlation of pelvic incidence with low and high-grade isthmic spondylolisthesis. *Spine* 2002;27:2026-2029.
3. Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K. Radiographic classification of L5 isthmic spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. *Spine* 2002;27:831-838.
4. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence and sagittal spino-pelvic balance: a correlation study. *Spine* 2004;29:2049-2054.
5. Marty C, Boisauvert B, Deschamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J* 2002;11:119-125.
6. 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.
7. Wang Z, Parent S, Mac-Thiong J-M, Petit Y, et al. Influence of sacral morphology in developmental spondylolisthesis. *Spine* 2008;33:2185-2191.
8. Whitesides TE, Horton WC, Hutton WC, et al. Spondylolytic 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:S12-S21.

9. Duval-Beaupère G, Schimdt 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.
10. 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
11. 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
12. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J, O'Brien M. The importance of spino-pelvic balance in L5-S1 developmental spondylolisthesis: a review of pertinent radiologic measurements. *Spine* 2005;30(6 suppl):S27-S34.
13. Mac-Thiong J-M, Labelle H, Parent S, et al. Assessment of sacral doming in lumbosacral spondylolisthesis. *Spine* 2007;32:1888-1895.
14. Österman K, Österman H. Experimental lumbar spondylolisthesis in growing rabbits. *Clin Orthop* 1996;332:274-80.
15. Lonstein JE. Spondylolisthesis in children. Cause, natural history, and management. *Spine* 1999;24:2640-8.
16. Mac-Thiong J-M, Labelle H. Spondylolysis and spondylolisthesis. In Kim DH, Betz RR, Huhn SL, Newton PO (Eds): *Surgery of the pediatric spine*. New York, NY: Thieme Medical Publishers Inc., 2007:236-256.

17. 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.
18. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, et al. Spondylolisthesis classification based on spino-pelvic alignment. Presented at the Scoliosis Research Society 44th Annual Meeting, San Antonio, USA, September 23-26, 2009.
19. Kettelkamp DB, Wright DG. Spondylolisthesis in the Alaskan Eskimo. *J Bone Joint Surg Am* 1971;53:563–6.
20. Tower SS, Pratt WB. Spondylolysis and associated spondylolisthesis in Eskimo and Athabaskan populations. *Clin Orthop* 1990;250:171–5.

Table 1 – Sacral table angle and pelvic incidence in the control and spondylolisthesis groups

	Normal (n=120)	Spondylolisthesis (n=131)
Sacral table angle	94.9±6.8°	86.1±8.4°
Pelvic incidence	48.2±11.4°	67.5±14.9°

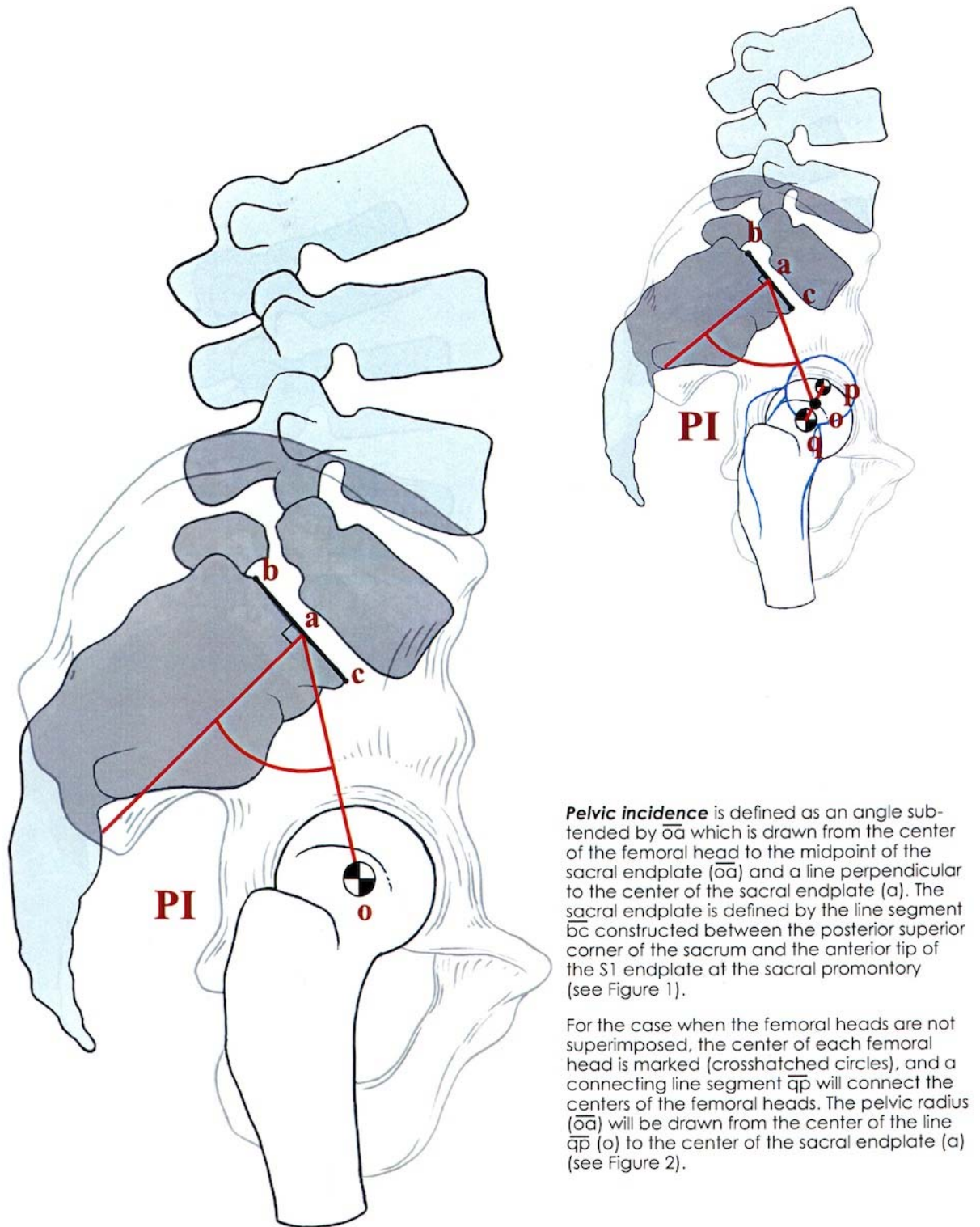
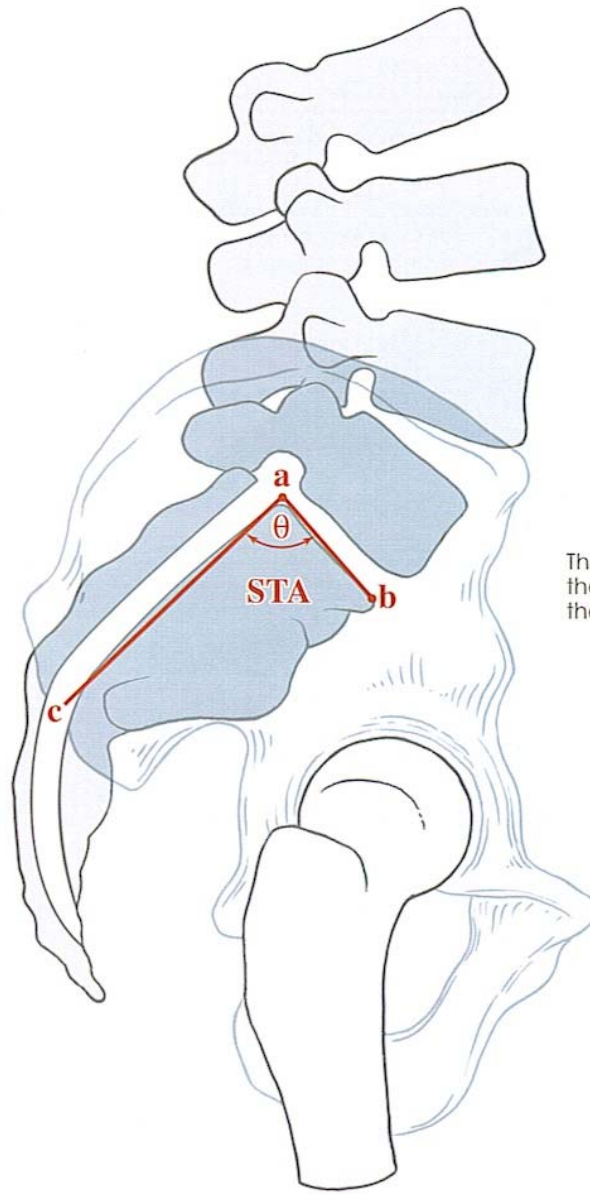


Figure 1



The Sacral Table Angle (STA) is the angle subtended by the sacral endplate line (\overline{ab}) and a line drawn along the posterior aspect of the S1 vertebral body (\overline{ac}).

Figure 2

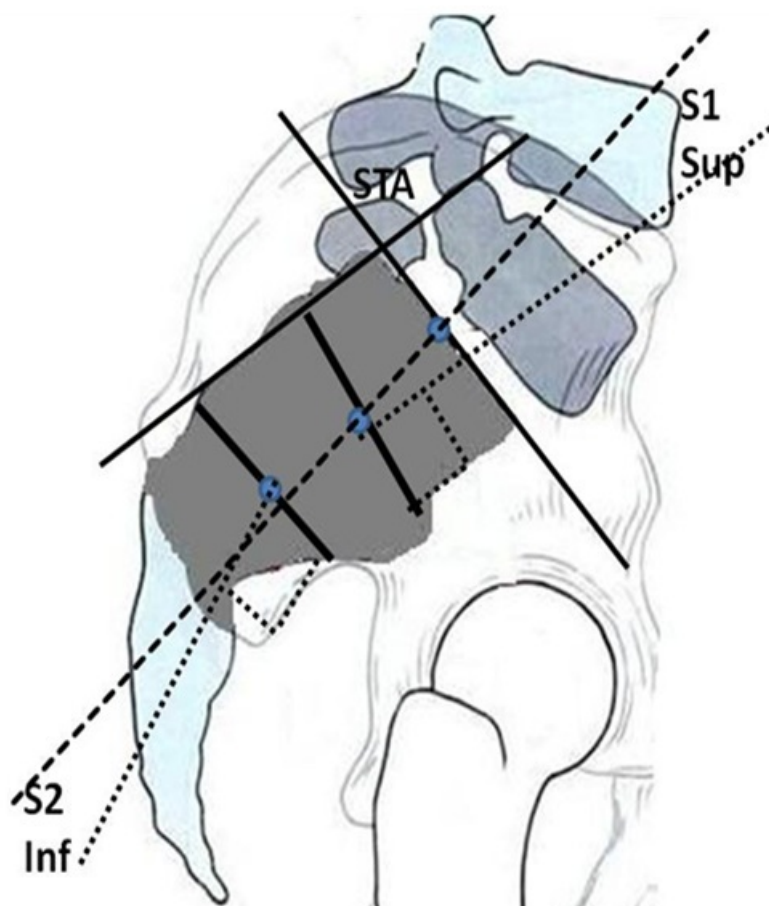
Chapitre 6 - Discussion

Au courant de la dernière décennie, plusieurs études^{2,3,10,28,39,43} ont identifié une relation entre la morphologie sagittale spinopelvienne et le spondylolisthesis. Duval-Beaupère^{1,66} a décrit l'incidence pelvienne (PI) (Figure 7) comme un paramètre constant de la morphologie pelvienne dans le plan sagittal. En conséquence, la morphologie pelvienne est devenue un facteur important à considérer dans plusieurs conditions locomotrices incluant la spondylyse et le spondylolisthesis. Plusieurs auteurs ont trouvé que la PI augmente dans la population avec le spondylolisthesis^{2,3,29,39}. De plus, Labelle et al.³ ont également identifié une corrélation significative entre l'augmentation de la PI et la sévérité de glissement. La PI est alors suggérée comme un facteur étiologique possible dans le développement du spondylolisthesis. Par contre, une étude par Huang et al.⁵⁴ n'a pas trouvé de valeurs pronostiques sur la progression du glissement dans le spondylolisthesis. Également, une étude sur des spécimens cadavériques menée par Whitesides et al.⁵ sur deux populations amérindiennes (groupe Aleut et groupe Akira) qui ont un taux d'incidence élevé de spondylolisthesis a également réfuté l'idée que le PI pourrait agir comme un facteur étiologique.

Sur un autre plan, la morphologie et l'orientation du sacrum ainsi que sa relation avec le spondylolisthesis dans le profil sagittal a suscité l'intérêt des chercheurs dans les dernières années. Antoniadis et al.⁵⁹ a rapporté une augmentation de la cyphose du sacrum dans le spondylolisthesis. Inoue et al.⁴ a identifié deux autres paramètres morphologiques qui ont un lien avec le spondylolisthesis : l'angle de la table sacrée (STA-sacral table angle) et l'indice de la table sacrée (STI-sacral table index) (Figure 8). Dans son étude qui inclut une cohorte de 367 adultes avec une moyenne d'âge de 37.5 ans et avec un faible grade de spondylolisthesis, Inoue et al rapportent que le STI est augmenté dans le groupe du spondylolisthesis (102.5%) versus le groupe contrôle (94.4%). Le STA est diminué significativement dans le groupe du spondylolisthesis (91.6°) versus le groupe contrôle (97.4°). Par la suite, l'étude sur des cadavres de Whitesides et al.⁵ se base sur trois principaux arguments pour proposer que la

morphologie du sacrum (STA) est impliquée dans l'étiologie de spondylolisthésis au lieu de la morphologie pelvienne (PI) : en premier lieu, ils ont trouvé que le STA est augmenté dans la population avec une faible incidence de défaut du pars; deuxièmement, le STA est diminué de façon significative dans les deux populations archéologiques de l'étude en présence de spondylolisthésis; finalement, l'incidence pelvienne n'est pas différente de façon significative dans l'une des deux populations de spécimens (le groupe des Aleut). Par la suite, Marty et al.⁴² ont trouvé que la différence sur la morphologie du sacrum ne se limite pas seulement sur le rebord supérieur du plateau de S1. Les auteurs ont démontrés une différence significative entre la morphologie du S1(S1A) et S2 (S2A) dans la population de spondylolisthésis lorsque comparé à un groupe contrôle (Figure 9).

Figure 9 : La vue sagittale du sacrum avec la méthode pour mesurer les paramètres sacrés : l'angle table sacrée (STA), l'angle S1 supérieure (S1 sup), l'angle S2 inférieure (S2 inf).



Il est très bien noté que dans le spondylolisthésis de grade élevé, il existe une dysplasie de degré variable sur la jonction lombosacrée : l'arrondissement du plateau supérieur du sacrum (sacral doming), l'anormalité sur l'orientation des facettes qui réagit au stress osseux et l'augmentation de la cyphose. Tous ces changements adaptatifs peuvent rendre l'identification des marqueurs anatomiques par la radiologie très difficile. Aucune étude dans la littérature n'a vérifié la fiabilité des paramètres

du sacrum en présence de la dysplasie du sacrum dans le spondylolisthesis L5-S1. Ainsi, avant de poursuivre d'autres études sur l'influence de la morphologie sacrée sur le spondylolisthesis, nous devrions nous assurer que la fiabilité de mesures de ces angles soit préservée malgré la présence de la dysplasie du sacrum. La méthode de mesure des angles assistée par ordinateur a déjà été prouvée supérieure lorsque comparée à la méthode traditionnelle de tracé manuel^{62,64}. Notre objectif principal du premier article est d'évaluer et comparer la fiabilité inter et intra-observateurs des différents paramètres sagittaux du sacrum dans un groupe de grade élevé de spondylolisthesis, d'un groupe de faible grade de spondylolisthesis et d'un groupe normal.

La première étude consiste à faire mesurer par trois évaluateurs trois séries de dix radiographies incluant des spondylolisthesis de haut grade, des spondylolisthesis de bas grade et d'un groupe de contrôle normal. L'analyse est répétée après un intervalle de quinze jours et les radiographies sont à nouveau mélangées avant l'analyse. Nous avons remarqué que l'écart type a une tendance à augmenter avec l'apparition de la dysplasie osseuse chez le spondylolisthesis de haut grade. Mais la différence n'est pas statistiquement significative. La fiabilité intra-observateur et inter-observateur de toutes les mesures (STA, STI, S1A, S2A, et la Kyphose) est évaluée par les ICCs. La fiabilité est excellente sur toutes les mesures assistées par ordinateur jugé par une ICC qui varie de 0.95-0.99. La valeur d'ICC démontre une tendance de diminution lors de la présence de déformation lombosacrée dans le groupe de spondylolisthesis de haut grade. Par contre la différence n'est statistiquement significative. Nous avons ainsi conclu que la méthode de mesure de l'anatomie du sacrum assistée par ordinateur est fiable et précise malgré la présence de la déformation secondaire lorsque les évaluateurs utilisent la même méthode recommandée par le SDSG⁶⁷.

Certaines lacunes ont été remarqués dans les études antérieures sur la morphologie du sacrum. L'étude par Inoue et al.⁴ a rapporté une différence significative sur la morphologie du sacrum dans leur population de spondylolisthesis. Par contre, leur

population d'étude consiste seulement en des adultes avec un âge moyen de 37,5 ans. L'utilisation d'une population d'adultes introduit un facteur confondant important étant donné que les changements secondaires (ex. dégénératif) sont additionnés aux anomalies développementales primaires. De plus, la population contrôle utilisée dans leur étude consiste en des adultes qui consultent pour des lombalgies. Ceci ne peut pas être considéré un groupe contrôle normal puisque certaines études ont démontré une corrélation significative entre l'alignement sagittal et la lombalgie^{68,69}. Dans l'étude sur des cadavres de Whitesides et al, les auteurs sont incapables de déterminer l'âge et le type de spondylolisthésis dans leurs spécimens. Également, le pourcentage de glissement ne peut pas être évalué considérant que les spécimens sont tous désarticulés et ne peuvent pas être étudiés dans la position debout. Finalement, il existe aucune étude qui analyse la morphologie du sacrum dans les cas de spondylolisthésis de haut grade.

Notre deuxième travail a pour but d'évaluer l'influence qu'exerce l'anatomie sagittale du sacrum dans un large échantillon d'enfants et d'adolescents atteints du spondylolisthésis développemental. L'avantage d'utiliser une population pédiatrique est de déterminer si la morphologie du sacrum est déjà anormale à ce jeune âge. Ceci pourrait expliquer indirectement que ces changements sont primaires plutôt que secondaires. Les résultats radiologiques de 131 sujets atteints de spondylolisthésis L5-S1 ont été utilisés à partir de la base de données de la clinique de colonne de l'hôpital Ste-Justine. Parmi les 131 sujets atteints du spondylolisthésis, il y en a 91 de type bas grade et 40 de grade avancé. Nous avons obtenu également un groupe de 120 sujets asymptomatiques avec des données démographiques semblables au groupe de contrôle. Nous avons évalué tous les paramètres de la morphologie du sacrum (STA, S1A, S2A, STI, SK) et le grade de spondylolisthésis par la technique de Newman²⁴. Notre première hypothèse est que le STA et les autres mesures de la morphologie du sacrum sont anormaux chez les enfants et les adolescents présentant le spondylolisthésis développemental L5-S1 lorsque comparés à une population contrôle normale. Selon notre analyse, il y a une différence significative sur tous les paramètres sagittaux de la morphologie du sacrum entre le groupe de

spondylolisthesis et le groupe contrôle. La différence demeure significative malgré que le groupe de spondylolisthesis a été sous-divisé en haut grade et bas grade. De plus, la différence persiste de même lorsque nous comparons le groupe de haut grade et le groupe de bas grade. Ces trouvailles confirment que la morphologie du sacrum est différente chez les sujets avec le spondylolisthesis L5-S1.

Cette deuxième étude est la plus grande jusqu'à présent dans la littérature sur la morphologie du sacrum dans le spondylolisthesis développemental de sévérité variant de grade I à grade V. Notre deuxième hypothèse est la suivante : il existe une corrélation entre les mesures de la morphologie du sacrum et la sévérité du glissement dans le spondylolisthesis L5-S1. Notre analyse démontre une corrélation négative significative ($R=-0.68$) entre le STA et le pourcentage de glissement. Cette corrélation signifie que plus la sévérité de glissement augmente, plus le STA diminue. Cette relation supporte davantage l'hypothèse qu'une faible valeur du STA favorise ou au moins augmente la progression du glissement chez les sujets atteints du spondylolisthesis L5-S1. Sur un point de vue biomécanique, le sacrum agit comme un double bras de levier qui est fixé sur la colonne et le bassin par les ligaments sacro-iliaques et les ligaments lombosacrés. Chez un sujet en position debout, un angle de STA augmenté signifie une pente sacrée diminuée. Cette dernière transforme à un plus faible niveau la force de cisaillement dans la jonction lombosacrée. Ainsi, un STA augmenté peut être un facteur de protection et un STA diminué déterminé par la génétique peut être un facteur étiologique chez les sujets avec le spondylolisthesis L5-S1 développemental.

La troisième hypothèse, l'anomalie du sacrum ne se limite pas seulement au plateau supérieur du S1, mais s'étend sur tout le sacrum. Cette observation est justifiée par la différence significative sur les angles S1A (i.e. la morphologie du S1), S2A (la morphologie du S2) et la cyphose sacrée dans la population présentant le spondylolisthesis L5-S1. Cette trouvaille remet en question la théorie du remodelage sur l'anomalie du sacrum qui devrait seulement se limiter sur le plateau du S1 supérieur. Plusieurs auteurs croient que la difformité du sacrum est

probablement causée par la force compressive sur le plateau supérieur du S1 qui, par conséquent, cause une croissance anormale endochondrale selon la loi Heuter-Volkman^{5,55}. Nous offrons quatre arguments qui s'opposent à cette croyance provenant des données énumérées dans notre deuxième article : 1) Contrairement aux autres études, nous avons utilisé une population pédiatrique qui présente peu de changements d'adaptation, et ceci amène à conclure que ces changements sont probablement primaires; 2) Également, chez nos sujets de spondylolisthesis de bas grade, où les changements d'adaptation sont minimes, la morphologie du sacrum demeure significativement différente lorsque comparée au groupe contrôle normal; 3) La forte corrélation négative entre le STA et le pourcentage de glissement chez les sujets avec le spondylolisthesis L5-S1 renforce l'importance de ceci ; 4) De plus, si les changements sont de type adaptatifs comme les autres le présument, les changements devront se limiter au plateau supérieur de S1, mais nos données ont démontré clairement que la morphologie sacrée est anormale sur toute sa longueur. Les raisons énumérées ci-haut sont des preuves indirectes que le STA pourrait être un facteur étiologique dans le spondylolisthesis L5-S1. La seule manière de prouver ceci de façon définitive est de faire une étude longitudinale et prospective.

Nos études, parmi nombreuses autres études sur la morphologie sagittale du sacropelvienne ou du sacrum confirme l'importance de celle-ci sur le spondylolisthesis. Par conséquent, la contribution et l'importance relative de chacune sur le spondylolisthesis est toujours inconnue. Le but de notre troisième article est d'évaluer et de comparer l'influence de la morphologie du sacrum et sacropelvienne sur le spondylolisthesis L5-S1 développemental. De façon plus spécifique, nous essayons de déterminer la relation exacte entre la morphologie du sacrum (STA) et la morphologie pelvienne (PI) sur la population normale et présentant le spondylolisthesis.

Nous avons fait des analyses statistiques avec la corrélation de Pearson avec le STA et le PI sur notre groupe de contrôle et notre groupe avec spondylolisthesis. Le STA est relié significativement avec le PI dans les deux groupes: groupe contrôle ($r=-.43$,

$p < 10^{-06}$) et groupe avec spondylolisthésis ($r = -0.57, < 10^{-06}$). La relation entre les deux variables est plus importante avec l'apparition du spondylolisthésis. Nous avons fait une corrélation partielle sur chacune des variables (STA ou PI) avec le pourcentage de glissement tout en contrôlant l'autre variable. Ce test permet de déterminer si STA ou la PI sont individuellement reliés au degré de sévérité du glissement. Suite à notre analyse, lorsque la PI est contrôlée, le STA demeure significativement relié au pourcentage de glissement ($r = -0.32, < 10^{-03}$). Par contre, lorsque le STA est contrôlé, la PI ne retient plus de relation avec le degré de glissement. Face à ces faits, nous croyons que le STA est probablement plus important que la PI dans le spondylolisthésis L5-S1 développemental, pour ceci, le STA devrait être plus souvent anormal lorsque le PI ne l'est pas. Dans notre population de spondylolisthésis, il y a 25% de sujets qui ont un STA normal mais se présente avec une PI anormale; contrairement à notre hypothèse, il y a seulement 9% des sujets avec une PI normale, mais qui présente avec un STA anormal. Ces trouvailles ne supportent pas le rôle prédominant du STA lorsque comparé avec le PI.

La morphologie pelvienne décrit par le PI dépend de la relation des deux têtes fémorales avec la position du plateau supérieur du sacrum qui est représentée partiellement avec le STA. Reconnu par Whitesides et al.⁵, PI devrait être influencée par la valeur du STA. Avec cette étude, nous avons pu confirmer la relation attendue qui existe entre la morphologie sacrée et pelvienne et l'importance des deux variables dans le spondylolisthésis. Malheureusement, cette étude ne peut pas démontrer clairement si le STA et le PI pourrait avoir un rôle étiologique dans le spondylolisthésis. Néanmoins, l'étude confirme l'importance des deux variables dans l'évaluation de la progression du spondylolisthésis L5-S1 à partir du moment de son apparition.

Conclusions et perspectives

Il y a un intérêt grandissant dans la littérature pour l'alignement sacropelvien parce qu'il est reconnu comme un élément à considérer dans les différentes conditions spinales comme le spondylolisthésis. La morphologie du sacrum représentée par le STA est devenue le centre d'intérêt pour son rôle dans l'étiologie, l'évolution et le pronostic sur le spondylolisthésis. Nous avons donc concentré nos efforts afin d'étudier et d'établir le rôle exact du STA dans le spondylolisthésis développemental en utilisant une population pédiatrique.

Nous avons en premier lieu prouvé qu'il est fiable de mesurer les angles morphologiques du sacrum assisté par ordinateur malgré la présence de changements d'adaptation dans les cas de spondylolisthésis de haut grade. Nous recommandons aux cliniciens et aux chercheurs d'utiliser la méthode recommandée par le SDSG pour évaluer le plateau supérieur du sacrum¹⁰. Les résultats supportent l'utilisation de l'ordinateur pour les mesures morphologiques du sacrum et son usage peut être recommandé pour l'évaluation et les futures recherches sur la balance sagittale.

En comparant l'anatomie du sacrum dans le spondylolisthésis développemental avec un groupe contrôle similaire, nous avons affirmé avec concordance l'importance de la morphologie du sacrum dans cette affection spinale. L'importance du sacrum est confirmé par les trois principales trouvailles de notre deuxième étude : 1) Le STA qui représente la morphologie du sacrum est significativement diminué dans la population avec le spondylolisthésis lorsque comparé avec la population contrôle; 2) Le STA diminue progressivement avec l'augmentation de la sévérité du glissement dans le spondylolisthésis ; 3) Le sacrum entier est affecté par le spondylolisthésis parce que nous avons remarqué une différence sur le sacrum segmentaire et global.

La troisième étude a aidé à mieux comprendre la relation sacropelvienne dans le spondylolisthésis. Nous avons confirmé que le sacrum est relié à la morphologie

pelvienne et cette relation devient encore plus remarquable en présence du spondylolisthesis developpemental.

La restriction majeure de nos études est sa nature rétrospective qui ne peut pas affirmer si la morphologie du sacrum pourrait agir comme un élément étiologique dans le spondylolisthesis développemental. Par contre, il est possible qu'un STA diminué puisse être relié à un risque augmenté de progression du spondylolisthesis parce qu'il est associé à la sévérité du glissement. Seulement une étude prospective et longitudinale pourrait clairement déterminer le rôle exact de la morphologie sacrée dans le spondylolisthesis.

Nous n'avons pas inclus l'aspect clinique du spondylolisthesis dans nos études. La présentation clinique des sujets avec le spondylolisthesis est très variable. Un patient avec le spondylolisthesis de haut grade peut se présenter avec peu de symptômes et contrairement, un patient souffrant énormément peut présenter un spondylolisthesis de grade I. Nous nous demandons si la balance sagittale pourrait avoir une corrélation avec la présentation clinique. Nous proposons d'analyser les angles sacropelviennes avec les valeurs obtenues sur le SF-36, l'échelle analogue de la douleur et la satisfaction des patients. Encore une fois, ceci pourrait renforcer l'importance de la morphologie sacropelvienne dans le spondylolisthesis.

Malgré nos efforts, nous ne pouvons pas déterminer si la morphologie du sacrum pourrait jouer un rôle plus important que la morphologie pelvienne dans le spondylolisthesis. Néanmoins, nous savons maintenant qu'ils partagent un lien non-négligeable dans le spondylolisthesis. Pour un clinicien qui ne possède pas de logiciels pour évaluer la morphologie sagittale, il pourrait être laborieux de mesurer plusieurs angles manuellement. Nous nous demandons s'il n'est pas possible de déduire un nouvel angle qui pourrait englober la composante de la morphologie du sacrum et du bassin. Une étude sera également nécessaire pour évaluer indépendamment la valeur de cet angle dans le spondylolisthesis.

Nous croyons qu'il reste beaucoup de terrain non-exploré dans le domaine de la balance sagittale, et sa relation avec différentes affections spinales incluant le spondylolisthesis. Avec nos études en concordance avec les études antérieures, la morphologie du sacrum a un rôle crucial à jouer dans l'évaluation, le suivi et peut-être le traitement sur le spondylolisthesis. Les mesures de la morphologie du sacrum et du bassin devront être incluses dans l'évaluation clinique du spondylolisthesis.

Références

1. Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, et al. Pelvic incidence : a fundamental pelvic parameter for 3D regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J* 1998;7:99-103.
2. Hanson DS, Bridwell KH, Rhee J, et al. Correlation of pelvic incidence with low and high-grade isthmix spondylolisthesis. *Spine* 2002;27:2026-9.
3. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence and sagittal spino-pelvic balance : a correlation study. *Spine* 2004;29:2049-54.
4. Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K. Radiographic classification of L5 isthmic spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. *Spine* 2002;27:831-838.
5. Whitesides T.E., Horton W.C., Hutton W.C., et al. Spondylolytic 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:S12-S21.
6. Taillard W. Spondylolisthesis in children and adolescents. *Acta Orthop Scand.* 1954;24(2): 115-44. French.
7. Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, Yuan HA, Lubicky JP: The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1984;66:699-707.
8. Rosenberg NJ, Bargar WL, Friedman B: The incidence of spondylolysis and spondylolisthesis in nonambulatory patients. *Spine* 1981;6:35-38.
9. Marchetti PG, Bartolozzi P. Classification of spondylolisthesis as a guideline for treatment. In: Bridwell KW, de Wald RI, eds. *The Textbook of Spinal Surgery*, 2nd ed. Philadelphia: Lippincott-Raven, 1997:1211-54.
10. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J, O'Brien M. The importance of spino-pelvic balance in L5-s1 developmental spondylolisthesis: a review of pertinent radiologic measurements. *Spine* 2005;30(6 suppl):S27-34.
11. Cavalier R, Herman MJ, Cheung EV et al. Spondylolysis and spondylolisthesis in children and adolescents: I. Diagnosis, natural history, and nonsurgical management. *J Am Acad Orthop Surg.* 2006;14 (7):417-24.
12. Cheung EV, Herman MJ, Cavalier R, Pizzutillo PD. Spondylolysis and spondylolisthesis in children and adolescents: II. Surgical management. *J Am Acad Orthop Surg.* 2006;14(8):488-98.
13. Turner Rh, Bianco AJ jr : Spondylolysis and spondylolisthesis in children and teen-agers. *J Bone Joint Surg Am* 1971 ;53 :1298-1306.
14. Wiltse LL : The etiology of spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg AM* 1962 ;44 :539-560.
15. Albanese M, Pizzutillo PD : Family study of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1982 ;2 :496-499.

16. Congenti J, McMculloch J, Swanson K : Lumbar spondylolysis : A study of natural progression in athletes. *Am J Sports Med* 1997 ;25 :248-253.
17. Micheli LJ, Wood R : Back pain in young athletes. *Arch Pediatr Adolesc Med* 1995 ;149 :15-18.
1814. Stewart TD : The age incidence of neural-arch defects in Alaskan natives, considered from the standpoint of etiology. *J Bone Joint Surg AM* 1953 ;35 :937-950.
19. Kettlekamp DB, Wright DG, Spondylolisthesis in the Alaskan Eskimo. *J Bone Joint Surg AM* 1971 ;53 :563-6.
20. Newman PH : The etiology of spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Br* 1963 ;61 :479-495.
21. Boxall D, Bradford DS, Winter RB, Moe JH : Management of severe spondylolisthesis in children and adolescents. *J Bone Joint Surg Am* 1979 ;61 :479-495.
2215. Wiltse LL, Widell EH Jr, Jackson DW : Fatigue fracture : The basic lesion in isthmic spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg AM* 1975;57:17-22.
23. McPhee IB, O'Brien JP, McCall IW, Park WM: Progression of lumbosacral spondylolisthesis. *Australas radio* 1981;25:91-95
24. Newman PH: A clinical syndrome associated with severe lumbo-sacral subluxation. *J Bone Joint Surg Br* 1965;47:472-481.
25. Hensinger RN, Lang JR, MacEwen GD: Surgical management of spondylolisthesis in children and adolescents. *Spine* 1976; 1:207-21.
26. Meyerding HW: Spondylolisthesis. *Surg Gynecol Obstet* 1932;54:371-377.
27. 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.
28. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence and sagittal spino-pelvic balance : a correlation study. *Spine* 2004;29:2049-54.
29. 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.
30. Nash CL, Gregg EC, Brown RH, Pillai K. Risks of exposure to x rays in patients undergoing long-term treatment for scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 1979; 61:371-374.
31. Hoffman DA, Lonstein JE, Morin MM, Visscher W, Harris BS 3d, Boice JD Jr. Breast cancer in women with scoliosis exposed to multiple diagnostic x rays. *J Natl Cancer Inst* 1989; 81:1307-1312.
32. Dao T-V, Labelle H, Le Blanc R. Variabilité intra-observateur de la mesure de la posture à l'aide d'un numérisateur tridimensionnel. *Ann Chir* 1997; 51:848-853.
33. 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.

34. Lusins JO, Elting JJ, Cicoria AD et al. SPECT evaluation of lumbar spondylolysis and spondylolisthesis. *Spine* 1994; 19:608-612.
35. During J, Goudfrooij 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.
36. Jackson RP, McMannus AC. Radiographics analysis of sagittal plane alignment and balance in standing volunteer and patients with low back pain matched for age, sex and size. A prospective controlled clinical study. *Spine* 1994; 19:1611-1618.
37. Harrison DD, Cailliet R, Janik TJ et al. Elliptical modeling of the sagittal lumbar lordosis and segmental rotation angles as a method to discriminate between normal and low back pain subjects. *J Spinal Disord* 1998; 11:430-439.
38. Jackson RP, Peterson 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 adults volunteers and patients. *Spine* 1998; 23:1750-1767.
39. Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:151-60.
40. Mangiome P, Gomez D, Senegas J. Study of the course of the incidence angle during growth. *Eur Spine J* 1997;6:163-167.
41. MacThiong JM, Labelle H, Berthonnaud E, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine* 2004; 29:1642-7.
42. Marty C, Boisauvert B, Deschamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J* 2002;11:119-25.
43. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J, O'Brien M. The importance of spino-pelvic balance in L5-s1 developmental spondylolisthesis: a review of pertinent radiologic measurements. *Spine* 2005;30(6 suppl):S27-34.
44. 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.
45. Anderson K, Sarwark JF, Conway JJ, et al. Quantitative assessment with SPECT imaging of stress injuries of the pars interarticularis and response to bracing. *J Pediatr Orthop* 2000; 20:28-33.
46. Blanda J, Berthem D, Moats W, Lew M. Defects of pars interarticularis in athletes : A protocol for nonoperative treatment. *J Spinal Disord* 1993; 6:406-411.
47. O'Sullivan PB, Phyt GDM, Twomey LT et al. Evaluation of specific stabilizing exercises in the treatment of chronic low back pain with radiographic diagnosis of spondylolysis or spondylolisthesis. *Spine* 1997; 22:2959-2967.
48. Pizzutillo PD, Hummer CD 3rd. Nonoperative treatment for painful adolescent spondylolysis and spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1989; 9:538-40.

49. Bell DF, Ehrlich MG, Zaleske DJ. Brace treatment for symptomatic spondylolisthesis. *Clin Orthop Relat Res* 1988; 236:192-198.
50. Cyron BM, Hutton WC. The fatigue strength of the lumbar neural arch in spondylolysis. *J Bone Joint Surg Br* 1978;60:234-48.
51. Hutton WC, Stott JRR, Cyron BM. Is spondylolisthesis a fatigue fracture? *Spine* 1977;2:202-9.
52. Cyron BM, Hutton WC, Troup JD. Spondylolytic fractures. *J Bone Joint Surg Br* 1976;58:462-6
53. Cyron BM, Hutton WC. Variations in the amount and distribution of cortical bone across the partes interarticulares of L5: a predisposing factor in spondylolysis? *Spine* 1979;4:163-7.
54. Huang RP, Bohlman HH, Thompson GH, et al. Predictive value of pelvic incidence in spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:2381-5.
55. 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;24:94-8.
56. Kajiura K, Katoh S, Sairyo K, et al. Slippage mechanism of pediatric spondylolysis: biomechanical study using immature calf spines. *Spine* 2001;26:2208-13.
57. Haer TR, Gorup JM, Shin TM, Homel P, Merola AA, Grogan DP, et al. Results of the Scoliosis Research Society Instrument for evaluation of surgical outcome in adolescent idiopathic scoliosis. A multicenter study of 244 patients. *Spine* 1999; 24:1435-1440.
58. 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;28:645-50.
59. Antonaides SB, Hammerberg KW, DeWald RI. Sagittal plane configuration of the sacrum in spondylolisthesis. *Spine* 2000;25:1085-91.
60. Humke T, Grob D, Scheier H, Siegrist H. Cotrel-Dubousset and Harrington instrumentation in idiopathic scoliosis: a comparison of long-term results. *Eur Spine J* 1995; 4:280-283.
61. Inami K, Suzuki N, Ono T, Yamashita Y, Kouno K, Fujimura A. Analysis of posterior trunk symmetry index (POTSI) in scoliosis. Part 2. Dans : Stokes IAF, éditeur. Research into spinal deformities 2, vol. 59. IOS Press, Amsterdam, 1999, p. 85-88.
62. Berthonnaud E, Roussouly P, Dimnet J. The parameters describing the shape and the equilibrium of the set back pelvis and femurs in sagittal view. *InnovTech Biol Med* 1998;19:411-26.
63. Newman PH. A clinical syndrome associated with severe lumbosacral subluxation. *J Bone Joint Surg Br* 1965;47:472-81.
64. Berthonnaud E, Labelle H, Grimard G, et al. A variability study of computerized sagittal spinopelvic radiologic measurements of trunk balance. *J Spinal Disord Tech.* 2005 :18:66-71.
65. Österman K, Österman H. Experimental lumbar spondylolisthesis in growing rabbits. *Clin Orthop* 1996;332:274-80.

66. Duval-Beaupère G, Schimdt 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.
67. Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, et al. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J* 2002;11:80-7.
68. 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;25:575-86.
69. Labelle H, Dansereau J, Bellefleur C, de Guise JA, Rivard C-H, Poitras B. Peroperative three-dimensional correction of idiopathic scoliosis with the Cotrel-Dubousset procedure. *Spine* 1995; 20:1406-1409.
70. Lagrone MO, Bradford DS, Moe JH, Lonstein JE, Winter RB, Ogilvie JW. Treatment of symptomatic flatback after spinal fusion. *J Bone Joint Surg Am* 1988; 70:569-580.
71. Laine T, Schlenzka D, Makitalo K, Tallroth K, Nolte L-P, Visarius H. Improved accuracy of pedicle screw insertion with computer-assisted surgery. A prospective clinical trial of 30 patients. *Spine* 1997; 22:1254-1258.
72. Lavallée S, Szeliski R. Recovering the position and orientation of free-form objects from image contours using 3D distance maps. *IEEE Trans Patt Anal Machine Intell* 1995; 17:378-390.
73. Huang RP, Bohlman HH, Thompson GH et al. Predictive value of pelvic incidence in spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:2381-5.
- 74. Fabris D, Costantini S, Nena U, Lo Scalzo V (1999) Traumatic L5-S1 spondylolisthesis: report of three cases and a review of the literature. Eur Spine J 8 : 290-5**
- 75. Meyerding H (1932) Spondylolisthesis. Surg Gynecol Obstet 54 : 371-377**
- 76. Duprez T, Mailleux P, Bodart A, Coulier B, Malghem J, Maldague B (1999) Retrodural cysts bridging a bilateral lumbar spondylolysis: a report of two symptomatic cases. J Comput Assist Tomogr 23 : 534-7.**
- 77. Heggenes MH, Esses SI, Kostuik JP (1991) Acquisition of lytic spondylolisthesis in the adult. J Spinal Disord 4 : 486-9.**

