

Université de Montréal

Spondylolisthésis, morphologie et orientation sacro-pelviennes chez une population de
jeunes gymnastes

Par

Charles-William Toueg

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

option Musculosquelettique

Février 2012

© Charles-William Toueg, 2012

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :
Spondylolisthesis, morphologie et orientation sacro-pelviennes chez une population de
jeunes gymnastes

Présenté par :
Charles-William Toueg

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Alain Jodoin / Pascal-André Vendittoli (Président-rapporteur)

Jean-Marc Mac-Thiong (Directeur de recherche)

Hubert Labelle (Co-directeur)

Jean Ouellet / Marc Isler (Membre du jury)

SOMMAIRE

De multiples études ont rapporté une prévalence augmentée de spondylolyse et de spondylolisthesis chez certains groupes d'athlètes, en particulier les gymnastes^{1,2}, pouvant atteindre jusqu'à 40 à 50%³. À cela s'ajoute le fait que plusieurs études récentes ont démontré une association entre le spondylolisthesis et une morphologie et orientation sacro-pelviennes déviante de la normale. La morphologie et l'orientation sacro-pelviennes chez les gymnastes ainsi que leur relation avec le spondylolisthesis n'ont jamais été analysées.

L'objectif de cette étude était donc d'évaluer la prévalence du spondylolisthesis au sein d'une cohorte de gymnastes ainsi que les caractéristiques démographiques et paramètres de morphologie et orientation sacro-pelviennes associés. Afin d'atteindre cet objectif, une évaluation des caractéristiques démographiques et des paramètres radiologiques d'une cohorte de 92 jeunes gymnastes a été menée.

Les deux études présentées ont démontré une prévalence de spondylolisthesis chez les jeunes gymnastes de 6.5%, similaire à celle retrouvée dans la population générale. Le nombre d'heures d'entraînement hebdomadaire a été le seul facteur statistiquement différents entre les gymnastes avec et ceux sans spondylolisthesis. Nos résultats ont aussi démontré que les gymnastes atteints d'un spondylolisthesis présentent une morphologie et une orientation sacro-pelviennes sagittales différentes, en terme d'incidence pelvienne ($p = 0.02$) et d'angle de table sacrée ($p = 0.036$), de celles des gymnastes sans spondylolisthesis. Nos observations supportent donc l'importance du rôle de la

morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes dans le développement du spondylolisthésis.

MOTS CLÉS

Spondylolyse

Spondylolisthesis

Morphologie

Incidence pelvienne

Angle de table sacrée

Bassin

Sacrum

Lombo-sacrée

SUMMARY

Multiple studies have reported an increased prevalence of spondylolysis and spondylolisthesis in certain groups of athletes, including gymnasts^{1,2}, where it can reach as high as 40 to 50%³. Numerous studies have shown that sagittal sacro-pelvic morphology and orientation is different in spondylolisthesis. Sacro-pelvic morphology and orientation in gymnasts and their relationship with spondylolisthesis have never been analyzed.

The purpose of this study was to evaluate the prevalence of spondylolisthesis in a cohort of gymnasts, as well as the associated demographic characteristics and sacro-pelvic morphology and orientation. In order to achieve our goal, an evaluation of different demographic characteristics and radiological parameters was performed on a cohort of 92 young gymnasts.

A 6.5 % prevalence of spondylolisthesis was found. The weekly training schedule was the only statistically significant different demographic characteristic between the two groups, with and without spondylolisthesis. Our results have also shown that sagittal sacro-pelvic morphology and orientation, in terms of pelvic incidence ($p = 0.02$) and sacral table angle ($p = 0.036$), is different between gymnasts with and without spondylolisthesis. In conclusion, our observations support the importance of sacro-pelvic morphology and orientation in spondylolisthesis.

KEYWORDS

Spondylolysis

Spondylolisthesis

Morphology

Pelvic incidence

Sacral table angle

Pelvis

Sacrum

Lumbosacral spine

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 – REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 PRÉSENTATION DU SPONDYLOLISTHÉSIS LOMBAIRE.....	7
1.1.1 Épidémiologie	7
1.1.2 Présentation clinique	8
1.2 CLASSIFICATION	9
1.3 ÉTIOLOGIE DU SPONDYLOLISTHÉSIS DÉVELOPPEMENTAL LOMBOSACRÉ	17
1.3.1 Prédispositions héréditaires	18
1.3.2 Traumatismes et facteurs biomécaniques	18
1.3.2.1 Études chez l’athlète.....	19
1.3.3 Morphologie sacro-pelvienne et équilibre spino-pelvien	21
1.3.4 Développement osseux, anomalies de la plaque de croissance et dysplasie osseuse.....	26
1.4 HISTOIRE NATURELLE ET PROGRESSION DU SPONDYLOLISTHÉSIS ..	27
1.5 ÉVALUATION DU SPONDYLOLISTHÉSIS	29
1.5.1 Évaluation clinique	29
1.5.2 Évaluation radiologique de base	31
1..5.3 Examens radiologiques complémentaires	39
CHAPITRE 2 – OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES.....	41
2.1 RÉSUMÉ DE LA PROBLÉMATIQUE	41
2.2 OBJECTIF GLOBAL	43
2.3 HYPOTHÈSES	43
2.4 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES	44
2.5 PRÉSENTATION DES ARTICLES	44
CHAPITRE 3 – MATÉRIEL, MÉTHODE ET RÉSULTATS.....	46
3.1 MATÉRIEL ET MÉTHODE	46
3.1.1 Statistiques	48
3.2 RÉSULTATS	49

CHAPITRE 4 – ARTICLE 1: PREVALENCE OF SPONDYLOLISTHESIS IN A POPULATION OF GYMNASTS	53
CHAPITRE 5 – ARTICLE 2: SPONDYLOLISTHESIS, SACRO-PELVIC MORPHOLOGY AND ORIENTATION IN YOUNG GYMNASTS	59
CHAPITRE 6 – DISCUSSION	82
CHAPITRE 7 - CONCLUSIONS	93
RÉFÉRENCES.....	95
ANNEXES	105

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I – Système de classification du spondylolisthésis par Wiltse et al.	10
Tableau II – Système de classification du spondylolisthésis par Marchetti-Bartolozzi	12
Tableau III – Classification du spondylolisthésis développemental de bas grade selon Mac-Thiong et Labelle.....	13
Tableau IV – Classification du spondylolisthésis développemental de haut grade selon Mac-Thiong et Labelle.....	13
Tableau V – Classification du spondylolisthésis développemental de bas grade selon le Spinal Deformity Study Group (SDSG)	15
Tableau VI – Classification du spondylolisthésis développemental de haut grade selon le Spinal Deformity Study Group (SDSG)	16

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Spondylolyse et Spondylolisthésis	4
Figure 2 – Ligne de plomb sagittale à partir de C7.....	32
Figure 3 – Angle de Cobb.....	33
Figure 4 – Classification de Meyerding.....	35
Figure 5 – Angle de glissement	36
Figure 6 – Incidence pelvienne (PI), version pelvienne (PT), pente sacrée (SS)	38
Figure 7 – Angle de table sacrée (STA)	39

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CT scan : tomographie axiale assistée par ordinateur

LAT : latéral

PA : postéro-antérieur

PI : incidence pelvienne

PT : version pelvienne

RMN : Résonance magnétique

SDSG : Spinal Deformity Study Group

SPECT : tomographie à émission monophotonique

SRS : Scoliosis Research Society

SS: pente sacrée

STA: angle de table sacrée

REMERCIEMENTS

Premièrement, je voudrais remercier mes directeur et co-directeur de recherche, les Drs Jean-Marc Mac-Thiong et Hubert Labelle pour m'avoir attribué ce sujet original et pour la confiance qu'ils m'ont témoignée tout au long de cette maîtrise. Ils ont su me conseiller et me guider à travers ce long processus, et ont contribué de façon inestimable à ma formation scientifique.

Je tiens également à remercier le personnel du centre de recherche et de la clinique externe d'orthopédie de l'hôpital Sainte-Justine. J'aimerais en particulier remercier les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation des articles contenu dans ce mémoire, soit Dr Guy Grimard, Dr Benoit Poitras, Dr Stefan Parent et Julie Joncas. À cela s'ajoute un remerciement bien particulier aux entraîneurs ainsi qu'aux gymnastes et à leurs parents provenant des deux centres de gymnastiques dans lesquels notre étude a pris place.

Ce travail de recherche a été financé par le Fonds de Recherche en Santé du Québec (FRSQ), le programme MENTOR des IRSC sur les troubles de la mobilité et de la posture et la Fondation de Recherche et d'Éducation en Orthopédie de Montréal (FRÉOM).

Finalement, j'aimerais remercier chaleureusement ma famille pour la compréhension, le support et la patience dont ils m'ont fait preuve durant ce long cheminement.

INTRODUCTION

La colonne vertébrale est une structure osseuse flexible qui supporte et transmet le poids du corps jusqu'au bassin et aux hanches. La colonne vertébrale comprend 5 segments : le rachis cervical (C1 à C7), le rachis thoracique (T1 à T12), le rachis lombaire (L1 à L5), le rachis sacré (S1 à S5) et le rachis coccygien composé de 4 ou 5 vertèbres coccygiennes. Dans le plan sagittal, la colonne vertébrale présente deux courbures primaires, aussi appelées cyphoses, au niveau des rachis thoracique et sacré, ainsi que deux courbures secondaires appelées lordoses au niveau des rachis cervical et lombaire.

La structure osseuse d'une vertèbre se compose d'une partie antérieure, le corps vertébral et d'un arc postérieur composé d'éléments postérieurs. Le corps vertébral, os court de forme cylindrique, possède une surface inférieure et postérieure légèrement concaves représentant les plateaux vertébraux. Les éléments postérieurs d'une vertèbre lombaire sont constitués d'une apophyse épineuse, de deux apophyses transverses et des apophyses articulaires. L'apophyse épineuse située, sur la ligne médiane, à l'arrière de la vertèbre forme le long de la colonne vertébrale la crête osseuse appelée l'épine dorsale. Les apophyses transverses sont, quant à elles, placées de chaque côté de la vertèbre et servent de support aux insertions musculaires. En ce qui attrait aux apophyses articulaires, ces dernières forment le point d'insertion de l'anneau vertébral et assurent la stabilité de la colonne.

Une vertèbre s'articule avec les vertèbres sus et sous jacentes par l'entremise des disques

intervertebraux ainsi que par les deux paires de facettes articulaires supérieures et inférieures situées sur l'anneau vertébral. Le disque intervertébral, comprenant un noyau central, appelé nucleus pulposus, et un anneau de cartilage fibreux périphérique, appelé l'annulus fibrosus, permet la mobilité entre deux vertèbres contigües en plus d'assurer l'amortissement des forces de compression axiales. Les facettes articulaires, quant à elles, guident et limitent les mouvements du rachis.

Les complexes ligamentaires et musculaires jouent aussi un rôle non négligeable dans le maintien de la solidarité des vertèbres les unes par rapport aux autres, tout en permettant les déformations du rachis engendrées par les mouvements. Dans la région lombaire, on compte sept ligaments principaux. Le ligament longitudinal antérieur longe la colonne vertébrale du sacrum jusqu'à la base du crâne et est attaché aux corps vertébraux et aux disques intervertébraux. Il limite principalement les mouvements en extension. Le ligament longitudinal postérieur qui, quant à lui, longe le canal spinal est attaché essentiellement aux annulus fibrosus. Ce dernier limite principalement les mouvements en flexion. À cela s'ajoute, les ligaments surépineux, interépineux et intertransverses, résistant au mouvement de flexion latérale, qui établissent une liaison entre les arcs neurax et les composantes postérieures. Le ligament jaune, qui unit les lames des vertèbres entre elles pour former les articulations des facettes, résiste à la flexion et aide au maintien de la moelle épinière. Finalement, les ligaments capsulaires entourent les articulations des facettes et résistent aux mouvements extrêmes des facettes particulièrement pendant les mouvements de rotation.

Le bassin, composé du sacrum et des deux os iliaques (ilion, pubis et ichion) unis entre eux par les articulations sacro-iliaques à l'arrière et la symphyse pubienne à l'avant, a pour fonction principale de transmettre le poids corporel du tronc vers les membres inférieurs. Afin d'assurer cette fonction la zone charnière que représente l'articulation sacro-iliaque est constituée d'un réseau ligamentaires complexes. Ce réseau ne permet, au sacrum, qu'un mouvement d'inclinaison antéropostérieur, appelé version.

Une spondylolyse consiste en une atteinte de la pars interarticularis d'une vertèbre, partie la plus faible de l'arc neural^{4,5,6} se dressant entre les apophyses articulaires supérieure et inférieure. Le spondylolisthesis, quant à lui, représente le glissement d'une vertèbre (et du reste de la colonne vertébrale lui étant sus-jacente) par rapport à la vertèbre sous-jacente (Figure 1). Cette anomalie a été décrite originalement par Herbinaux⁷ un obstétricien belge, en 1782. Le terme spondylolisthesis a été, de son côté, documenté pour la première fois dans un article de 1854 par H.F. Kilian⁸. La spondylolyse et le spondylolisthesis peuvent impliquer différents segments du rachis cervico-dorso-lombaire, mais surviennent majoritairement au niveau lombosacré⁴. De cette façon, le sujet du reste de ce mémoire portera exclusivement sur le spondylolisthesis lombosacré. Une spondylolyse lombosacrée est présente chez environ 6% de la population générale et environ 75% de ces individus développeront un spondylolisthesis⁹. Quoique bon nombre des individus atteints par cette entité soit asymptomatique, la lombalgie constitue certes la principale raison de consultation exposée par les patients symptomatiques. Toutefois, il faut savoir qu'à l'occasion, le spondylolisthesis lombosacré peut progresser au point de mener à une atteinte neurologique par compression radiculaire ou de la queue de cheval.

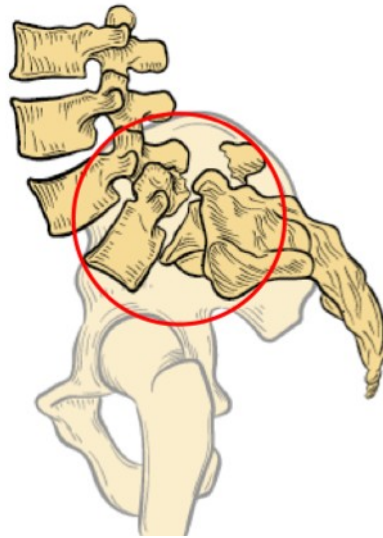


Figure 1 – Spondylolyse et Spondylolisthésis.

Dans la plupart des cas, le spondylolisthésis est léger et un traitement conservateur, axé principalement sur un traitement symptomatique, un programme de physiothérapie et parfois le port d'un corset s'avère efficace. Lorsque le spondylolisthésis devient trop sévère ou symptomatique, la déformation de la colonne vertébrale peut être stabilisée chirurgicalement le plus souvent par voie postérieure. À ce sujet, près de 200 nouveaux patients avec spondylolisthésis sont vus à chaque année au Centre Hospitalier Universitaire Sainte-Justine de Montréal et seulement environ une vingtaine d'entre eux nécessitent une chirurgie.

La cause exacte de la spondylolyse et du spondylolisthésis reste inconnue. Elle est présumée multifactorielle, impliquant des phénomènes héréditaire, traumatique, développemental, morphologique et biochimique¹⁰. Le risque de progression est le plus

élevé durant la croissance et diminue après l'atteinte de la maturité osseuse^{11,12,13,14}. Selon certains auteurs, il existe une prévalence accrue de spondylolyse et de spondylolisthésis chez certains athlètes impliqués dans des sports tels que la gymnastique^{2,15}, l'haltérophilie¹⁶ et le football américain^{17,18}, mais il demeure encore impossible de déterminer avec certitude lesquels de ces athlètes développeront ou non un spondylolisthésis.

Durant les dernières années, un intérêt marqué s'est développé dans l'évaluation de la morphologie sacro-pelvienne et de l'équilibre spino-pelvien, tant chez les sujets normaux, que chez les sujets atteints de pathologie rachidienne. Depuis le début des années 2000, il a été démontré que la morphologie et l'orientation sacro-pelviennes influencent non seulement le rachis lombosacré qui lui est intimement lié, mais également tout le rachis et par conséquent, la posture globale^{19,20}. Depuis quelques années déjà, plusieurs auteurs ont suggéré à travers l'étude de différents paramètres radiologiques qu'une différence de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes par rapport à la normale (PI, SS, PT augmentés et STA abaissé) pouvait prédisposer à des contraintes mécaniques altérées au niveau lombosacré et par conséquent à un risque accru de spondylolisthésis^{21,22,23,24,25,26,27,28}. Toutes ces études, descriptives et rétrospectives, ne permettent cependant pas d'évaluer avec justesse l'implication de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes dans le spondylolisthésis. L'une de leurs principales limitations est en rapport à l'étiologie multifactorielle du spondylolisthésis. Alors que les études passées n'ont jamais tenté de comparer des groupes similaires sur le plan des facteurs de risque environnementaux, nous croyons qu'il est essentiel, lorsque l'on évalue

la morphologie et l'orientation sacro-pelviennes du spondylolisthesis, d'obtenir un groupe de sujets homogène sur le plan de leurs activités athlétiques et du niveau de stress biomécanique auxquels ils sont soumis.

La motivation derrière ce projet de recherche est donc basée sur les observations suivantes : 1) la nécessité pour les cliniciens d'identifier les patients à risque de développer un spondylolisthesis, 2) l'absence de consensus sur les paramètres de morphologie et d'orientation sacro-pelvienne à utiliser dans l'évaluation clinique et le traitement du spondylolisthesis, 3) les études récentes démontrant des anomalies dans la morphologie et l'orientation sacro-pelvienne dans le spondylolisthesis, et 4) le développement de l'expertise de notre équipe de recherche dans l'évaluation de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes.

Ce mémoire de maîtrise comprend cinq chapitres. Le premier présente une revue de la littérature, alors que les hypothèses de travail et les objectifs spécifiques du projet sont exposés au chapitre 2. Le corps du mémoire contient les développements et résultats présentés sous forme d'articles (Chapitres 3, 4 et 5). Le premier article (Chapitre 4) étudie la prévalence du spondylolisthesis chez une population à haut risque de jeunes gymnastes ainsi que les caractéristiques démographiques associées. Le second article (Chapitre 5), en plus de reprendre ces thèmes, évalue en profondeur la morphologie et l'orientation sacro-pelviennes des gymnastes atteints et non atteints d'un spondylolisthesis. Finalement, une discussion de l'ensemble des résultats se trouve au chapitre 6.

CHAPITRE 1 – REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 PRÉSENTATION DU SPONDYLOLISTHÉSIS LOMBAIRE

1.1.1 ÉPIDÉMIOLOGIE

Croyant autrefois que le spondylolyse et le spondylolisthésis constituaient des affections congénitales, nous savons maintenant qu'ils se développent plutôt en postnatal dans la presque totalité des cas^{12,29,30,31,32,33}. En effet, aucun cas de spondylolyse à la naissance n'a jamais été rapporté. À ce sujet, le cas le plus précoce de spondylolisthésis isthmique fût noté chez un enfant de 15 semaines³⁴. Pour le rachis lombo-sacrée, la spondylolyse et le spondylolisthésis surviennent principalement au niveau L5-S1 (87%) et plus rarement aux niveaux supérieurs L4-L5 (10%) et L3-L4 (3%)^{35,36}.

Grâce à une étude prospective, Fredrickson et al.¹² ont exposé une prévalence de spondylolyse de 4.4% à 6 ans, 5.2% à 12 ans, 5.6% à 14 ans et 6% à l'âge adulte. Ils ont aussi démontré un risque augmenté de développement de spondylolisthésis chez les sujets atteints de spondylolyse en bas âge. Subséquemment, Beutler et al.¹¹ ont démontré à

partir de la même cohorte que les sujets avec un spondylolyse unilatéral ne développent pas de spondylolisthesis, contrairement à ceux atteints d'un spondylolyse bilatéral pour qui le taux de progression a tendance à diminuer graduellement avec l'âge.

La prévalence de la spondylolyse est variable en fonction du sexe et de la race. À ce sujet, aux États-Unis, Rowe et Roche³⁶ ont rapporté une prévalence de spondylolyse de 6.4% chez les hommes caucasiens, 2.3% chez les femmes caucasiennes, 2.8% chez les hommes de race noire et 1.1% chez les femmes de race noire. De plus, il est à noter que la spondylolyse est beaucoup plus fréquemment retrouvée chez les Amérindiens et les Eskimos, pouvant atteindre jusqu'à 60% dans la communauté Inuit^{37,38,39,40,41}.

1.1.2 PRÉSENTATION CLINIQUE

Plusieurs sujets avec spondylolyse et spondylolisthesis de bas-grade sont asymptomatiques¹³. La douleur est la principale raison de consultation des sujets atteints d'une spondylolyse ou d'un spondylolisthesis¹³. La douleur est typiquement localisée à la jonction lombosacrée et peut parfois irradier en postérieur au niveau des fesses et des cuisses. Bien qu'un traumatisme récent ait pu survenir, l'apparition de la douleur est plus souvent insidieuse et progressive sur plusieurs mois. Ainsi, chez l'athlète, la spondylolyse ou le spondylolisthesis peuvent survenir dans un contexte de traumatisme aigu ou plus progressivement en relation à un programme d'entraînement appliquant un stress augmenté à la jonction lombosacrée de façon répétée. Selon Lenke et Bridwell⁴², la douleur au moment de la présentation serait secondaire à l'altération de l'alignement

spino-pelvien et de la biomécanique s'y rattachant. La sténose forminale ainsi que les forces de cisaillement excessives générées au niveau de l'anneau discal secondaires à la perte d'intégrité de la pars interarticularis ont aussi été avancées afin d'expliquer la douleur ressentie par certains patients atteints d'un spondylolisthésis de bas grade. On a aussi suggéré une augmentation du risque de souffrir de lombalgie lorsque le pourcentage de glissement était supérieur à 25 %, lorsque le spondylolisthésis touchait le niveau L4-L5, lorsque la cunéiformisation de la vertèbre L5 était importante et lorsqu'il y avait présence de dégénérescence discale précoce^{43,44}.

Les patients atteints de spondylolisthésis, particulièrement avec un glissement important (>50%), peuvent présenter des symptômes neurologiques par phénomène de compression, typiquement radiculaires, unilatéraux ou bilatéraux. La compression radiculaire peut, entre autres, être causée par une sténose foraminale, par la présence de tissu fibrocartilagineux autour de la lésion isthmique ou par une hernie discale. Les spondylolisthésis, particulièrement ceux associés à une dysplasie des éléments vertébraux postérieurs sans spondylolyse, peuvent causer, par rétrécissement du canal médullaire, un syndrome de la queue de cheval ou des troubles sphinctériens en provoquant une sténose centrale.

1.2 CLASSIFICATION

Deux systèmes de classification du spondylolisthésis ont été utilisés de façon prédominante par le passé. Wiltse et al.⁴⁵, se basant sur les trouvailles radiologiques, sépare les spondylolisthésis en cinq types. Le type I (dysplasique) implique une atteinte

congénitale des facettes articulaires lombosacrées (spina bifida L5 ou S1 inclus dans ce groupe). Dans le type II (isthmique) la cause du spondylolisthesis est une anomalie de la pars interarticularis, décrite comme une fracture de stress (type IIA), une élongation (type IIB) ou une fracture aiguë (type IIC). L'anomalie de la pars retrouvée dans les types IIA et IIB est présumément liée à des facteurs biomécaniques (particulièrement les mouvements répétitifs de flexion et extension du rachis) et est associée à une prédisposition héréditaire. Le spondylolisthesis de type III (dégénératif) est quant à lui secondaire à un processus dégénératif au niveau des facettes articulaires et/ou des disques intervertébraux. Le type IV (traumatique) résulte d'une fracture des éléments vertébraux postérieurs autre que la pars interarticularis. Finalement, le spondylolisthesis de type V (pathologique) associé à une destruction des éléments postérieurs est secondaire à une pathologie osseuse locale ou systémique.

Tableau I – Système de classification du spondylolisthesis par Wiltse et al.⁴⁵

I. Dysplasique
II. Isthmique <ul style="list-style-type: none"> a. Interruption des pars secondaire au fracture de stress b. Élongation des pars c. Fracture aiguë à travers des pars
III. Dégénérative
IV. Traumatique
V. Pathologique

Marchetti and Bartolozzi⁴⁶ ont basé leur classification du spondylolisthésis en séparant les formes développementale et acquise, avec l'intention de proposer une classification en accord avec l'étiologie, le pronostic et le traitement du spondylolisthésis. Le spondylolisthésis développemental (incluant les types I, IIA et IIB de la classification de Wiltse et al.⁴⁵) est divisé en deux types principaux (haut- et bas dysplasique), en fonction de la sévérité des changements dysplasiques osseux survenant au niveau de L5 et S1, et du risque de glissement associé. Le type haut-dysplasique est associé à une cyphose lombosacrée significative, une vertèbre L5 trapézoïdale, une dysplasie des éléments postérieurs de L5 et S1, et une anomalie du plateau supérieur de S1. Le type bas-dysplasique est, quant à lui, associé à un profil lombosacré relativement normal, une vertèbre L5 rectangulaire, une préservation du plateau supérieur de S1, de même que l'absence de verticalisation du sacrum. Le spondylolisthésis acquis est, de son côté, soit secondaire à un traumatisme, une chirurgie, ou un processus pathologique ou dégénératif. La forme traumatique peut être causée par une fracture aiguë ou une fracture de stress. D'ailleurs, les spondylolisthésis acquis traumatique secondaire à une fracture de stress surviennent typiquement chez les jeunes athlètes^{2,15,16,17,47,48,49,50}. Il est important de noter qu'alors que les sujets atteints de spondylolisthésis développemental haut-dysplasique présentent un risque élevé de progression (surtout durant la période de croissance), les sujets atteints d'un spondylolisthésis bas-dysplasique ou acquis secondaire à une fracture de stress sont moins à risque de progresser.

Tableau II – Système de classification du spondylolisthésis par Marchetti-Bartolozzi⁴⁶

Développementale	Acquise
Dysplasie haute Avec lyse Avec élancement	Traumatique Fracture aiguë Fracture de stress
Dysplasie basse Avec lyse Avec élancement	Post-chirurgicale
	Pathologique
	Dégénérative

Les classifications de Wiltse et al.⁴⁵ ainsi que de Marchetti-Bartolozzi⁴⁶ permettent d'identifier adéquatement la pathologie sous-jacente. Toutefois, elles ne permettent pas de guider le traitement chirurgical. En effet, bien que plusieurs études suggèrent l'importance de la morphologie sacro-pelvienne et de l'équilibre spino-pelvien dans la pathogénèse, la prise en charge et le traitement du spondylolisthésis, aucune de ces classifications ne les prend en considération⁵¹.

Basé sur une revue systématique de la littérature, Mac-Thiong et Labelle⁵² ont présenté un système de classification incorporant les notions d'équilibre spino-pelvien, avec, pour la première fois, l'intention de guider le traitement chirurgical du spondylolisthésis développemental. Cette classification est basée sur trois caractéristiques importantes

évaluées à l'aide de l'imagerie spino-pelvienne : 1) le glissement, 2) l'équilibre sagittal, et 3) le degré de dysplasie. Ainsi, 8 différents types de spondylolisthésis ont été identifiés.

Tableau III – Classification du spondylolisthésis développemental de bas grade selon Mac-Thiong et Labelle⁵²







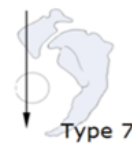

Grade	Équilibre sagittale	Dysplasie	Exemple
Bas grade	Type "cass e-noisette"	Bas dysplasique	 Type 1
		Haut dysplasique	 Type 2
	Type cis aillement	Bas dysplasique	 Type 3
		Haut dysplasique	 Type 4

Tableau IV – Classification du spondylolisthésis développemental de haut grade selon Mac-Thiong et Labelle⁵²

Grade	Équilibre sagittale	Dysplasie	Exemple
Haut grade	Pelvis équilibré	Bas dysplasique	 Type 5
		Haut dysplasique	 Type 6
	Pelvis déséquilibré, rachis équilibré		 Type 7
	Pelvis et rachis déséquilibrés	Haut dysplasique	 Type 8

Toutefois, les auteurs ont subséquentement trouvé que ce système de classification présentait une fiabilité inter-observateurs limitée (κ : 0.49), principalement secondaire à la difficulté de déterminer le degré de dysplasie sur la radiographie simple.⁵³ Par conséquent, le SDSG a décidé de remodeler et simplifier ce système de classification, excluant, cette fois-ci, l'évaluation de la dysplasie osseuse de l'algorithme. Ainsi, cette nouvelle classification⁵⁴ est basée sur 3 caractéristiques importantes évaluées à l'imagerie sagittale spino-pelvienne : 1) le glissement, 2) l'incidence pelvienne (PI), et 3) l'équilibre spino-pelvien. De cette façon, 6 différents types de spondylolisthésis ont été identifiés. Pour classer un patient, le pourcentage de glissement est dans un premier temps quantifié sur une radiographie latérale, afin de déterminer s'il est, selon la classification de Meyerding⁵⁵, de bas grade (grade 0, 1 ou 2) ou de haut grade (grade 3, 4 ou 5). Deuxièmement, l'équilibre sagittal est mesuré en déterminant l'alignement sacro-pelvien

et spino-pelvien. Pour les spondylolisthésis de bas grade, il existe trois types d'équilibre sacro-pelvien : 1) le type 1, type « casse-noisettes », avec incidence pelvienne abaissée ($< 45^\circ$), 2) le type 2, avec incidence pelvienne normale (entre 45 et 60°), et 3) le type 3, type « cisaillement », avec incidence pelvienne augmentée ($\geq 60^\circ$). En ce qui a trait au spondylolisthésis de haut-grade, l'équilibre sacro-pelvien est déterminé à l'aide des valeurs de version pelvienne (PT) et de pente sacrée (SS) à partir des trouvailles de Hresko et al.⁵⁶. Le premier sous-groupe comprend ceux avec un équilibre sacro-pelvien relativement normal présentant une pente sacrée élevée ainsi qu'une version pelvienne basse (haut SS/bas PT). Le second sous-groupe inclut les patients avec un complexe sacro-pelvien déséquilibré secondaire à un bassin rétroversé et un sacrum vertical. Dans ce cas, la pente sacrée est basse alors que la version pelvienne est augmentée (bas SS/haut PT). Finalement, l'équilibre spinal doit aussi être déterminé en utilisant le «C7 plumbligne». Si cette ligne tombe sur ou en arrière des têtes fémorales, le rachis sera considéré comme équilibré, alors que si elle tombe en avant des têtes fémorales, le rachis sera considéré comme étant déséquilibré. L'équilibre du rachis est plus souvent mesuré dans les cas de spondylolisthésis de haut grade, étant donné qu'il est généralement équilibré dans les cas de spondylolisthésis de bas grade. Cette classification donne ainsi lieu à 3 types de spondylolisthésis de haut grade, soit : 1) le type 4, présentant un équilibre pelvien adéquat, 2) le type 5, présentant un bassin rétroversé et un rachis équilibré, et 3) le type 6, présentant un bassin rétroversé et un rachis déséquilibré.

Tableau V – Classification du spondylolisthésis développemental de bas grade selon le SDSG⁵⁴




Grade	Équilibre sagittal sacro-pevien	Équilibre sagittal spino-pelvien	Exemple
Bas Grade	Type 1 : $PI < 45^\circ$ ("casse-noisette")	Rachis équilibré	 Type 1
	Type 2 : PI entre 45 et 60°	Rachis équilibré	 Type 2
	Type 3 : $PI > 60^\circ$ ("cisaillement")	Rachis équilibré	 Type 3

Tableau VI – Classification du spondylolisthésis développemental de haut grade le SDSG⁵⁴

Grade	Équilibre sagittal sacro-pevien	Équilibre sagittal spino-pelvien	Exemple
Haut Grade	Pelvis équilibré	Rachis équilibré	 Type 4
	Pelvis déséquilibré	Rachis équilibré	 Type 5
	Pelvis déséquilibré	Rachis déséquilibré	 Type 6

L'étude de Mac-Thiong et al.⁵⁷ a démontré une amélioration substantielle de la fiabilité intra- et inter-observateur de ce nouveau système de classification par rapport à l'ancien algorithme. Cette classification souligne l'importance de la morphologie et de l'équilibre sacro-pelvien dans l'algorithme de traitement du spondylolisthésis. Elle est la première classification à tenter d'organiser les sous-groupes de spondylolisthésis en prenant en considération la sévérité de l'atteinte en ce qui attrait au pronostic et/ou à la complexité du traitement chirurgical. Toutefois, il faut aussi retenir de cette classification que les sujets atteints de spondylolisthésis sont un groupe hétérogène d'individus avec une variété de mécanismes d'adaptation de leur posture dont les cliniciens doivent être conscients dans l'évaluation et le traitement de cette pathologie.

1.3 ÉTIOLOGIE DU SPONDYLOLISTHÉSIS DÉVELOPPEMENTAL LOMBOSACRÉ

Tel que discuté précédemment, la cause exacte de la spondylolyse et du spondylolisthésis développemental lombo-sacré reste inconnue, mais elle est présumée multifactorielle, impliquant des phénomènes héréditaire, traumatique, développemental, morphologique et biochimique¹⁰.

1.3.1. PRÉDISPOSITIONS HÉRÉDITAIRES

À l'heure actuelle, une majorité d'auteurs^{58,59} croit que le spondylolisthesis est associé à une prédisposition génétique autosomale dominante avec pénétrance incomplète. Une prévalence accrue de spondylolisthesis semble être présente chez les membres immédiats d'une même famille, allant de 19% à 69%, chez les parents de 1^{er} degré d'un enfant atteint^{12,29,32,59,60,61}. La présence de spina bifida occulta semble, elle aussi, être plus fréquente chez les parents de 1^{er} degré d'un enfant atteint d'un spondylolyse ou d'un spondylolisthesis^{59,60}. De plus, tel que mentionné précédemment, la prévalence du spondylolyse est augmentée chez certains groupes ethniques^{37,38,39,40,41}.

1.3.2 TRAUMATISME ET FACTEURS BIOMÉCANIQUE

Le fait que la spondylolyse et le spondylolisthesis aient été rapportés jusqu'à tout récemment⁶² uniquement chez l'humain ambulant supporte l'importance des facteurs biomécaniques et de la position debout dans la pathogénèse de ces affections. Plusieurs auteurs^{4,5,6,63,64,65} ont suggéré que le spondylolyse était causé par une fracture de stress secondaire à des micro-traumatismes répétés. Dans le cas du spondylolisthesis non-isthmique (sans spondylolyse), une elongation des éléments vertébraux postérieurs, incluant la pars interarticularis, peut être secondaire à des micro-fractures répétées avec guérison subséquente. Ce processus associé à une dégénérescence discale du niveau vertébral impliqué permet au spondylolisthesis de survenir⁶⁶. Dans des conditions normales, les facettes supportent la majorité des contraintes de cisaillement, alors que le disque L5-S1, supporte la majorité de la compression à la jonction lombosacrée. Que ce soit en présence d'un spondylolisthesis isthmique ou non isthmique, les facettes

articulaires sont incapables de combler leurs fonctions habituelles et la majorité des contraintes en cisaillement sont transférées au disque L5-S1, ce qui prédispose, dans un premier temps, à la dégénérescence discale et, dans un deuxième temps, au spondylolisthésis⁵. Avec la progression du spondylolisthésis s'ensuit une accentuation de la dégénérescence discale et des contraintes à la jonction lombosacrée.

1.3.2.1 ÉTUDES CHEZ L'ATHLÈTE

En plus d'être, d'un point de vue biomécanique, la région la plus faible de l'arc vertébral postérieur^{4,5,6}, la pars interarticularis est soumise à d'importantes contraintes en cisaillement, en compression et en tension durant les mouvements de flexion et d'extension du rachis^{4,67}. En effet, de tels mouvements du rachis effectués de façon répétitive peuvent affecter l'intégrité de la pars interarticularis en provoquant des micro-traumatismes ou des micro-fractures au niveau de cette dernière^{4,67}. Par conséquent, les activités impliquant des mouvements répétés de flexion et d'extension du rachis, et mettant ainsi sous tension plusieurs éléments vertébraux de la jonction lombosacrée, prédisposent au développement de cette affection^{4,67}. Ainsi, une prévalence accrue de spondylolyse et de spondylolisthésis, pouvant atteindre au-delà de 40% selon certaines études³, existe chez certains athlètes pratiquant des sports, comme la gymnastique^{2,15}, l'haltérophilie¹⁶, le football américain^{17,18}, pour n'en nommer que quelques-uns. Jackson et al. est le premier à avoir tenté d'évaluer l'atteinte de la pars interarticularis chez une population de jeunes gymnastes¹⁵. Dans son étude, 100 gymnastes de sexe féminin, caucasiennes, de tous les niveaux de compétition, ayant 14 ans d'âge moyen (entre 6 et

24 ans) ont été recrutées indépendamment de la présence ou de l'absence de douleur lombo-sacrée et ont subi une évaluation par radiographie conventionnelle. Une atteinte bilatérale de la pars interarticularis de L5 a été diagnostiquée chez 11 des 100 gymnastes, dont six présentant un spondylolisthésis. Une telle valeur apparaît supérieure au taux de 2.3% retrouvé dans la population de femmes caucasiennes¹⁵. 54.5% des gymnastes avec atteinte de la pars présentaient une histoire de douleur lombo-sacrée alors que seulement 23% des gymnastes sans atteinte de l'arc postérieur présentaient de tels symptômes. Ce même auteur rapporte que 50% des jeunes athlètes avec des symptômes de lombalgie subaiguë à chronique présentaient une atteinte de la pars interarticularis, impliquant un spondylolisthésis dans 10% des cas. Plus tard, Micheli et Wood³, avec pour objectif de déterminer les causes de douleurs lombo-sacrée chez les jeunes athlètes en comparaison à la population adulte générale, ont rapporté, dans une étude rétrospective menée auprès de 100 athlètes adolescents symptomatiques et 100 adultes non athlètes symptomatiques, un taux de spondylolyse de 47% vs 5%, respectivement ($p < 0.05$). Plusieurs études ont donc supporté la notion d'une prévalence accrue de spondylolyse ou spondylolisthésis chez certains groupes d'athlètes^{2,3,15,16,17,18}. Dans la plupart de ces études, les patients, pour être recrutés, devaient présenter une histoire de symptômes de douleur lombo-sacrée. En ce sens, l'étude de Soler et Calderon⁶⁸, menée auprès de 3152 athlètes espagnols de hauts niveaux, est intéressante puisque la présence ou l'absence de symptômes lombo-sacrée n'était pas un facteur d'inclusion. Cette étude a révélé une prévalence de 8.0% de spondylolyse, dont 30% présentaient un spondylolisthésis, ce qui se trouve à être similaire aux valeurs rapportées par le passé dans la population générale (6%)⁹. Toutefois, dans le contexte où une quantité sans cesse croissante de jeunes, immatures sur le plan

squelettique, participent à des activités athlétiques de plus en plus intenses, il faut rester conscient du risque potentiel de spondylolyse et de spondylolisthésis chez la population athlétique adolescente.

Certains désordres du tissu conjonctif associés à une laxité ligamentaire ou une anomalie osseuse peuvent aussi prédisposer au spondylolisthésis, tel que pour le syndrome de Marfan^{69,70,71,72}, le syndrome d'Ehlers-Danlos⁷³ et l'ostéogenèse imparfaite^{74,75}.

1.3.3 MORPHOLOGIE SACRO-PELVIENNE ET ÉQUILIBRE SPINO-PELVIEN

Il a été démontré que la morphologie sacro-pelvienne influence significativement la géométrie du rachis lombaire et le stress mécanique transmis au niveau lombosacré^{19,20}. Cette interdépendance entre le rachis et le bassin permet de conserver une posture stable et compensée, tout en maintenant au minimum la quantité d'énergie dépensée. Plusieurs études ont démontré que sur le plan sagittal, la morphologie pelvienne diffère entre les sujets en santé et les sujets atteints d'un spondylolisthésis^{21,22,23,24,25,26,27,28}. La sévérité du spondylolisthésis semble d'ailleurs augmenter au fur et à mesure que la différence de morphologie pelvienne s'accroît^{23,24,25}. Ainsi, les sujets présentant une morphologie sacro-pelvienne anormale pourraient soumettre la région lombosacrée à des contraintes augmentées et, par conséquent, présenteraient un risque augmenté de développement de spondylolyse et de spondylolisthésis⁵. Roussouly et al suggèrent deux mécanismes différents pour le spondylolisthésis de bas-grade en fonction de la géométrie sacro-pelvienne⁷⁶. Une incidence pelvienne élevée ainsi qu'une pente sacrée élevée

augmenteraient les contraintes de cisaillement sur le disque L5-S1 et induiraient une tension accrue sur la pars interarticularis de L5, alors que chez les sujets avec une incidence pelvienne et une pente sacrée plus basses, le spondylolyse pourrait être secondaire au coincement répétitif des éléments postérieurs de L5 entre les facettes de L4 et S1 durant les mouvements d'extension, selon un mécanisme de type "casse-noisette". C'est à partir de ces concepts que Labelle et al.⁵² et le SDSG⁵⁴, tel que mentionné précédemment, ont confirmé l'existence des différents sous-groupes de spondylolisthésis de bas-grade et de haut-grade. Toutefois, jusqu'ici, la relation entre les deux types de spondylolisthésis bas-grade et les deux types de spondylolisthésis haut-grade reste totalement inconnue.

Plusieurs publications récentes suggèrent une association entre une incidence pelvienne anormale et le spondylolisthésis^{21,23,25,26,27}. Curylo et al ont noté une incidence pelvienne augmentée chez 53 patients avec spondyloptose²¹. Dans une cohorte de 39 sujets (âge moyen = 30 ans) avec spondylolyse et spondylolisthésis de bas grade, Marty et al ont noté une incidence pelvienne et une pente sacrée augmentées, pour ensuite postuler qu'une incidence pelvienne augmentée pourrait prédisposer au spondylolisthésis²⁶. Des résultats similaires furent rapportés par Rajnics et al²⁷ dans une étude semblable auprès de 48 adultes atteints d'un spondylolisthésis de bas grade avec pour moyenne d'âge 43 ans. Hanson et al ainsi que Labelle et al ont eux aussi rapportés une incidence pelvienne significativement augmentée au sein de leurs cohortes de sujets constituées à la fois de spondylolisthésis de bas et de haut grade^{23,25}. Depuis la mise en évidence de cette association, l'hypothèse selon laquelle l'incidence pelvienne serait un facteur étiologique

possible dans le développement du spondylolisthesis a été soulevée. Huang et al n'ont toutefois pas pu démontrer une valeur prédictive positive de l'incidence pelvienne dans la progression du spondylolisthesis à partir d'une étude rétrospective sur 36 patients ayant subi une fusion lombosacrée postérieure⁷⁷. En comparant les patients ayant progressé ou non durant le suivi avant la chirurgie, ils ont remarqué que l'incidence pelvienne était similaire dans ces deux groupes. Par contre, plusieurs éléments méthodologiques poussent à douter de leurs conclusions. Premièrement, ceux-ci n'ont pas défini précisément les critères de progression du spondylolisthesis. Deuxièmement, il faut savoir que tous les patients étudiés avaient déjà subi au préalable une progression de leur spondylolisthesis avant de se présenter chez le médecin. Troisièmement, puisque tous les patients ont été opérés, il est impossible de savoir avec certitude si les patients classés comme n'ayant pas progressé auraient plutôt progressé sans la chirurgie. Finalement, il est important de noter que cette étude n'incluait qu'un nombre limité de sujets (N=36), limitant ainsi l'interprétation des résultats que l'on puisse faire.

Une anomalie de la morphologie sacrée semble également impliquée dans le développement du spondylolisthesis. Antoniadis et al. ont observé qu'une cyphose sacrée (mesurée par la méthode de Ferguson) augmentée est associée de façon significative avec une pente sacrée, une lordose lombaire et un pourcentage de glissement augmentée chez 45 sujets atteints d'un spondylolisthesis L5-S1⁷⁸. Ces derniers ont postulé que cette cyphose sacrée augmentée serait secondaire au déplacement antérieur de la ligne de gravité en raison du glissement antérieur de L5 sur S1. Les forces anormales ainsi générées sur la portion antérieure des plaques de croissance sacrées chez

l'enfant immature causeraient une déformation cyphotique progressive du sacrum. Par conséquent, la cyphose sacrée, au même titre que le dôme sacré, ne serait en fait que le reflet des changements adaptatifs subis par le sacrum. Inoue et al.⁷⁹ ont poursuivi en identifiant deux paramètres importants en relation avec le spondylolisthésis, soit l'angle de table sacrée, se dressant entre le rebord postérieur du sacrum et le plateau supérieur de S1, et l'index de table sacrée, ratio entre le diamètre antéropostérieur maximal du plateau supérieur de S1 sur celui de L5. Au sein d'une cohorte de 367 patients adultes (âge moyen de 37.5 ans) atteints d'un spondylolisthésis de bas grade, Inoue et al. ont rapporté un index de table sacrée augmentée (102.5%) chez les individus présentant une atteinte de la pars interarticularis avec et sans glissement lorsque comparé au groupe contrôle (94.4%) ($p < 0.0001$). L'angle de table sacrée apparaissait aussi diminué (91.6°) dans le groupe présentant un glissement lorsque comparé au groupe sans glissement (97.8°) ($p < 0.0001$) et au groupe contrôle (97.4°) ($p < 0.0001$). Ceci suggère un risque augmenté de progression chez les patients présentant un angle de table sacrée diminué. L'absence de différence statistiquement significative ($p > 0.01$) de l'angle de table sacrée entre le groupe sans glissement (97.8°) et le groupe contrôle (97.4°) peut toutefois être expliquée par le fait que cette étude incluait seulement des spondylolisthésis de bas grade. De plus, l'utilisation d'un groupe contrôle constitué d'adultes présentant des symptômes de lombalgie peut aussi avoir été un facteur confondant. Utilisant également l'angle de table sacrée, Whitesides Jr et al. ont noté une association entre l'angle de table sacrée et la survenue de la spondylolyse chez deux populations génétiquement distinctes présentant une haute incidence de spondylolisthésis²⁸. Ces derniers ont suggéré qu'un angle de table sacrée abaissé, dans la position debout, soumet le disque L5-S1 à un stress augmenté,

favorisant le glissement antérieur à la jonction lombo-sacrée et ainsi le remodelage du sacrum et la spondylolyse. Wang et al ont, quant à eux, évalué dans une étude rétrospective 131 sujets atteints d'un spondylolisthésis âgés entre 5 et 21 ans⁸⁰. Ils ont démontré que la morphologie sacrée, caractérisée par l'angle de table sacrée, était significativement différente ($p < 0.01$) chez les enfants et les adolescents atteints d'un spondylolisthésis L5-S1 (83.4°) lorsque comparés à une population contrôle (95.2°). Ils ont aussi été en mesure de démontrer que la valeur de l'angle de table sacrée diminue en fonction de la sévérité du glissement chez les sujets atteints d'un spondylolisthésis L5-S1. Finalement, la valeur moyenne d'angle de table sacrée obtenue pour leur groupe contrôle ($95.2^\circ \pm 5.9^\circ$) se rapprochant de la valeur rapportée par Inoue et al⁷⁹ pour une population adulte normale ($97.4^\circ \pm 4.2^\circ$) pourrait suggérer que l'angle de table sacré demeure stable à travers la période de croissance et non affecté par les changements osseux adaptatifs.

En résumé, plusieurs études suggèrent qu'une anomalie de la morphologie et de l'orientation sacro-pelvienne pourrait être reliée à la cause ou à la progression du spondylolisthésis^{21,22,23,24,25,26,27,28}. Par contre, aucune étude jusqu'à présent ne permet de déterminer précisément si les anomalies observées sont primaires et étiologiques, ou si elles sont secondaires au remodelage du sacrum ou du bassin et non reliées à la progression du spondylolisthésis. En plus de ne pas permettre d'évaluer avec justesse l'implication de la morphologie sacro-pelvienne dans le spondylolisthésis, ces études sont descriptives et rétrospectives. Tel qu'il a été fait mention un peu plus tôt, ce problème est particulièrement relié à la difficulté de comparer les sujets présentant un

spondylolisthésis à un groupe homogène de sujets contrôles présentant des facteurs de risques environnementaux similaires.

1.3.4 DÉVELOPPEMENT OSSEUX, ANOMALIES DES PLAQUES DE CROISSANCE ET DYSPLASIE OSSEUSE

Il y a une incidence accrue de spondylolisthésis durant la croissance^{9,11,13,14,81,82,83}. La progression du spondylolisthésis survient usuellement durant la croissance^{9,81,82,83} et devient moins probable après l'atteinte de maturité osseuse^{9,11,13,14}. Chez l'enfant, une distribution anormale du stress à la jonction lombosacrée peut mener à un remodelage osseux au niveau des plaques de croissance, contribuant ainsi à la progression du spondylolisthésis⁸⁴. De plus, plusieurs études^{85,86,87,88} supportent le rôle d'une faiblesse biomécanique au niveau des plaques de croissance des vertèbres comme mécanisme important dans la progression du spondylolisthésis.

Une dysplasie osseuse impliquant les éléments postérieurs et/ou antérieurs de la région lombosacrée peut également être présente dans le spondylolisthésis. La dysplasie des éléments postérieurs peut survenir à des degrés variables au niveau de la pars interarticularis (isthmique ou élongation), de la lame (bifide ou absente) et de la facette (hypoplasique, aplasique ou anormalement orientée)^{89,90,91}. À ce sujet, dans une cohorte de sujets atteints de spondyloptose, Curylo et al ont rapporté une prévalence de 62% de dysplasie des éléments postérieurs⁸⁹. De plus, la prévalence de spina bifida occulta a été rapporté à 92% par Fredrickson et al chez des enfants atteints de spondylolyse⁹².

L'évaluation de la dysplasie des éléments postérieurs demeure toutefois uniquement descriptive. En effet, aucun critère quantitatif permettant de bien définir le phénomène dysplasique n'a été rapporté jusqu'à ce jour dans la littérature. Des changements dysplasiques peuvent également être présents dans la région des processus transverses, tel que décrit par Molinari et al.⁹³ qui ont tenté d'évaluer le risque de pseudarthrose avec une fusion postérolatérale en fonction de la surface disponible à la fixation au niveau des processus transverses de L5 sur les vues de Ferguson. Des anomalies pédiculaires ont aussi été décrites. À ce sujet, certains auteurs ont rapporté qu'en présence d'une spondylolyse unilatérale à L5, une sclérose du pédicule contralatéral de L5 pouvait se développer.^{94,95} Ces changements pédiculaires seraient d'ailleurs visualisables à la résonance magnétique dès les stades précoces du spondylolyse.⁹⁶ Une dysplasie des éléments antérieurs de la région lombosacrée peut aussi survenir. En effet, un wedge du corps vertébral de L5 ainsi qu'un dôme sacré significatif sont souvent retrouvés dans le spondylolisthésis.^{91,92} La cunéiformisation de L5 est souvent mesurée à l'aide de l'index lombaire, ratio entre la hauteur du mur antérieur du corps vertébral et la longueur du plateau inférieur de L5, qui est habituellement inférieur à 0.8 chez les sujets atteints d'un spondylolisthésis.⁹⁷ Le dôme sacré est, quant à lui, considéré comme étant significatif lorsqu'il représente plus de 25% de la longueur du plateau sacré⁹⁸. Toutefois, le wedge de L5 et le dôme sacré pourraient simplement être secondaires au remodelage plutôt qu'étiologiques.

1.4 HISTOIRE NATURELLE ET PROGRESSION DU SPONDYLOLISTHÉSIS

Le risque de glissement chez les sujets présentant un spondylolyse est faible (4-5%)^{11,44,99}. À travers la littérature, plusieurs facteurs de risque de progression du spondylolisthésis ont été avancés tels que le sexe féminin¹², l'âge précoce de présentation^{82,83}, la sévérité du glissement initial^{81,83,96}, la cyphose lombosacrée^{100,101,102,103} et la dysplasie osseuse de haut grade²¹.

En effet, les filles semblent présenter des déplacements plus sévères et plus de symptômes cliniques que les garçons¹⁰⁴. Il a aussi été démontré qu'un glissement initial de moins de 30% rend moins probable le risque de progression du glissement^{9,81,83,99}. De plus, il semble que la progression du glissement survienne principalement durant la poussée de croissance^{9,12,81,83} et soit moins probable après l'atteinte de la maturité osseuse^{11,12,13,14}. On doit également mentionner qu'avant d'atteindre la maturité osseuse, la cyphose lombosacrée pourrait, selon certains, être le paramètre le plus utile afin de déterminer le risque de progression du glissement¹⁰¹. De ce fait, l'hypothèse qu'un angle de glissement plus grand que 50° pourrait être associé à un risque de progression plus élevé¹⁰³ a été avancée par le passé sans, toutefois, jamais avoir été confirmée.

Le sexe, la croissance et la sévérité du glissement initial semblent donc associés à l'évolution du spondylolisthésis. Toutefois, malgré tous ces éléments mis de l'avant pour tenter de prédire l'évolution du spondylolisthésis, il n'y a aucun consensus clair par rapport aux facteurs de risque de progression.

1.5 ÉVALUATION DU SPONDYLOLISTHÉSIS

Une évaluation clinique peut comprendre une inspection et une série de tests et mesures spécifiques. Généralement, un examen radiographique accompagne l'examen clinique. D'autres techniques d'investigation complémentaires sont aussi utilisées afin d'évaluer le spondylolisthésis.

1.5.1 ÉVALUATION CLINIQUE

À l'évaluation clinique, les patients atteints de spondylolyse sans spondylolisthésis apparaissent habituellement normaux, alors que ceux atteints d'un spondylolisthésis sévère présentent généralement une lordose lombaire augmentée parfois associée avec un abdomen et des fesses proéminents. Suivant la progression du glissement et le rapprochement secondaire de la cage thoracique par rapport aux crêtes iliaques, le tronc peut paraître raccourci. En raison du déplacement antérieur du centre de gravité du corps en entier, certains patients atteints de spondylolisthésis adopteront une position avec les hanches et les genoux fléchis dans le but de compenser la position plus antérieure du tronc. En effet, les sujets symptomatiques affectés d'un spondylolyse ou d'un spondylolisthésis présentent habituellement des ischio-jambiers courts (possiblement secondaire à la contraction en flexion des genoux ou à la tension radiculaire à L5 ou S1)¹⁰³ et une amplitude de mouvements du rachis lombaire restreinte. La manœuvre du « straight leg raising » et le signe de Lasègue sont habituellement positifs chez les patients avec une tension radiculaire à L5 ou S1¹⁰⁵. Il est donc essentiel de procéder à un

examen neurologique périphérique exhaustif, incluant l'évaluation motrice et sensitive des racines nerveuses lombo-sacrées, ainsi que les réflexes ostéo-tendineux patellaires et achilléens, afin de détecter tout signe de compression radiculaire ou de syndrome de la queue de cheval. À l'examen, les apophyses épineuses lombaires, le fascia lombodorsal, les articulations sacro-iliaques et les muscles para-spinaux doivent être palpés à la recherche d'autres sources de douleur dorsale. Notons, de plus, que la palpation du dos peut révéler une marche d'escalier à la jonction lombosacrée. De plus, ces patients présentent souvent une limitation de leurs mouvements de flexion et d'extension lombaire. L'hyperextension lombaire élicite aussi fréquemment de la douleur.

Pour finir, une évaluation de l'alignement spinal coronal global s'avère être une composante essentielle de l'examen du spondylolisthesis. En effet, une déformation scoliotique associée, pouvant être secondaire à une tension/compression radiculaire et/ou à un spasme musculaire, à un glissement asymétrique dans le plan frontal ou à une véritable scoliose idiopathique, est parfois observée^{102,106,107,108}. Pour cette raison, le clinicien recherchera alors principalement la présence d'asymétries au niveau des épaules, des omoplates, du thorax, de la taille ou de l'alignement du thorax par rapport au bassin. En plus de rechercher l'évidence d'une courbure scoliotique par la vue du dos des patients, le clinicien disposera d'un certain nombre d'instruments afin de quantifier ces observations. La recherche d'une inégalité de longueur des membres inférieurs constitue la première étape. Ensuite, la distance séparant un fil à plomb aligné avec l'apophyse épineuse de la vertèbre C7 et le pli inter-fessier représente la déviation latérale du thorax par rapport au bassin. L'asymétrie des épaules peut quant à elle être évaluée en mesurant

la différence de hauteur entre les deux articulations acromio-claviculaires. Le paramètre clinique toutefois le plus utilisé pour évaluer les déformations du tronc dans le plan coronal demeure la gibbosité, mesurée à l'aide du scoliomètre.

1.5.2 ÉVALUATION RADIOLOGIQUE DE BASE

L'obtention de radiographies simples du rachis lombosacré en position debout devrait être la première étape de l'investigation d'une spondylolyse ou d'un spondylolisthésis. L'investigation radiologique devrait au moins inclure une vue antéropostérieure (AP) et une vue latérale (LAT). La vue antéropostérieure permet de mettre plus facilement en évidence des anomalies telles la spina bifida, une dyplasie des éléments postérieurs ou une déformation scoliotique. La vue latérale, quant à elle, permet de visualiser le spondylolisthésis, l'anatomie de L5, du sacrum et du bassin ainsi que les anomalies potentielles de la pars interarticularis. Aux vues radiographiques de base précédemment mentionnées, se rajoutent les vues obliques (gauche et droite) et antéropostérieure de Ferguson centrée sur L5-S1. Les vue obliques permettent habituellement de mieux visualiser le spondylolyse via le signe du chien écossais. La vue antéropostérieure de Ferguson centrée sur le disque L5-S1 permet, de son côté, d'améliorer la visualisation des pédicules de L5, des apophyses transverses et du sacrum¹⁰⁹. Plusieurs paramètres radiologiques ont été proposés dans le but de quantifier et caractériser la relation anatomique anormale entre L5 et S1. Toutefois, aucun d'entre eux ne s'est avéré fiable afin de prédire l'évolution de la condition.

Des radiographies postéro-antérieure (PA) et LAT incluant tout le rachis, le bassin et les têtes fémorales sont également utiles afin d'évaluer l'équilibre coronal et sagittal global du rachis et du pelvis. Dans le spondylolisthésis, il peut y avoir perturbation de cet équilibre. À partir de la vue postéro-antérieure (PA), l'équilibre coronal est évalué par la distance horizontale entre la verticale tracée à partir du centre du corps vertébral de C7 et le centre du plateau supérieur de S1. Sur la vue latérale (LAT), l'équilibre sagittal global est habituellement évalué par la distance horizontale séparant la ligne verticale dressée à partir du centre du corps vertébral de C7 par rapport au coin postéro-supérieur de S1 ou par rapport au centre des têtes fémorales (Figure 2). Le plus souvent, la verticale à partir de C7 devrait tomber environ dans un intervalle de 2 cm devant ou derrière le coin postéro-supérieur de S1^{110,111,112}.



Figure 2 – Ligne de plomb sagittale à partir de C7.

La géométrie rachidienne peut également être évaluée à partir des vues PA et LAT. Sur la vue PA, la présence d'une scoliose est mesurée à l'aide de l'angle de Cobb (Figure 3). Sur la vue LAT, la cyphose thoracique et la lordose lombaire sont mesurées habituellement avec la technique modifiée de Cobb. Le plus souvent, la cyphose thoracique et la lordose lombaire sont mesurées à partir de vertèbres limites pré-sélectionnées (technique contrainte). Il existe, toutefois, une grande variabilité dans la littérature et pas de consensus clair en ce qui attrait au niveau des vertèbres limites à utiliser.

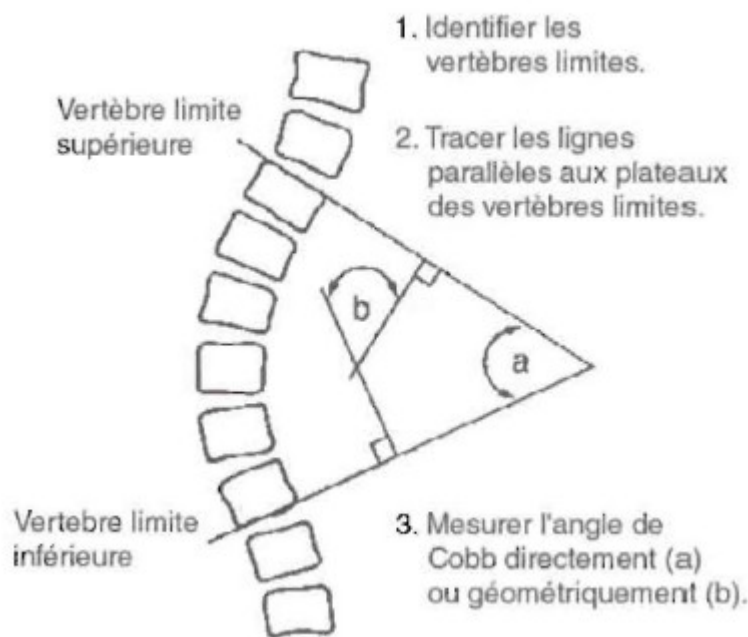


Figure 3 – Angle de Cobb. L'angle de Cobb représente l'angle (a ou b) entre les lignes prolongeant le plateau supérieur de la vertèbre limite supérieure et le plateau inférieur de

la vertèbre limite inférieure. Les vertèbres limites correspondent aux vertèbres les plus inclinées par rapport à l'horizontale.

La méthode la plus utilisée afin d'évaluer la sévérité du spondylolisthesis est la classification de Meyerding⁵⁵ dans laquelle les grades I, II, III et IV correspondent à des translations égales ou inférieures à 25%, 50%, 75% et 100%, respectivement (Figure 4). Le grade 0 représente un spondylolyse sans évidence de spondylolisthesis alors que le grade V constitue un spondyloptose. Les grades 0, I et II sont considérés de bas-grade et les grades III, IV et V sont considérés de haut-grade. Le pourcentage de glissement selon Taillard¹¹³ peut aussi être utilisé afin d'obtenir une mesure plus précise de la translation antéro-postérieure de L5 par rapport à S1. Par conséquent, selon Meyerding, le plateau supérieur de S1 est divisé en quatre sections à partir de droites perpendiculaires à ce dernier. Cependant, Meyerding n'a pas spécifié le repère anatomique de L5 à utiliser afin de grader le spondylolisthesis. Ainsi, 2 techniques de mesure du glissement se sont répandues. Certains auteurs ont décrit une droite à départ du coin postéro-inférieur de L5 et perpendiculaire au plateau sacré supérieur afin de quantifier la translation de L5 par rapport à S1^{114,115}, alors que d'autres utilisent simplement une droite suivant le mur postérieur de L5 afin d'accomplir la même tâche^{116,117,118,119,120,121,122,123}. Bien qu'aucune de ces deux techniques de mesure n'ait encore été prouvée comme étant supérieure à l'autre, un impact significatif sur l'interprétation de la sévérité du glissement, et potentiellement sur la décision clinique, a récemment été démontré¹²⁴.

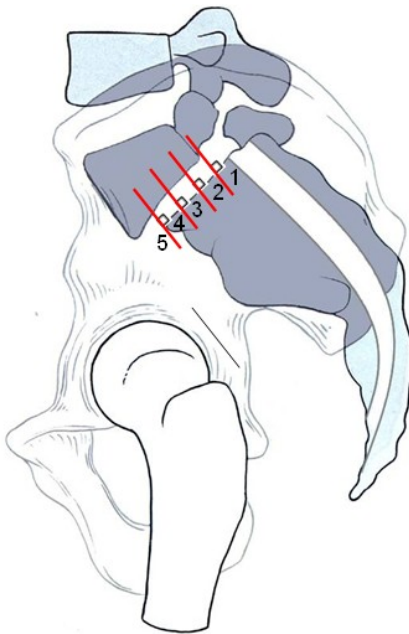


Figure 4 – Classification de Meyerding. Grade I est 0-25% de glissement, Grade II est de 26-50% de glissement, Grade III est de 51-75%, Grade IV est de 76-100% et le Grade V est plus que 100% de glissement.

Il est aussi très important de considérer la cyphose lombosacrée, pour laquelle différentes techniques de mesure ont été proposées. L'angle de glissement¹²⁵, représentant la relation de L5 par rapport au sacrum, mesuré à partir d'une ligne parallèle au plateau inférieur de L5 et d'une ligne perpendiculaire à la surface postérieure du sacrum, fait partie de celles-ci (Figure 5). L'angle de glissement chez un sujet normal sans anomalie est lordotique et se situe entre -10° et 0° ¹⁰³, alors qu'il est neutre ou cyphotique chez les sujets atteints de spondylolisthésis.

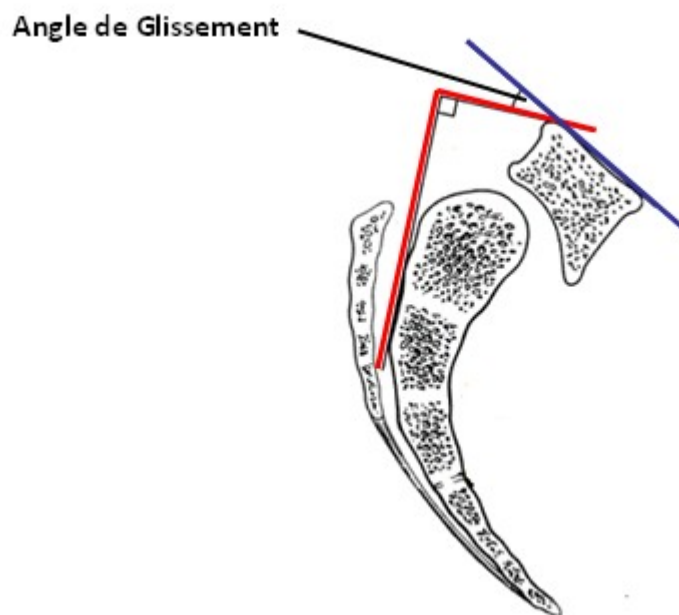


Figure 5 – Angle de glissement.

La morphologie du sacrum et du bassin peuvent toutes deux être évaluées à partir d'images radiologiques latérales.

L'importance de la morphologie pelvienne dans la pathogénèse du spondylolisthésis a été récemment soulevée dans plusieurs articles^{21,22,24,25,26,27,28}. Différents paramètres ont été utilisés pour décrire la morphologie pelvienne sur une radiographie latérale. During et al.²² ont défini l'angle sacro-pelvien, représenté par l'angle entre la tangente au plateau sacré et la ligne joignant le centre des têtes fémorales au centre du plateau sacré. Plus tard, Jackson et al.¹²⁶ ont suggéré l'angle rayon-pelvien. Finalement, Duval-Beaupère et al.¹²⁷ ont introduit l'incidence pelvienne, représentant l'angle complémentaire de l'angle sacro-pelvien. Ces différents angles sont tous uniques à chaque individu et ne sont pas

affectés par le positionnement du sujet. Ils sont similaires et représentent tous une bonne méthode pour analyser la morphologie pelvienne. Jackson et al.²⁴ ont même trouvé une fiabilité inter et intra-observateur similaires à toutes ces mesures. Selon la préférence des différents auteurs, l'incidence pelvienne a été utilisée dans la majorité des recherches publiées pour étudier la morphologie pelvienne. Ainsi, l'incidence pelvienne retient particulièrement notre attention de par son utilisation répandue dans plusieurs études à travers la littérature. De plus, cet angle a été largement étudié par le passé. Cet angle augmente durant la période de l'enfance et de l'adolescence pour atteindre un maximum et se stabiliser à l'âge d'adulte²⁰. L'incidence pelvienne constitue un paramètre anatomique pelvien fondamental déterminant l'orientation pelvienne et l'importance de la lordose lombaire (Figure 6). L'incidence pelvienne est définie comme étant l'angle entre une droite perpendiculaire au plateau sacré et une droite joignant le centre du plateau sacré au centre de l'axe des têtes fémorales (ligne joignant le centre des deux têtes fémorales sur l'image sagittale). La variable constante et spécifique que constitue l'incidence pelvienne n'est en fait que le résultat de la somme arithmétique de la pente sacrée et de la version pelvienne, deux variables dépendantes de la position déterminant l'orientation sacro-pelvienne dans le plan sagittal. Cette association mathématique fait de l'incidence pelvienne un déterminant significatif de l'orientation sacro-pelvienne dans l'espace.

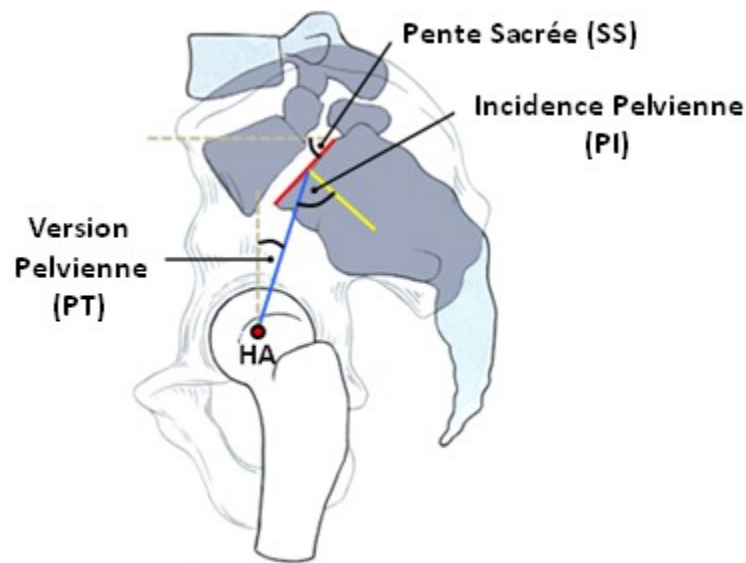


Figure 6 – Incidence pelvienne (PI), version pelvienne (PT), pente sacrée (SS). La somme arithmétique de la version pelvienne et de la pente sacrée correspond à l'incidence pelvienne.

Plus récemment, Inoue et al⁷⁹ ont décrit l'angle de table sacrée (STA) se dressant entre une ligne suivant le plateau supérieur de S1 et une ligne suivant l'aspect postérieur de S1 (Figure 7). Tel que mentionné plus haut, cet angle, qui ne semble pas affecté par le positionnement du sujet, sera repris par plusieurs auteurs^{28,80} afin de spécifiquement décrire la morphologie sacrée.

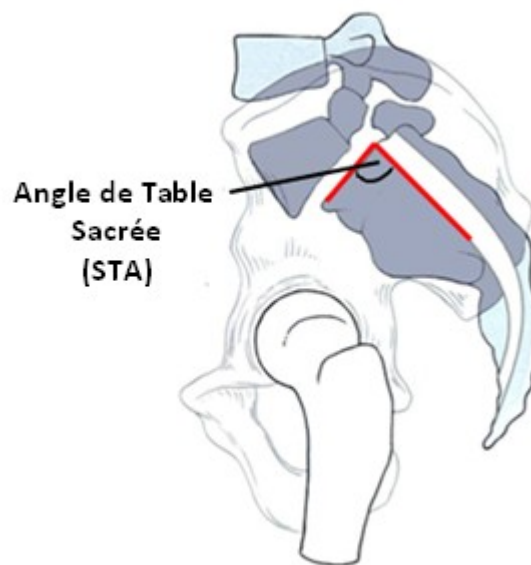


Figure 7 – Angle de table sacrée (STA).

1.5.3 EXAMENS RADIOLOGIQUES COMPLÉMENTAIRES

Un CT scan est utile pour évaluer une dysplasie des éléments postérieurs, particulièrement s'il n'y a aucun spondylolyse mis en évidence sur les radiographies simples, ou en pré-opératoire afin d'évaluer les structures osseuses à la jonction lombosacrée et le degré de sténose spinale. Un trait de fracture au niveau de la pars non visualisé à la radiographie simple pourrait apparaître sous la forme d'une interruption corticale, sans diastase ou sclérose, au CT.

L'utilisation de la résonance magnétique (RMN) est principalement réservée dans les contextes où il y a une atteinte neurologique. Dans certains cas, la RMN est aussi

recommandée en pré-opératoire dans le but d'évaluer les structures neurologiques ainsi que l'état des disques intervertébraux.

La cartographie osseuse avec radiotracteur au Technétium 99 peut s'avérer utile pour différencier une fracture aiguë de la pars interarticularis d'une fracture de longue date¹²⁸. Elle peut également aider à distinguer les patients avec une nonunion établie du spondylolyse par rapport aux patients pour qui une guérison est encore possible¹²⁹. Fait à noter, la tomographie à émission monophotonique (SPECT) pourrait être encore plus sensible et spécifique que la cartographie osseuse dans la détection d'un spondylolyse^{107,130,131}.

CHAPITRE 2 – OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

2.1 RÉSUMÉ DE LA PROBLÉMATIQUE

Plusieurs auteurs ont suggéré qu'une anomalie de la morphologie et/ou de l'orientation sacro-pelvienne pouvait être reliée à la cause ou à la progression du spondylolisthesis^{21,22,24,25,26,27,28}. Cependant, toutes ces études sont descriptives et rétrospectives, et ne permettent pas d'évaluer avec justesse l'implication de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes dans le spondylolisthesis. Ce problème est particulièrement relié à la difficulté de comparer les sujets présentant un spondylolisthesis à un groupe homogène de sujets contrôles présentant des facteurs de risques environnementaux similaires.

Concomitamment, plusieurs études suggèrent que les gymnastes présentent une prévalence accrue de spondylolisthesis^{2,3,15,68}. La spondylolyse et le spondylolisthesis représentent l'une des causes principales de douleur lombo-sacrée chez les jeunes athlètes. Cette notion supporterait ainsi l'influence importante du stress biomécanique et des microtraumatismes à la jonction lombo-sacrée dans la pathogénèse du spondylolisthesis. Pour le jeune athlète de niveau compétitif, la réduction du nombre d'heures d'entraînement et la baisse des performances associées au spondylolisthesis, limitent ses chances au succès. Avec la pression sans cesse croissante de performer et d'exceller, l'identification précoce des athlètes à risque de développer cette affection et

ses complications constituerait un avantage certain pour le clinicien et l'athlète. Par ailleurs, même pour les athlètes de niveau récréatif, la présence d'une spondylolyse et/ou d'un spondylolisthésis en jeune âge peut potentiellement avoir des implications néfastes pour leur qualité de vie future au-delà de la gymnastique.

L'évaluation de l'influence de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes dans une population à haut risque de spondylolisthésis comme les jeunes gymnastes n'a jamais été étudiée. De plus, l'effet potentiel des activités sportives sur la survenue de spondylolisthésis n'a jamais été prise en considération dans l'évaluation de la morphologie et de l'orientation sacro-pelvienne.

Nous voulons donc déterminer, à l'aide d'une cohorte de jeunes gymnastes présentant des facteurs de risques environnementaux similaires pour le spondylolisthésis, le rôle de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes dans le développement du spondylolisthésis. Nous souhaitons également évaluer l'influence potentielle de la gymnastique sur la morphologie et l'orientation sacro-pelvienne. Pour finir, nous désirons investiguer, entre autres à l'aide d'évaluation de certaines des caractéristiques démographiques et liées à l'entraînement, si une activité physique soutenue telle que la gymnastique, appliquant un stress biomécanique important et répété à la jonction lombosacrée, peut entraîner un changement de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes par rapport à celle retrouvée dans une population non gymnaste.

2.2 OBJECTIF GLOBAL

Le but premier de ce travail est d'évaluer la morphologie et l'orientation sacro-pelviennes sagittales d'une cohorte de gymnastes, ainsi que leur association avec le spondylolisthésis. Accessoirement, une évaluation de la prévalence du spondylolisthésis au sein de cette cohorte ainsi qu'une analyse des caractéristiques démographiques potentiellement associées à la pathologie s'ajouteront.

2.3 HYPOTHÈSES

Afin de répondre à cette tâche, plusieurs hypothèses doivent être vérifiées.

Hypothèse 1 : La morphologie et l'orientation sacro-pelviennes sont différentes chez les jeunes gymnastes présentant un spondylolisthésis L5-S1 lorsque comparées à une population contrôle de gymnastes sans spondylolisthésis.

Hypothèse 2 : La morphologie et l'orientation sacro-pelviennes sont différentes chez les gymnastes sans spondylolisthésis lorsque comparées à une population contrôle non gymnaste sans spondylolisthésis.

Hypothèse 3 : Certaines caractéristiques démographiques et liées à l'entraînement, occasionnant un stress augmenté à la jonction lombo-sacrée pour une durée prolongée, sont associées à la présence du spondylolisthésis chez les gymnastes.

2.4 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

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

Objectif 1 : Évaluation radiologique de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes de l'ensemble de la cohorte de gymnastes, puis comparaison entre les gymnastes normaux et ceux atteints d'un spondylolisthésis.

Objectif 2 : Évaluation radiologique de la morphologie et de l'orientation sacro-pelvienne chez les gymnastes sans spondylolisthésis et comparaison aux données rapportées dans la littérature pour une population contrôle de sujets sans spondylolisthésis ne pratiquant pas la gymnastique.

Objectif 3 : Évaluation des caractéristiques démographiques et liées à l'entraînement associées à la présence du spondylolisthésis chez les gymnastes.

2.5 PRÉSENTATION DES ARTICLES

Le premier article (Chapitre 4) présente la prévalence du spondylolisthesis au sein de notre population de 92 gymnastes provenant de tous les niveaux de compétition (local à international) et âgés entre 5 et 21 ans. Cet article se veut aussi une analyse des différentes caractéristiques démographiques et liées à l'entraînement pouvant potentiellement être associées au développement du spondylolisthesis chez les gymnastes, en lien avec l'hypothèse 3.

Le deuxième article (Chapitre 5) décrit l'association entre la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes dans le développement et le spondylolisthésis. Dans cette optique, cette étude se veut surtout une analyse ainsi qu'une comparaison des différents paramètres radiologiques sacro-pelviens pour l'ensemble des gymnastes atteints ou non d'un spondylolisthésis, afin de répondre aux hypothèses 1 et 2.

CHAPITRE 3 – MATÉRIEL, MÉTHODE ET RÉSULTATS

3.1 MATÉRIEL ET MÉTHODE

De façon à atteindre ces objectifs, nous avons présenté notre protocole de recherche à deux centres de gymnastique renommés de notre région. Le recrutement des sujets a pris place entre Janvier et Mars 2009, et était sur une base volontaire après qu'une présentation du projet ait été faite aux gymnastes, à leurs parents ainsi qu'à leurs entraîneurs. Un total de 131 gymnastes de différents niveaux de compétition (récréatif à international) étaient éligibles et ont été invités à participer à l'étude. Les critères d'inclusion afin de participer au projet étaient de pratiquer la gymnastique au moment de l'étude et d'être d'âge inférieur à 21 ans. La grossesse et tout antécédent de chirurgie du rachis constituaient les deux seuls critères d'exclusion de l'étude. Les sujets de 16 ans et plus signaient eux-mêmes un formulaire de consentement, alors qu'une autorisation parentale était requise et obtenue pour tous les sujets âgés de moins de 16 ans. Il est à noter que le protocole de recherche ainsi que le formulaire de consentement avaient préalablement été approuvés par le Comité d'Éthique du centre hospitalier universitaire Sainte-Justine. Un total de 21 gymnastes, 19 sujets de sexe masculin et 2 de sexe féminin, ont été recrutés dans le premier centre. Dans le deuxième centre, exclusivement constitué de gymnastes de sexe féminin, nous avons été en mesure de recruter un total de 71 sujets. Les 92 gymnastes ainsi recrutés étaient âgés entre 5 et 21 ans. La principale raison empêchant la participation de certains sujets au projet était l'emploi du temps souvent chargé des gymnastes et de leurs parents. Certains parents ont également manifesté une

certaine inquiétude vis-à-vis l'exposition aux radiations. Aucun des gymnastes ayant refusé de participer au projet n'était connu pour un spondylolisthésis. Tous les sujets recrutés ont été soumis à une évaluation clinique, physique et radiologique par un chirurgien du rachis entre Mars et Juin 2009. L'acquisition des données démographiques et liées à l'entraînement était effectuée à l'aide de questionnaires standardisés. Ces questionnaires nous permettaient d'évaluer et de comparer les caractéristiques suivantes : sexe, âge, hauteur, poids, nombre d'année de pratique de la gymnastique et nombre d'heures par semaine d'entraînement (Voir les questionnaires dans la section Annexes).

Des radiographies incluant tout le rachis et le pelvis ont été effectuées à l'aide du système EOS¹³², ce qui nous permettait d'obtenir des images de meilleure qualité tout en réduisant de 6 à 9 fois la quantité de radiations à laquelle les sujets étaient soumis en comparaison au rayon-x conventionnel¹³³. Des clichés postéro-antérieur (PA) et latéral (Lat) étaient pris simultanément. Les sujets étaient alors debout, hanches et genoux en extension, et dans la position « poignets-sur-clavicules »^{134,135}. Devant le moindre doute clinique ou radiologique, des vues obliques additionnelles et/ou un CT scan centré sur la région lombosacrée étaient obtenus. Les images ainsi obtenues nous permettaient d'identifier les sujets atteints et non atteints par un spondylolyse et/ou un spondylolisthésis. L'incidence pelvienne, la version pelvienne, la pente sacrée et l'angle de table sacrée étaient par la suite mesurés à partir des images radiologiques en utilisant le logiciel IdefX^{136,114,137}. Après l'identification de 10 repères anatomiques pré-établis sur chacune des radiographies latérales des 92 gymnastes par un utilisateur expérimenté unique, le programme calculait automatiquement l'incidence pelvienne, la version pelvienne, la

pende sacrée et l'angle de table sacrée. En présence d'un spondylolisthesis, le pourcentage de glissement était également mesuré. Les radiographies postéro-antérieures étaient utilisées afin d'évaluer toute inégalité de longueur des membres inférieurs potentielle, considérée comme étant significative lorsque supérieure à 1 cm. De plus, ces images nous permettaient d'identifier la présence de scoliose (angle de Cobb $> 10^\circ$) dans le plan coronal. Les valeurs obtenues pour les différents paramètres radiologiques sacro-pelviens au sein de notre population de gymnastes avec et sans spondylolisthesis étaient respectivement comparées aux valeurs rapportées dans des cohortes historiques de 91 sujets atteints d'un spondylolisthesis de bas grade et de 120 sujets asymptomatiques d'âge similaire^{80,111}. Aucun sujet au sein de ces cohortes historiques n'était impliqué en gymnastique. Ces études ont utilisé le même logiciel afin de calculer les paramètres radiologiques sacro-pelviens et l'acquisition des images radiologiques se faisait dans la même position que l'étude actuelle.

3.1.1 STATISTIQUES

L'ensemble des 92 sujets ont été inclus dans l'analyse. Les variables continues sont présentées sous forme de moyenne à laquelle s'ajoute une déviation standard spécifique. Les variables catégorielles sont, quant à elle, présentées sous la forme de pourcentage et de fréquence. Un test chi-carré a été utilisé afin de comparer les variables catégorielles entre les groupes avec et sans spondylolisthesis dans l'étude actuelle. Un test de Mann-Whitney a été, ensuite, utilisé afin de comparer les variables continues entre les groupes avec et sans spondylolisthesis dans l'étude actuelle. Un test de Mann-Whitney a

également été effectué afin de comparer les variables continues dans notre groupe de gymnastes avec spondylolisthesis à une population contrôle de sujets atteints d'un spondylolisthesis de bas grade non impliqués en gymnastique. Finalement, un test t de student a été utilisé afin de comparer les variables continues dans notre groupe de gymnastes sans spondylolisthesis à une population contrôle normale. Le seuil significatif a été établi à 0.05.

3.2 RÉSULTATS

Six des 92 gymnastes ont été diagnostiqués avec un spondylolisthesis, ce qui représente une prévalence de 6.5% au sein de notre population. Ces gymnastes étaient âgés entre 11 et 16 ans. Cinq d'entre-eux présentaient un spondylolisthesis isthmique L5-S1 de grade 1 selon la classification de Meyerding⁵⁵. L'autre présentait un spondylolyse bilatéral guérit diagnostiqué au CT scan, suivant une histoire clinique et une radiographie EOS suspectes.

Comparaison des paramètres morphologiques entre les gymnastes avec et sans spondylolisthesis

Les gymnastes avec spondylolisthesis présentaient une incidence pelvienne supérieur aux gymnastes sans spondylolisthesis (68.5° vs 53.4° ; $p = 0.02$). Les gymnastes avec spondylolisthesis présentaient aussi une pente sacrée significativement augmentée (53.5°

vs 43.5°; $p = 0.02$) et un angle de table sacrée significativement diminué (88.2° vs 94.3°; $p = 0.036$). Bien que la version pelvienne chez les gymnastes avec spondylolisthésis était 5.1 degrés supérieurs (15.0° vs 9.9°), cette différence n'a pas rejoint le seuil significatif ($p = 0.376$).

Comparaison des paramètres morphologiques entre les gymnastes sans spondylolisthésis et une cohorte de sujets non gymnastes

Les valeurs des différents paramètres radiologiques obtenues pour le groupe de gymnastes non atteints d'un spondylolisthésis dans l'étude actuelle ont été comparées à celles rapportées dans un groupe contrôle de 120 sujets asymptomatiques^{80,111}. L'âge moyen de ce groupe contrôle (12.1 ± 2.6 ans) était similaire à celui observé dans notre groupe de sujets sans spondylolisthésis (11.4 ± 3.1 ans; $p = 0.16$). La pente sacrée (43.5° vs 42.8°; $p = 0.57$) et l'angle de table sacré (94.3° vs 95.2°; $p = 0.26$) n'étaient pas significativement différents chez les gymnastes sans spondylolisthésis lorsque comparés aux valeurs rapportées dans la cohorte contrôle^{80,111}. Toutefois, l'incidence pelvienne (53.4° vs 48.2°; $p < 0.01$) et la version pelvienne (9.9° vs 5.5°; $p < 0.01$) semblaient significativement augmentées lorsque comparées aux valeurs rapportées dans la cohorte contrôle¹¹¹.

Comparaison des paramètres morphologiques entre les gymnastes avec spondylolisthésis et une cohorte de sujets non gymnastes avec spondylolisthésis

Les valeurs des différents paramètres radiologiques obtenues pour le groupe de gymnastes atteints d'un spondylolisthésis dans l'étude actuelle ont été comparées à celles rapportées dans un groupe contrôle de 91 sujets atteints d'un spondylolisthésis de bas grade mais non impliqués en gymnastique^{80,111}. L'âge moyen de ce groupe contrôle (13.5 ± 3.1 ans) était similaire à celui observé dans notre groupe de sujets avec spondylolisthésis (14.1 ± 1.9 ans; $p = 0.63$). L'incidence pelvienne (68.5° vs 63.2° ; $p = 0.37$), la version pelvienne (15.0° vs 11.9° ; $p = 0.39$), la pente sacrée (53.5° vs 51.3° ; $p = 0.66$), l'angle de table sacré (88.2° vs 88.2° ; $p = 0.99$) et le pourcentage de glissement (14.0% vs 14.7% ; $p = 0.84$) n'étaient pas significativement différents chez les gymnastes atteints d'un spondylolisthésis lorsque comparés aux valeurs rapportées dans la cohorte contrôle.

Évaluation des caractéristiques démographiques et liées à l'entraînement associées à la présence du spondylolisthésis chez les gymnastes

Le nombre d'heures d'entraînement par semaine a été la seule caractéristique ayant atteint un niveau statistiquement significatif ($p = 0.013$) entre les deux groupes, soit 20.6 ± 5.4 vs 14.4 ± 5.6 heures par semaine pour les sujets avec et sans spondylolisthésis, respectivement. Les six gymnastes de notre cohorte avec spondylolisthésis participaient à des compétitions de hauts niveaux (3 provinciales, 1 nationale et 2 internationale). Les gymnastes avec spondylolisthésis étaient similaires en terme de grandeur (1.5m) lorsque comparés à ceux sans spondylolisthésis (1.4m) ($p = 0.1$). De plus, bien que la différence n'est pas rejoint un niveau statistiquement significatif ($p = 0.057$), les gymnastes avec

spondylolisthesis (49.5kg) semblaient présenter un poids supérieur aux gymnastes sans spondylolisthesis (37.8kg). Les gymnastes présentant un spondylolisthesis semblaient plus âgées (14.1 ans vs 11.4 ans) ($p = 0.063$) et semblaient avoir plus d'expérience en gymnastique (7.7 ans vs 5.5 ans) ($p = 0.069$). Les six gymnastes avec spondylolisthesis étaient âgés de plus de 10 ans, représentant une prévalence de 10.7% (6/56 sujets) chez les sujets de plus de 10 ans.

Les radiographies postéro-antérieures nous ont permis d'identifier une inégalité de longueur de 1.2 cm au niveau des membres inférieurs chez un seul sujet non atteint d'un spondylolisthesis. Ces clichés nous ont également permis d'identifier deux sujets avec une scoliose idiopathique thoracique de 15° et 16° dans le groupe atteint d'un spondylolisthesis et deux sujets avec une scoliose idiopathique lombaire de 14° et 11° dans le groupe de gymnastes non atteints d'un spondylolisthesis.

**CHAPITRE 4 – ARTICLE 1: PREVALENCE OF SPONDYLOLISTHESIS IN A
POPULATION OF GYMNASTS**

Une copie conforme de l'article publié dans le recueil « IOS press book : Studies in health technology and informatics » lors du congrès de l'IRSSD 2010 se trouve dans les pages suivantes.

Prevalence of spondylolisthesis in a population of gymnasts

Toueg C-W, Mac-Thiong J-M, Grimard G, Poitras B, Parent S, Labelle H

IOS press book : Studies in health technology and informatics (IRSSD), 2010; 158:132-137.

Prevalence of spondylolisthesis in a population of gymnasts

Charles-William TOUEG^a, Jean-Marc MAC-THIONG^{a, b 1}, Guy GRIMARD^a, Stefan PARENT^{a, b}, Benoit POITRAS^a, Hubert LABELLE^a.

^a*Department of Orthopaedic Surgery, Sainte-Justine University Hospital Center, Montreal, Canada*

^b*Department of Orthopaedic Surgery, Montreal Sacré-Coeur Hospital, Montreal, Canada*

Abstract. Spondylolysis occurs in 6 % of the general population. Of these, approximately 75% will develop spondylolisthesis. According to multiple studies, an increased prevalence of spondylolysis and spondylolisthesis exists in groups of athletes practicing certain sports such as gymnastics. In the literature, prevalence of spondylolisthesis in gymnasts can reach up to 40 to 50 %. However, the specific risk factors associated with the development of spondylolisthesis in gymnasts are not known. The main purpose of this study was to evaluate the prevalence of spondylolysis and spondylolisthesis in a population of gymnasts, as well as the associated epidemiological characteristics. In order to achieve this goal, we presented our project to the two most renowned gymnastics centers in the city of Montreal, which allowed us to recruit a total of 92 gymnasts (19 males and 74 females). A radiological evaluation, with the low emission radiographic system, EOS, allowed us to identify the subjects that were affected by spondylolysis and spondylolisthesis. Additionally, standardized questionnaires allowed us to evaluate and compare different epidemiologic parameters such as age, height, weight, number of years of practice, number of hours of training per week. Of the 92 gymnasts evaluated clinically and radiographically, we identified 6 (1 male, 5 females) gymnasts presenting a spondylolysis and/or spondylolisthesis. This 6.5 % prevalence found in our population is similar to the one reported in the general population. Gender did not seem to be a determinant factor. Also, gymnasts with and without spondylolysis and/or spondylolisthesis seemed to be similar in terms of height. However, gymnasts with spondylolysis and/or spondylolisthesis seemed to be heavier than gymnasts without one of these two affections, older and training with greater intensity. These results suggest that the real prevalence rate of spondylolysis and spondylolisthesis in gymnasts may have been overestimated in previous studies. A selection bias, due to the high competitive level in the two gymnastics centers where our recruitment took place, could be involved. Our findings could also be the result of new or different training methods compared to those used in past studies. This might suggest that with intense training schedules, heavier individuals could potentially be prone to increased loads at the lumbosacral junction, thus favoring the development of spondylolysis and spondylolisthesis. These hypotheses should be explored in further details in the near future, especially with investigation of radiological parameters of the spine and pelvis.

Keywords. Spondylolysis, spondylolisthesis, prevalence, gymnast, athlete

Introduction

Spondylolysis is a defect in the pars interarticularis of any vertebra. It can be independent or associated with spondylolisthesis, which consists in the forward displacement of a vertebra in relation to its adjacent caudal vertebra. Spondylolysis is present in 6% of the general population. Of these, approximately 75% will develop spondylolisthesis [9]. Although many subjects with spondylolysis and low-grade spondylolisthesis are asymptomatic, pain, typically localized at the lumbosacral junction, remains the most common complaint reported in patients with one of these two affections. The exact etiology of spondylolysis and spondylolisthesis remains unknown, but is presumed to rely on multiple factors. Hereditary predisposition, trauma, growth, morphological pelvic

¹ Corresponding author : Jean-Marc Mac-Thiong, Division of Orthopaedic Surgery, Sainte-Justine University Hospital Center, 3175 Côte-Sainte-Catherine, Montreal (Qc), Canada, H3T 1C5.

abnormalities and biomechanical factors are all thought to be implicated in the development of spondylolisthesis [18]. Supporting the importance of biomechanical factors in the development of spondylolysis and spondylolisthesis is the fact that these two affections have only been reported in humans with ambulatory capabilities [25]. Several authors suggest that spondylolysis is caused by a stress fracture secondary to repetitive microtrauma [6]-[16]-[22]-[23]-[26]. In the case of spondylolisthesis without an isthmic defect, elongation of the posterior elements can be due to repeated microfractures and subsequent healing, as the disc bond slowly fails, allowing anterior translation of L5. The pars interarticularis, which is the weakest region of the posterior neural arch [6]-[16], is exposed to considerable shear, compressive and tensile stresses during trunk flexion and extension movements [3]-[6]. Accordingly, an increased prevalence of spondylolysis and spondylolisthesis has been reported in certain groups of athletes practicing specific sports, involving repetitive alternate flexion-extension loading, such as gymnastics [13]-[17], weight lifting [1] and american football [8]-[20]. However, the specific risk factors associated with the development of spondylolisthesis in gymnasts remain unknown. The objective of this study was to evaluate the prevalence of spondylolysis and spondylolisthesis in a population of gymnasts, as well as the associated epidemiological characteristics.

Method

In order to achieve this goal, we presented our project to the two most renowned gymnastic centers, affiliated to the Quebec Gymnastics Federation, in the city of Montreal. Recruitment of participants, which took place from January to March 2009, was on a voluntary basis following a presentation explaining the project to the gymnasts, their parents and their trainers. A total of 131 gymnasts, from different levels of competition (recreational to international), were invited to participate. The main reason for declining our invitation was the busy schedule of the gymnasts and their parents. Some parents also manifested their concerns regarding the exposure to radiations. In the first center, we recruited a total of 21 individuals, 19 males and 2 females. In the second center, we recruited 72 females. The inclusion criteria for being part of the project were to be practicing gymnastics at the moment of the study and be less than 25 years of age. Pregnancy and previous spinal surgery were the only two exclusion criteria. All of the 92 gymnasts recruited, aged from 5.08 (minimum) to 20.60 (maximum) years old, were submitted to a clinical, physical and radiological evaluation between March and June 2009.

Radiographs of the spine and pelvis were done with a low emission radiographic system, EOS (Biospace, Paris, France) [4], installed at Sainte-Justine Hospital. In addition to its low radiation emission, EOS allowed us to benefit from better quality images compared to conventional x-ray. Postero-anterior (PA) and lateral (Lat) radiological images were simultaneously taken with subjects standing hips and knees in extension, and elbows flexed with “fist-on-clavicles” as described by Faro et al. [7] and Horton et al. [11]. When PA and Lat views were inconclusive, additional oblique views and/or CT scan centered on the lumbosacral junction were obtained. These images allowed us to identify the subjects that were affected by spondylolysis and/or spondylolisthesis.

Systematic acquisition of clinical data was made possible by standardized questionnaires for all patients, focused on health history and level of activity. These questionnaires allowed us to evaluate and compare different epidemiologic parameters such as age, height, weight, number of years of practice and number of hours of training per week. Descriptive statistics (means and standard deviations) were evaluated on the collected data.

Results

Of the 92 gymnasts evaluated clinically and radiographically, we identified 6 gymnasts (1 male, 5 females) presenting spondylolysis and/or spondylolisthesis, aged between 11.02 (minimum) and 15.97 (maximum) years old, which represents a 6.5 % prevalence. Five of the six had a grade 1 L5-S1 spondylolisthesis according to the Meyerding classification [21]. The other had a healed bilateral spondylolysis. Gender did not seem to be a determinant factor (5.3% rate for the male group (1/19) and 6.8% rate for the female group (5/74)). Also, gymnasts with spondylolisthesis were similar in terms of height (mean height = 1.5 m) to those without spondylolisthesis (mean height = 1.4 m). However, they were found to be heavier (mean weight = 49.5 kg) than gymnasts without spondylolisthesis (mean weight = 37.8 kg). Consequently, gymnasts affected by spondylolysis and/or spondylolisthesis presented a higher body mass index (BMI) (mean BMI = 20.3 kg/m²) compared to gymnasts free of the affection (mean BMI = 18.1 kg/m²). According to these results, gymnasts with spondylolysis and/or spondylolisthesis, who were older (mean age = 14.1 years), also seemed to have been practicing gymnastics for a longer period (mean number of years of practicing gymnastics = 7.7 years) and for more hours per week (mean number of hours of training per week = 20.6 hours) than the other group (Table 1). Moreover, all six gymnasts with a spondylolysis and/or spondylolisthesis were competing at a high level (3 provincial, 1 national and 2 international). Another interesting fact is that 56 of the 92 gymnasts recruited were older than 10 years of age, representing a 10.7 % prevalence of spondylolysis and/or spondylolisthesis (6/56).

Table 1. Comparative table of the epidemiological characteristics of gymnasts with and without spondylolysis and/or spondylolisthesis

Gymnasts	Sex	Mean age (SD)	Mean number of training in hours/week (SD)	Mean number of years of practice (SD)	Mean height [m] (SD)	Mean weight [kg] (SD)	Mean BMI [kg/m ²] (SD)
With spondylolysis and/or spondylolisthesis	5F / 1M	14.13 (1.94)	20.58 (5.37)	7.67 (3.07)	1.54 (0.11)	49.47 (13.86)	20.33 (3.27)
Without spondylolysis and/or spondylolisthesis	68F / 18M	11.41 (3.91)	14.38 (5.57)	5.52 (2.97)	1.41 (0.20)	37.94 (15.98)	18.13 (2.92)

Discussion and Conclusion

The 6.5 % prevalence of spondylolysis and/or spondylolisthesis found in our population of gymnasts, which is considerably different from the 40 to 50 % prevalence reported in previous studies, is similar to the 6 % prevalence documented in the general population [6]. We were still able to observe a decreased prevalence of spondylolysis and/or spondylolisthesis (10.7 %) when we restrained our population to the 56 gymnasts of the study who were 10 years of age or older. These results suggest that the real prevalence rate of spondylolysis and spondylolisthesis in gymnasts may have been overestimated in previous studies. This could also be reflecting a selection bias in our study due to the high competitive level in the two gymnastics centers where our recruitment took place. Indeed, it is possible that a certain proportion of gymnasts may abandoned the practice of their sport because of a symptomatic spondylolysis and/or spondylolisthesis, and, in this manner, did not reach higher competitive levels. This could also be the result of new or different training methods putting less stress at the lumbosacral junction compared to those used in past studies. These hypotheses should be explored in further details in the near future.

Finally, our results indicate that gymnasts with spondylolysis and/or spondylolisthesis were heavier and seemed to have been practicing their sport for a longer period, in terms of hours of training per week and number of years of practice. Reinforcing these findings is the fact that all gymnasts with a spondylolysis and/or spondylolisthesis were competing at a high level. These differences seen between gymnasts with and without spondylolysis and/or spondylolisthesis may partially be attributed to the age discrepancy observed between them, although the great majority of the older subjects in this study did not present spondylolysis or spondylolisthesis. However, this might also suggest that heavier individuals could potentially be prone to increased loads at the lumbosacral junction, thus favoring the development of spondylolysis and/or spondylolisthesis. In addition, these results could further be demonstrating that increased training hours, associated with higher levels of competition, generates stress at the lumbosacral junction for an increased period of time, hence promoting the occurrence of spondylolysis and/or spondylolisthesis.

In conclusion, numerous studies [2]-[5]-[10]-[14]-[15]-[19]-[24] have shown that the sagittal pelvic morphology is different between healthy subjects and patients with developmental spondylolisthesis. Considering these observations, spino-pelvic morphology could possibly play a role in the development of spondylolysis and/or spondylolisthesis. Therefore, the relation between spino-pelvic morphology, the development of spondylolysis and/or spondylolisthesis and the potential risk factors mentioned earlier in this text should be analyzed in further details.

References

- [1] Bradford DS, Management of spondylolysis and spondylolisthesis, *Instruct Course Lect* (1983), 151-162.
- [2] Curylo LJ, Edwards C, DeWald RW, Radiographic markers in spondylolisthesis progression, *SPINE* **27** (2002), 2021-2025.
- [3] Dietrich M, Kurowski P, The importance of mechanical factors in the etiology of spondylolysis. A model analysis of loads and stresses in human lumbar spine, *SPINE* **10** (1985), 532-542.

- [4] Dumas R, Aissaoui R, Mitton D, et al. Personalized body segment parameters from biplanar low-dose radiography, *IEEE Trans Biomed Eng* **52** (2005), 1756-1763.
- [5] During J, Goudfrooij H, Keesses W, et al. Towards standards for posture. Postural characteristics of the lower back system in normal and pathologic conditions. *SPINE* **10** (1985), 83-87.
- [6] Farfan HF, Osteria V, Lamy C. The mechanical etiology of spondylolysis and spondylolisthesis, *Clin orthop* **117** (1976), 40-55.
- [7] Faro FD, Marks MC, Pawelek J, et al. Evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis. *SPINE* **29** (2004), 2284-2289.
- [8] Ferguson RJ, McMaster JH, Stanitski CL. Low back pain in college football linemen. *J Sports Med* **2** (1975), 63-69.
- [9] Frederickson BE, Baker D, McHolick WJ, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis, *J Bone Joint Surg Am* **66** (1984), 699-707.
- [10] Hanson DS, Bridwell KH, Rhee JM, et al. Correlation of pelvic incidence with low- and high- grade isthmic spondylolisthesis, *SPINE* **27** (2002), 2026-2029.
- [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* **30** (2005), 427-433.
- [12] Hu SS, Bradford DS, Transfeldt EE, et al. Reduction of high-grade spondylolisthesis using Edwards instrumentation, *SPINE* **21** (1996), 367-371.
- [13] Jackson DW, Wiltse LL, Cirincione RJ. Spondylolysis in the female gymnast, *Clin Orthop* **117** (1976), 68-73.
- [14] Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis, *SPINE* **28** (2003), 151-160
- [15] Labelle H, Rousouly P, Berthonnaud É, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence, and spinopelvic balance. A correlation study. *SPINE* **29** (2004), 2049-2054.
- [16] Lafferty JF, Winter WG, Gambaro SA, Fatigue characteristics of posterior elements of vertebrae, *J Bone Joint Surg Am* **58** (1997), 154-158.
- [17] Letts M, Smallman T, Afanasiev R, et al. Fracture of the pars interarticularis in adolescent athletes : a clinical biomechanical analysis. *J pediatr Orthop* **6** (1986), 40-46.
- [18] Lonstein JE. Spondylolisthesis in children. Cause, natural history, and management, *SPINE* **24** (1999), 2640-2648.
- [19] Marty C, Boiaubert B, Descamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients, *Eur SPINE J* **11** (2002), 119-125.
- [20] McCarroll JR, Miller JM, Ritter MA. Lumbar spondylolysis and spondylolisthesis in college football players. A prospective study, *Am J Sports Med* **14** (1986), 404-406.
- [21] Meyerding HW. Spondylolisthesis. *Surg Gynecol Obstet* **54** (1932), 371-377
- [22] O'Neil DB, Micheli LJ. Postoperative radiographic evidence for fatigue fracture as the etiology in spondylolysis, *SPINE* **14** (1989) 1342-1355.
- [23] Pennell RG, Maurer AH, Bonakdarpour A, Stress injuries of the pars interarticularis: radiologic classification and indications for scintigraphy. *AJR Am J Roentgenol* **145** (1985), 763-766.
- [24] Rajinics 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* **15** (2002), 24-30
- [25] Rosenberg MJ, Bargar WL, Friedman B, the incidence of spondylolysis and spondylolisthesis in nonambulatory patients, *SPINE* **6** (1981), 35-37.
- [26] Wiltse LL, Widell E Jr, Jackson DW, Fatigue fracture: the basic lesion in isthmic spondylolisthesis, *J Bone Joint Surg Am* **57** (1975), 17-22.

**CHAPITRE 5 – ARTICLE 2: SPONDYLOLISTHESIS, SACRO-PELVIC
MORPHOLOGY AND ORIENTATION IN YOUNG GYMNASTS**

Ce manuscrit fût soumis en août 2011 à la revue The Spine Journal. La version soumise, conforme aux normes de présentation de cette revue, est présentée aux pages suivantes.

Title:

Spondylolisthesis, sacro-pelvic morphology and orientation in young gymnasts

Authors :

Charles-William Toueg, M.D. ^{a,c}

Jean-Marc Mac-Thiong, M.D., Ph.D. ^{a,b,c}

Guy Grimard, M.D. ^{a,c}

Benoit Poitras, M.D. ^{a,c}

Stefan Parent, M.D., Ph.D. ^{a,b,c}

Hubert Labelle, M.D. ^{a,c}

^a *Division of Orthopaedic Surgery, Sainte-Justine University Hospital Center, Montreal, Canada*

^b *Division of Orthopaedic Surgery, Montreal Sacré-Coeur Hospital, Montreal, Canada*

^c *Department of Surgery, University of Montreal, Montreal, Canada*

Address correspondence and reprint request to:

Jean-Marc Mac-Thiong, M.D., Ph.D.

Division of Orthopedic Surgery, CHU Sainte-Justine, 3175 Côte-Sainte-Catherine, Montréal, Québec, Canada H3T 1C5;

Telephone: 514-345-4876

Fax: 514-345-4755

Funds were received in support of this work. No benefits in any form have been or will be received from a commercial party related directly or indirectly to the subject of this manuscript.

Sources of support that require acknowledgment:

Fonds de Recherche en Santé du Québec (FRSQ)

MENTOR program

A strategic training program of the Canadian Institutes of Health Research (CIHR)

Fondation de Recherche et d'Éducation en Orthopédie de Montréal (FRÉOM)

Structured Abstract

Key words

Spondylolysis, spondylolisthesis, morphology, pelvic incidence, sacral table angle, lumbosacral spine

Background Data

Numerous studies have shown that sagittal sacro-pelvic morphology and orientation is abnormal in spondylolisthesis. Sacro-pelvic morphology and orientation in gymnasts and their relationship with spondylolisthesis have never been analyzed.

Purpose

To evaluate the prevalence of spondylolisthesis in a cohort of gymnasts, as well as the associated demographic characteristics, and sacro-pelvic morphology and orientation.

Study Design

Cross-sectional evaluation of a cohort of young gymnasts.

Patient Sample

A cohort of 92 gymnasts aged 5 to 21 years recruited in two gymnastic centers.

Outcome Measures

Sex, age, height, weight, number of years of practice, weekly training load in hours, the presence of spondylolisthesis, as well as sacro-pelvic morphology and orientation in a cohort of 92 gymnasts.

Methods

Radiological evaluation of gymnasts was performed to identify spondylolisthesis, and to measure pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope and sacral table angle. Demographic and training characteristics were evaluated using standardized questionnaires.

Radiographic parameters were compared with reference values previously published.

Results

A 6.5 % prevalence of spondylolisthesis was found. The weekly training schedule was the only statistically significant different demographic characteristic between the two groups, at 20.6 ± 5.4 vs 14.4 ± 5.6 hours per week for subjects with and without spondylolisthesis, respectively. Pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope and sacral table angle were respectively $69 \pm 20^\circ$, $15 \pm 13^\circ$, $54 \pm 11^\circ$ and $88 \pm 7^\circ$ in gymnasts with spondylolisthesis, and $53 \pm 11^\circ$, $10 \pm 6^\circ$, $43 \pm 9^\circ$ and $94 \pm 6^\circ$ in gymnasts without spondylolisthesis. Pelvic incidence, sacral slope and sacral table angle were significantly different between gymnasts with and without spondylolisthesis.

Conclusions

The prevalence of spondylolisthesis in young gymnasts was similar to that observed in the general population. Sagittal sacropelvic morphology and orientation was abnormal in gymnasts with spondylolisthesis. The present study supports an association between spondylolisthesis and abnormal sacro-pelvic orientation and morphology.

Introduction

Over the past decade, many studies have reported a relationship between spino-pelvic morphology and spondylolisthesis. Duval-Beaupère et al.^{1,2} described the pelvic incidence, a fundamental pelvic anatomic parameter, specific and constant for each individual which is a strong determinant of the orientation of the pelvis as well as of the sagittal alignment of the spine. Numerous studies^{3,4,5,6,7,8,9,10} have shown that pelvic incidence is different between healthy subjects and patients with developmental spondylolisthesis, and that the difference observed tends to increase in a direct linear fashion as the severity of the spondylolisthesis increases^{5,6,7}. Labelle et al.⁷ reported that pelvic incidence was significantly greater in a large cohort of adolescents and young adults with L5-S1 developmental spondylolisthesis (71.6 ± 7.7)° when compared to a control population (51.8 ± 5.3)°. These findings suggest that subjects with increased pelvic incidence could be at higher risk of developing a spondylolisthesis secondary to the abnormal pelvis orientation with altered mechanical stresses at the lumbosacral junction.

Similarly, sacral morphology has also been implicated in the development and progression of spondylolisthesis^{10,11,12}. First described by Inoue et al.¹¹, the sacral table angle has been suggested as an etiologic factor in the development of spondylolisthesis. Wang et al.¹² have demonstrated that the sacral table angle is significantly smaller in subjects with spondylolisthesis compared to healthy subjects. It is hypothesized that a

decreased sacral table angle submits the L5-S1 junction to a higher shear stress in the erect position, thus favoring the development of a spondylolisthesis.

The exact etiology of spondylolysis and spondylolisthesis remains unknown, but is presumed to depend on multiple factors. Hereditary predisposition, trauma, growth, morphological pelvic abnormalities and biomechanical factors are all thought to be implicated in the development of spondylolisthesis¹³.

An increased prevalence of spondylolysis and spondylolisthesis has been reported in athletes practicing sports, such as gymnastics^{14,15}, weight lifting¹⁶ and American football^{17,18}, supporting the important influence of microtrauma and biomechanical loads. In the literature, prevalence of spondylolisthesis in athletes, including gymnasts, can reach up to 40 to 50 %^{14,17,19,20,21,22}. However, the influence of sacro-pelvic morphology and orientation in these high risk populations remains largely unknown. In addition, previous studies on sacro-pelvic morphology and orientation do not take into account the potential influence of sport activities on the occurrence of spondylolisthesis.

The purpose of this work is therefore to evaluate the sagittal sacro-pelvic morphology and orientation in a cohort of gymnasts, as well as its relation with spondylolisthesis.

The following hypothesis were verified: 1) sacro-pelvic morphology and orientation are abnormal in young gymnasts with L5-S1 spondylolisthesis when compared to a control population of normal gymnasts; 2) sacro-pelvic morphology and orientation are similar in young gymnasts with L5-S1 spondylolisthesis when compared to subjects with low grade

spondylolisthesis of similar age not involved in gymnastics; 3) sacro-pelvic morphology and orientation are different in gymnasts without spondylolisthesis when compared to a normal control population.

Materials and Methods

In order to achieve our goal, we presented our protocol to the two most competitive gymnastic centers in our region. Recruitment of participants took place from January to March 2009 and was done on a voluntary basis following a presentation explaining the project to the gymnasts, their parents, and their trainers. A total of 131 gymnasts, with different levels of competition (recreational to international), were invited and eligible to participate in the study. The inclusion criteria for being part of the project were to practice gymnastics at the moment of the study and to be younger than 21 years of age. Pregnancy and previous spinal surgery were the only two exclusion criteria. Subjects aged 16 or older signed an informed consent, while authorization from the parents was required for those younger than 16 years old. The protocol and consent form had been previously approved by the Institutional Review Board. In the first center, we recruited a total of 21 individuals, including 19 males and 2 females. In the second center, involving only female gymnasts, we recruited 71 females. All 92 gymnasts recruited were aged 5 to 21 years. The main reason for declining our invitation was the busy schedule of the gymnasts and their parents. Some parents also manifested their concerns regarding the exposure to radiations to justify their refusal to participate in the study. None of the gymnasts who refused to participate in the study was known for spondylolisthesis.

All subjects recruited were submitted to a clinical, physical and radiological evaluation by a spine surgeon between March and June 2009. Systematic acquisition of demographic and training data was made possible through questionnaires for all patients. These questionnaires allowed us to evaluate and compare the following characteristics: sex, age, height, weight, number of years of practice and weekly training load in hours.

Radiographs of the spine and pelvis were done with a low emission radiographic system, EOS (Biospace, Paris, France)²³, which provided overall enhanced image quality while reducing drastically from 6 to 9 times the amount of radiation to which subjects were submitted when compared to conventional x-rays²⁴. Postero-anterior (PA) and lateral (Lat) radiographic images were simultaneously taken with subjects standing with hips and knees in extension, and elbows flexed in “fist-on-clavicles” position, as described by Faro et al.²⁵ and Horton et al.²⁶. When PA and Lat views were inconclusive, additional oblique views and/or CT scan centered on the lumbosacral junction were obtained. These images allowed us to identify subjects affected by spondylolysis and/or spondylolisthesis. Pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope and sacral table angle were measured from the radiographs using the software IdefX (LIO, CHUM Notre-Dame, Montreal, Canada)^{27, 28, 29}. After 10 pre-established anatomical landmarks were identified by a single experimented user on the Lat radiograph of the 92 gymnasts, the program automatically calculated the pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope and sacral table angle (Figure 1) for each of them. In the presence of spondylolisthesis, the slip percentage was also measured. PA radiographs were used to assess leg length

discrepancy, considered significant when greater than 1 cm. These images also allowed us to identify any scoliosis (Cobb angle $> 10^\circ$) in the coronal plane. The sagittal sacro-pelvic parameters obtained in our population of normal gymnasts and in our group of gymnasts with spondylolisthesis were respectively compared to values from historical cohorts of 120 asymptomatic subjects and 91 low grade spondylolisthesis of similar age reported previously^{12, 30}. These historical cohorts did not include subjects involved in competitive gymnastics. These studies used the same software to calculate sagittal sacro-pelvic parameters and acquisition of radiographic images was made in the same position as in the current study. A Mann-Whitney U test was used to compare the groups with and without spondylolisthesis recruited for this study. A Mann-Whitney U test was also used to compare our group of gymnasts with spondylolisthesis to a control population of subjects with low grade spondylolisthesis not involved in gymnastics. A student t test was used to compare our group of gymnasts without spondylolisthesis to a normal control population. The level of significance was set to 0.05.

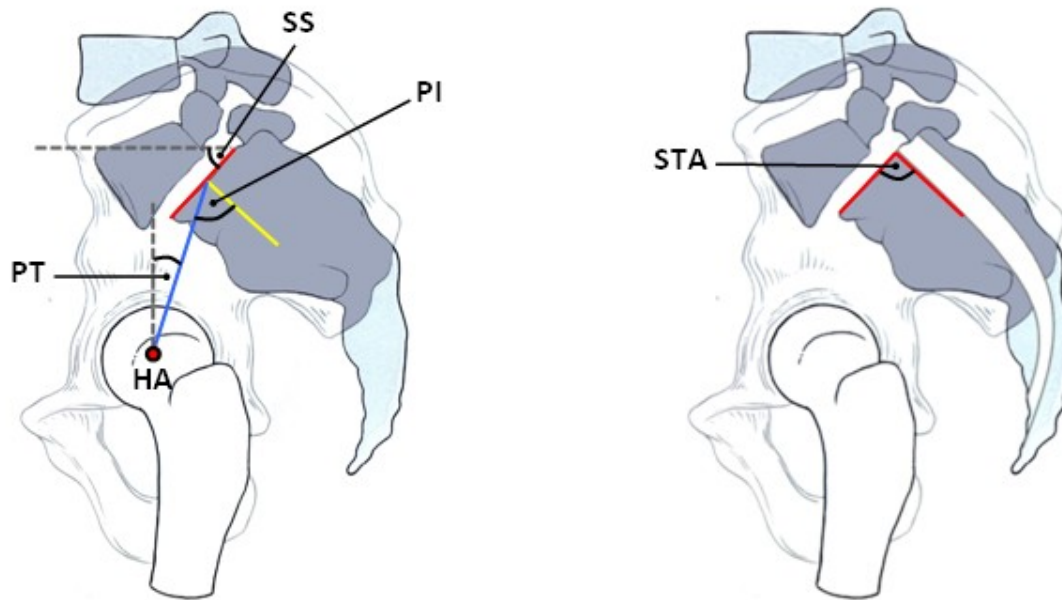


Figure 1

This figure demonstrates the geometric relationship of pelvic incidence (PI), pelvic tilt (PT), and sacral slope (SS). It also presents the sacral table angle (STA) which is the angle subtended by the sacral endplate line and a line drawn along the posterior aspect of the S1 vertebral body.

Results

Of the 92 gymnasts evaluated clinically and radiographically, we identified 6 gymnasts (1 male, 5 females) presenting spondylolisthesis (Table 1), which represents a 6.5 % prevalence. These 6 gymnasts were aged between 11 and 16 years. Five of these had a grade 1 L5-S1 isthmic spondylolisthesis according to the Meyerding classification³¹. The other had a healed bilateral spondylolysis diagnosed by CT scan following a symptomatic history and a suspicious x-ray. All six gymnasts with spondylolisthesis were competing at a high level (3 provincial, 1 national and 2 international). The training load

was the only characteristic for which statistical significance was reached between the two groups, at 20.6 ± 5.4 vs 14.4 ± 5.6 hours per week for subjects with and without spondylolisthesis, respectively. Gymnasts with spondylolisthesis were similar in terms of height (mean height = 1.5 m) when compared to those without spondylolisthesis (mean height = 1.4 m). However, they tended to be heavier (mean weight = 49.5 kg) than gymnasts without spondylolisthesis (mean weight = 37.8 kg), although the difference was not statistically significant ($p=0.057$). Consequently, gymnasts affected by spondylolisthesis presented a higher body mass index (BMI) (mean BMI = 20.3 kg/m^2) compared to normal gymnasts (mean BMI = 18.1 kg/m^2), but the difference did not reach statistical significance. Gymnasts with spondylolisthesis tended to be older (mean age = 14.1 years) and to have more experience in gymnastics (mean number of years for practicing gymnastics = 7.7 years), but the differences were not statistically significant (Table 2). All 6 gymnasts with spondylolisthesis were older than 10 years, resulting in a 10.7% (6 of 56 subjects) prevalence of spondylolisthesis if only subjects older than 10 years are considered.

PA radiographs allowed us to identify a 1.2 cm leg length discrepancy in only one gymnast without spondylolisthesis. It also gave us the opportunity to identify two subjects with idiopathic thoracic scoliosis of 15° and 16° in the spondylolisthesis group and two subjects with idiopathic lumbar scoliosis of 14° and 11° in the normal gymnast group.

Table 3 provides the measured radiological parameters separately for the gymnasts with and without spondylolisthesis. Gymnasts with spondylolisthesis have a significantly

increased pelvic incidence compared to gymnasts without spondylolisthesis. Furthermore, among gymnasts with a spondylolisthesis, the two youngest subjects were those presenting with the lowest pelvic incidence. Additionally, gymnasts with spondylolisthesis also have a significantly higher sacral slope as well as a significantly decreased sacral table angle when compared to those without spondylolisthesis. Mean pelvic tilt was increased by more than 5° in gymnasts with spondylolisthesis but the difference did not reach statistical significance.

Table 4 presents the mean pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope and sacral table angle obtained for gymnasts without spondylolisthesis in the current study in comparison to values obtained in the 120 asymptomatic control group^{12, 30}. The mean age of this control group (12.1 ± 2.6 years; range: 6.8 – 19.3 years) was similar to that observed in our group of normal gymnasts ($p=0.16$). Sacral slope and sacral table angle in the current study for gymnasts without spondylolisthesis were not significantly different from the values reported in the control cohort^{12, 30}. Pelvic incidence and pelvic tilt, however, were significantly higher in our population of normal gymnasts when compared to the control cohort³⁰.

Table 5 presents the mean pelvic incidence, pelvic tilt, sacral slope, sacral table angle and slip percentage obtained for gymnasts with spondylolisthesis in the current study in comparison to the values obtained in the 91 low grade spondylolisthesis control group^{12, 30}. The mean age of this control group (13.5 ± 3.1 years) was similar to that observed in our group of gymnasts without spondylolisthesis ($p=0.625$). Pelvic incidence, pelvic tilt,

sacral slope, sacral table angle and slip percentage for gymnasts with spondylolisthesis were similar to values reported in the low grade spondylolisthesis control group^{12, 30}.

Table 1
Demographic characteristics and radiological measurements for the 6 gymnasts with spondylolisthesis

Gymnasts	1	2	3	4	5	6	Total / (mean ± SD)
Pathology	Spondylolisthesis L5-S1	Spondylolisthesis L5-S1	Spondylolisthesis L5-S1	Spondylolisthesis L5-S1	Spondylolisthesis L5-S1	Bilateral L5 spondylolysis	
Sex	M	F	F	F	F	F	5F / 1M
Age	15.39	14.05	15.97	15.6	12.75	11.02	14.13 ± 1.94
Training load (hours/week)	24.0	18.0	28.0	15.0	15.0	23.5	20.58 ± 5.37
Number of years of practice	6.0	11.0	12.0	7.0	5.0	5.0	7.67 ± 3.07
Height [m]	1.655	1.626	1.594	1.55	1.47	1.37	1.54 ± 0.11
Weight [kg]	69.2	57.5	50.2	51.9	37.3	30.7	49.47 ± 13.86
BMI [kg/m²]	25.26	21.75	19.76	21.6	17.26	16.36	20.33 ± 3.27
Pelvic incidence [°]	86.5	65	96.1	68.7	44.5	50.3	68.50 ± 20.02
Pelvic tilt [°]	24.9	7.6	36.3	7.7	10.7	2.8	15.00 ± 12.84
Sacral slope [°]	61.6	57.4	59.9	61.0	33.9	47.5	53.50 ± 10.95
Sacral table angle [°]	80.9	89.0	81.0	90.3	100.2	88.0	88.2 ± 7.15
Slip percentage [%]	10.5	25.3	9.5	14.3	16.0	8.1	13.95 ± 6.31

* SD = Standard Deviation

** BMI = Body mass index

Table 2
Comparative table of demographic characteristics for gymnasts with and without spondylolisthesis

Gymnasts	With spondylolisthesis	Without spondylolisthesis	P value
Sex	5F / 1M	68F / 18M	-
Mean age (SD)	14.13 (1.94)	11.41 (3.91)	0.063
Mean number of training in hours/week (SD)	20.58 (5.37)	14.38 (5.57)	0.013

Mean number of years of training (SD)	7.67 (3.07)	5.52 (2.97)	0.069
Mean height [m] (SD)	1.54 (0.11)	1.41 (0.20)	0.1
Mean weight [kg] (SD)	49.47 (13.86)	37.94 (15.98)	0.057
Mean BMI [kg/m²] (SD)	20.33 (3.27)	18.13 (2.92)	0.08

Table 3

Comparative table of radiological parameters for gymnasts with and without spondylolisthesis

Gymnasts	With spondylolisthesis	Without spondylolisthesis	P value
Pelvic incidence [°] (SD)	68.50 (20.02)	53.40 (10.66)	0.02
Pelvic tilt [°] (SD)	14.98 (12.84)	9.86 (6.13)	0.376
Sacral slope [°] (SD)	53.53 (10.95)	43.49 (8.71)	0.02
Sacral table angle [°] (SD)	88.23 (7.15)	94.25 (5.92)	0.036
Slip percentage [%] (SD)	13.95 (6.31)	0	-

Table 4

Comparative table of age and sagittal sacro-pelvic parameters for gymnasts without spondylolisthesis with historical data of asymptomatic children and adolescents

Gymnasts	Without spondylolisthesis (Current study)	Historical asymptomatic control group	P value
Sex	68F / 18M	80F / 20M*	-
Age	11.41 (3.91)	12.1 (2.6)*	0.1554
Pelvic incidence [°] (SD)	53.40 (10.66)	48.2 (11.4)*	<0.01
Pelvic tilt [°] (SD)	9.86 (6.13)	5.5 (7.9)*	<0.01
Sacral slope [°] (SD)	43.49 (8.71)	42.8 (8.5)*	0.5724
Sacral table angle [°] (SD)	94.25 (5.92)	95.2 (5.9)**	0.2567

*Data from Mac-Thiong et al. (2008) Spine vol 33 no 21 : 2316-2325

**Data from Wang et al. (2008) Spine vol 33 no 22 : 2185-2191

Table 5

Comparative table of age and sagittal sacro-pelvic parameters of gymnasts with spondylolisthesis with historical data of children and adolescents with low-grade spondylolisthesis

Gymnasts	With spondylolisthesis (Current study)	Historical control group with low-grade spondylolisthesis	P value
Sex	5F / 1M	59F / 32M*	-
Age	14.13 (1.94)	13.5 (3.1)*	0.625
Pelvic incidence [°] (SD)	68.50 (20.02)	63.2 (13.6)*	0.372
Pelvic tilt [°] (SD)	14.98 (12.84)	11.9 (8.2)*	0.393
Sacral slope [°] (SD)	53.53 (10.95)	51.3 (12.1)*	0.661
Sacral table angle [°] (SD)	88.23 (7.15)	88.2 (6.3)**	0.991
Slip percentage [%] (SD)	13.95 (6.31)	14.7 (9.1)*	0.843

*Data from Mac-Thiong et al. (2008) Spine vol 33 no 21 : 2316-2325

**Data from Wang et al. (2008) Spine vol 33 no 22 : 2185-2191

Discussion

There are multiple factors implicated in spondylolysis and spondylolisthesis. As previously mentioned, certain sports such as gymnastics have been reported to predispose to the development of spondylolisthesis^{14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22}. The present study is the first to evaluate sacro-pelvic morphology and orientation in a population of gymnasts. To better investigate the potential relationship between sacro-pelvic morphology and spondylolisthesis, we have specifically selected a cohort of gymnasts in order to obtain a homogeneous group in terms of athletic activities and biomechanical loading at the lumbosacral junction. This is in contrast with previous studies that have not attempted to compare groups with similar environmental risk factors. The authors believe that comparing groups (spondylolisthesis vs. no spondylolisthesis) subjected to similar athletic activities and biomechanical loads is essential when investigating risk factors for

spondylolisthesis, since spondylolisthesis is thought to be associated with increased stresses at the lumbosacral junction.

The 6.5 % prevalence of spondylolisthesis found in our cohort of gymnasts is considerably smaller than the prevalence reported in previous studies involving gymnasts (up to 40-50% in some studies)^{14, 17, 19, 20, 21, 22}, but is similar to the 6 % prevalence documented in the general population³⁴. Although the exact cause of discrepancy in the spondylolisthesis prevalence between the current study and previous report is not known, it could be reflecting a selection bias in our study due to the high competitive level in the two gymnastics centers where our recruitment took place. Indeed, it is possible that a certain proportion of gymnasts have abandoned gymnastics because of a symptomatic spondylolisthesis before reaching higher competitive levels. However, this hypothesis is not likely because our cohort also included a large number of young subjects with only a short experience in gymnastics. More likely, this could also be associated with new or different training methods resulting in decreased repetitive stresses at the lumbosacral junction (particularly forced extension movements) compared to those prevailing in past studies, because trainers are more aware of the risk of spondylolisthesis in gymnasts. The specificity of our population could also explain the difference of prevalence observed with past studies. Our study includes athletes from all age groups (under 21) regardless of symptoms of low back pain, whereas most past studies focused on symptomatic young athletes usually aged between 12 and 18 years^{14, 17, 19, 20, 21, 22}.

While pelvic incidence and sacral slope were significantly increased in gymnasts with L5-S1 spondylolisthesis when compared to gymnasts without spondylolisthesis, sacral table angle was shown to be significantly reduced. Even though pelvic tilt was increased by more than 5° in gymnasts with spondylolisthesis, the difference did not reach statistical significance. Accordingly, the present study is in agreement with previous studies suggesting an association between abnormal sacro-pelvic morphology (higher pelvic incidence^{5, 7, 8, 9} and lower sacral table angle^{10, 11}) and spondylolisthesis. Moreover, the higher mean pelvic incidence in the group of gymnasts with spondylolisthesis is not likely to be due to their older age, although it has been demonstrated that pelvic incidence increases slightly with age³². When comparing with previous data on normal pelvic incidence³², the mean value of 67.6° for gymnasts with spondylolisthesis is higher than that expected for normal subjects at any age during adolescence.

Moreover, parameters of sacro-pelvic morphology and orientation observed in gymnasts presenting a spondylolisthesis were similar to the values previously reported in subjects with low grade spondylolisthesis of similar age not involved in gymnastics. These findings support that sacro-pelvic morphology and orientation in gymnasts with spondylolisthesis is similar to that observed in non gymnasts affected by low-grade spondylolisthesis. Although this cross-sectional study confirms that spondylolisthesis is associated with a higher pelvic incidence and lower sacral table angle, a prospective study would still be needed to determine if these abnormal findings in sagittal sacro-

pelvic morphology are primary and etiologic, or if they are secondary to remodelling of the pelvis, sacrum or sacro-iliac joints.

The two youngest gymnasts presenting a spondylolisthesis, aged 12.8 and 11.0 years, had a pelvic incidence (respectively 44.5° and 50.3°) similar or slightly smaller to that usually observed in asymptomatic children. As identified by Roussouly et al.³³, a subset of patients with low grade spondylolisthesis presents with low or normal pelvic incidence. For these patients, it is hypothesized that repetitive impingement from the posterior facets of L4 and S1 on the pars interarticularis of L5 during extension movements leads to the development of spondylolysis through the so-called nutcracker mechanism.

We have also investigated specific characteristics potentially associated with the development of spondylolisthesis in gymnasts. Although the weekly training load in hours was the only factor for which statistical significance was reached, there was a tendency for gymnasts with spondylolisthesis to be heavier and older, and to have more experience in gymnastics. Further reinforcing these findings is the fact that most gymnasts with a spondylolisthesis were competing at a high level. Heavier individuals could potentially be prone to increased loads at the lumbosacral junction, thus favoring the development of spondylolisthesis. The results could suggest that increased training hours, associated with higher levels of competition, generates more stresses at the lumbosacral junction for an increased period of time, hence promoting the occurrence of spondylolysis and spondylolisthesis. The limited statistical power of the study due to the small number of gymnasts with spondylolisthesis possibly explains the fact that statistical

significance was not reached for the majority of the characteristics although major differences were found.

The results also suggest that pelvic incidence and pelvic tilt are slightly different between gymnasts without spondylolisthesis and the historical cohort of asymptomatic subjects. Although statistically significant, the differences were small and can be partly due to measurement errors. In addition, it is possible that gymnastics exposes children and adolescents to higher loads on the spine, pelvis and hip, causing bony and/or soft tissues remodelling leading to modifications in sacro-pelvic morphology and orientation. These assumptions however need to be explored in further studies.

Conclusion

In conclusion, our results have shown that sagittal sacro-pelvic morphology and orientation is different between healthy gymnasts and gymnasts with spondylolisthesis. Our observations support the importance of sacro-pelvic morphology and orientation in spondylolisthesis, as well as other factors potentially related to the generation of increased stresses at the lumbosacral junction. However, the relation between sacro-pelvic morphology and the development of spondylolisthesis should be analyzed in further details. A prospective study would be warranted to clearly establish the exact contribution of these potential variables in spondylolisthesis.

References

1. Duval-Beaupère G, Schimdt C, Cosson P. A baricentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng* 1992; 20: 451–62
2. 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
3. Curylo LJ, Edwards C, DeWald RW. Radiographic markers in spondyloptosis. Implications for spondylolisthesis progression. *Spine* 2002; 27: 2021-2025
4. During J, Goudfrooij H, Keessen W, et al. Towards standards for posture. Postural characteristics of the lower back system in normal and pathologic conditions. *Spine* 1985; 10: 83-87
5. Hanson DS, Bridwell KH, Rhee JM, et al. Correlation of pelvic incidence with low- and high-grade isthmic spondylolisthesis. *Spine* 2002; 27: 2026-2029
6. Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine* 2003; 28: 151-160
7. Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence, and spinopelvic balance. A correlation study. *Spine* 2004; 29: 2049-2954
8. Marty C, Boisauvert B, Descamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J* 2002; 11: 119-125
9. Rajnics P, 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
10. Whitesides Jr TE, Horton WC, Hutton WC, et al. Spondylotic spondylolisthesis. A study of pelvic and lumbosacral parameters of possible etiologic effect in two distinct racial groups with high occurrence. *Spine* 2005; 30: 12-21
11. Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K. Radiographic classification of L5 isthmic spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. *Spine* 2002; 27: 831-838
12. Wang Z, Parent S, Mac-Thiong JM, et al.. Influence of sacral morphology in developmental spondylolisthesis. *Spine* 2008; 33: 2185-2191

13. Lonstein JE. Spondylolisthesis in children: Cause, natural history, and management. *Spine* 1999;24: 2640-2648
14. Jackson DW, Wiltse LL, Cirincione RJ. Spondylolysis in the female gymnast. *Clin Orthop* 1976; 117: 68-73
15. Letts M, Smallman T, Afanasiev R, et al. Fracture of the pars interarticularis in adolescent athletes: a clinical biomechanical analysis. *J Pediatr Orthop* 1986; 6: 40-46
16. Bradford DS. Management of spondylolysis and spondylolisthesis. *Instruct Course Lect* 1983; 32: 151-162
17. Ferguson RJ, McMaster JH, Stanitski CL. Low back pain in college football linemen. *J Sports Med* 1975; 2: 63-69
18. McCarroll JR, Miller JM, Ritter MA. Lumbar spondylolysis and spondylolisthesis in college football players. A prospective study. *Am J Sports Med* 1986; 14: 404-406
19. Jackson DW. Low back pain in athletes' evaluation of stress reaction and discogenic problems. *Am J Sports Med* 1979; 7: 364-366
20. Micheli LJ. Back injuries in female gymnasts. *Clin Sports Med* 1998; 4: 85-93
21. Micheli LJ, Wood R. Back pain in young athletes: significant differences from adults in causes and patterns. *Arch Pediatr Adolesc Med* 1995;149: 15-18
22. Rossi F, Dragoni S. Lumbar spondylolysis : occurrence in competitive athletes. *J Sports Med Phys Fitness* 1990; 30: 450-452
23. Dumas R, Aissaoui R, Mitton D, et al. Personalized body segment parameters from biplanar low-dose radiography. *IEEE Trans Biomed Eng* 2005; 52: 1756-1763
24. Deschênes S, Charron G, Beaudoin G, et al. Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager. *Spine* 2010; 35: 989-994
25. 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
26. 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
27. Rillardon L, Levassor N, Guigui P, et al. Validation d'un outil de mesure des paramètres pelviens et rachidiens de l'équilibre sagittal du rachis. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 2003; 89: 218-227

28. Timon SJ, Gardner MJ, Wanich T, et al. Not all spondylolisthesis grading instruments are reliable. *Clin Orthop* 2005; 434: 157-162
29. Vialle R, Ilharreborde B, Dauzac C, et al. Intra and inter-observer reliability of determining degree of pelvic incidence in high-grade spondylolisthesis using a computer assisted method. *Eur Spine J* 2006; 15: 1449-1453
30. Mac-Thiong JM, Wang Z, de Guise J, et al. Postural model of sagittal spino-pelvic alignment and its relevance for lumbosacral developmental spondylolisthesis. *Spine* 2008; 33: 2316-2325
31. Meyerding HW. Spondylolisthesis. *Surg Gynecol Obstet* 1932; 54: 371-377
32. Mac-Thiong JM, Berthonnaud É, Dimar II J, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine* 2004; 29: 1642-1647
33. 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
34. Farfan HF, Osteria V, Lamy C. The mechanical etiology of spondylolysis and spondylolisthesis. *Clin orthop* 1976; 117: 40-55

CHAPITRE 6 – DISCUSSION

Plusieurs facteurs sont impliqués dans le développement de la spondylolyse et du spondylolisthésis¹⁰. Certains sports comme la gymnastique ont été associés au développement de la spondylolyse et du spondylolisthésis^{2,3,15,68}. Plusieurs études ont aussi démontré que la morphologie et l'orientation sacro-pelviennes sont des facteurs importants dans la pathogénèse de cette atteinte^{21,22,23,24,25,26,27,28}. Dans le souci de mieux analyser la relation potentielle entre la morphologie sacro-pelvienne et le spondylolisthésis, nous avons spécifiquement sélectionné une cohorte de gymnastes dans le but d'obtenir un groupe de sujets homogène sur le plan de leurs activités athlétiques et du niveau de stress biomécanique auquel ils soumettent leur jonction lombo-sacrée.

Cette étude permet, pour la première fois, d'évaluer la morphologie et l'orientation sacro-pelviennes au sein d'une population de gymnastes. Alors que l'incidence pelvienne (68.5° vs 53.4° ; $p=0.02$) et la pente sacrée (53.5° vs 43.5° ; $p=0.02$) sont significativement augmentées chez les gymnastes avec un spondylolisthésis L5-S1 lorsque comparés aux gymnastes sans spondylolisthésis, l'angle de table sacrée a été démontré comme étant significativement abaissé (88.2° vs 94.3° ; $p=0.036$). Bien que la version pelvienne soit augmentée de plus de 5 degrés chez les gymnastes avec spondylolisthésis, cette différence n'a pas atteint un niveau statistiquement significatif (15.0° vs 9.9° ; $p=0.376$).

Une anomalie de la morphologie sacro-pelvienne (incidence pelvienne élevée et angle de table sacrée abaissé) semble donc associée au spondylolisthésis. De plus,

l'incidence pelvienne moyenne augmentée dans le groupe de gymnastes avec spondylolisthésis ne semble pas secondaire à leur âge plus élevé, bien qu'il ait été démontré que l'incidence pelvienne augmente légèrement avec l'âge. Notre valeur d'incidence pelvienne chez les gymnastes avec spondylolisthésis s'apparente aux valeurs rapportées par Marty et al.²⁶ ($64.5^\circ \pm 16^\circ$), Rajnics et al.²⁷ ($65^\circ \pm 15^\circ$), ainsi qu'au groupe de spondylolisthésis de bas grade de Hanson et al.²³ ($68.5^\circ \pm 15.5^\circ$). Le léger écart entre l'incidence pelvienne rapportée dans notre population et celle rapportée par Labelle et al.²⁵ ($71^\circ \pm 8^\circ$) s'explique possiblement par le fait que notre étude était constituée uniquement de spondylolisthésis de bas grade, telle que les études mentionnées juste avant. La comparaison de notre population à celle rapportée par Mac-Thiong et al.¹¹¹ ainsi que Wang et al.⁸⁰ demeure, toutefois, la plus valable. Ces études^{80,111}, tel que mentionné précédemment, ont utilisé le même système d'imagerie EOS, situé à l'hôpital Sainte-Justine; l'acquisition des images radiologiques se faisaient dans la même position « poing-sur-clavicule »; et le même logiciel, IdeFx, a été utilisé afin de calculer les différents paramètres radiologiques rapportés. Cependant, bien que la fiabilité inter-observateurs pour le calcul de ces différents paramètres avec le logiciel IdeFx ait été démontrée comme étant satisfaisante, nous devons mentionner qu'une personne expérimentée, mais différente, a utilisé le logiciel dans chacune des études. Ceci pourrait constituer une source d'erreur potentielle au moment de la comparaison. Les valeurs obtenues pour les différents paramètres de morphologie et d'orientation sacro-pelviennes chez nos gymnastes atteints d'un spondylolisthésis de bas grade étaient similaires à celles rapportées par Mac-Thiong et al.¹¹¹ et Wang et al.⁸⁰ dans leur population de 91 sujets non-gymnastes, d'âge similaire (14.1 ans vs 13.5°; $p=0.625$), aussi atteints d'un

spondylolisthesis de bas grade (incidence pelvienne (68.5° vs 63.2° ; $p=0.372$), version pelvienne (15.0° vs 11.9° ; $p=0.393$), pente sacrée (53.5° vs 51.3° ; $p=0.661$), angle de table sacrée (88.2° vs 88.2° ; $p=0.991$), pourcentage de glissement (14.0% vs 14.7% ; $p=0.843$)). Ces trouvailles nous laissent croire qu'une anomalie de la morphologie du sacrum, se traduisant par un angle de table sacré diminué, est centrale dans la pathogénèse du spondylolisthesis. En effet, chez un sujet en position debout, un angle de table sacrée diminué signifie une pente sacrée augmentée, se traduisant par une incidence pelvienne, elle aussi, augmentée. Cette dernière engendre, à son tour, une augmentation de la force de cisaillement à la jonction lombosacrée. Ainsi, un angle de table sacré diminué déterminé par la génétique pourrait être un facteur étiologique chez les sujets avec le spondylolisthesis. Cette étude supporte donc, encore une fois, l'importance de la relation existant entre le rachis, le sacrum et le pelvis dans le spondylolisthesis chez les gymnastes.

Les deux gymnastes les plus jeunes présentant un spondylolisthesis, âgés de 12.8 et 11.0 ans, avaient une incidence pelvienne (44.5 degrés et 50.3 degrés, respectivement) similaire, voir même peut-être légèrement abaissée par rapport aux valeurs habituellement observées chez les enfants asymptomatiques. Tel qu'identifié par Roussouly et al.⁷⁶, une certaine proportion de patients atteints d'un spondylolisthesis de bas grade présente une valeur d'incidence pelvienne normale ou abaissée. Pour ces patients, l'hypothèse d'un mécanisme de coincement répétitif de la pars interarticularis de L5 entre les facettes postérieures de L4 et S1 durant les mouvements d'extension du tronc fût soulevée afin d'expliquer le développement du spondylolisthesis par un mécanisme de

« casse-noisette ». Bien que l'hypothèse de mécanisme de « casse-noisette » de Roussouly⁷⁶ ait été avancée pour les sujets présentant une incidence pelvienne inférieure à 40 degrés, il se pourrait que dans le domaine de la gymnastique, en raison des mouvements d'hyperextension forcée répétés, le phénomène se produise à des niveaux d'incidence pelvienne se rapprochant davantage de la valeur moyenne normale.

Les résultats suggèrent également que l'incidence pelvienne (53.4° vs 48.2°; $p < 0.01$) et la version pelvienne (9.9° vs 5.5°; $p < 0.01$) sont légèrement différentes entre les gymnastes sans spondylolithésis et une cohorte historique de sujets asymptomatiques¹¹¹. Bien que statistiquement significatives, ces différences sont petites et peuvent être, en partie ou en totalité, secondaires aux erreurs de mesure. Il est, toutefois, possible que la gymnastique expose les enfants et adolescents à un stress augmenté au niveau du rachis, du bassin et des hanches, causant un remodelage osseux et/ou des tissus mous entraînant des modifications de la morphologie et de l'orientation sacro-pelviennes. Cette possible découverte soulève l'hypothèse que les gymnastes avec et sans spondylolithésis sont soumis à des contraintes biomécaniques au niveau de leur jonction lombo-sacrée qui pourraient entraîner un remodelage potentiel de leur morphologie sacro-pelvienne. À l'opposé, une incidence pelvienne augmentée de façon primaire pourrait constituer un avantage morphologique dans la pratique de la gymnastique. En effet, les gymnastes présentant une incidence pelvienne augmentée pourraient être favorisés de façon substantielle dans la maîtrise des nombreux et différents mouvements d'hyperextension du tronc que la pratique de leur sport leur impose. De cette manière, une sélection naturelle des gymnastes avec cette morphologie et orientation sacro-pelviennes

particulières surviendrait, faisant en sorte que les gymnastes avec une incidence pelvienne augmentée pratiquent la gymnastique plus longtemps ou à de plus hauts niveaux. Toutes ces hypothèses devraient cependant être explorées plus en détails dans de futures études à composante prospective qui nous permettront de suivre et d'évaluer l'évolution d'une population d'athlètes dans le domaine de la gymnastique en fonction de leur caractéristiques de morphologie et orientation sacro-pelviennes spécifiques.

L'une des forces de ce projet est qu'il nous a permis d'identifier à la fois les cas de spondylolisthésis symptomatiques et asymptomatiques (habituellement laissés pour compte) au sein d'une population présentant une certaine homogénéité de ses facteurs de risque et une prévalence potentiellement accrue de spondylolisthésis. La prévalence de spondylolisthésis de 6.5% au sein de notre cohorte de gymnastes est considérablement inférieure aux prévalences rapportées dans les études précédentes impliquant des gymnastes (jusqu'à 40-50%)^{2,3,15,68}, mais se rapproche de la prévalence de 6% documentée⁹ dans la population générale au même âge. Bien que la cause exacte de cet écart par rapport aux études précédentes ne soit pas connue, il pourrait refléter la présence d'un biais de sélection au sein de notre étude en rapport au niveau élevé de compétition des deux centres de gymnastiques dans lesquels le recrutement a eu lieu. En effet, il est possible qu'une certaine proportion de gymnastes ait abandonné la gymnastique en raison d'un spondylolisthésis symptomatique avant d'avoir atteint des niveaux de compétition supérieurs. Cependant, cette hypothèse est peu probable parce que notre cohorte comportait un nombre significatif de sujets pratiquant la gymnastique à

un niveau récréatif seulement. Chez les 13 gymnastes de niveau récréatif ou local, aucun ne présentait de spondylolisthésis.

Par ailleurs, le recrutement dans l'étude de sujets avec un niveau d'expérience variable, dont certains pratiquant la gymnastique depuis à peine une année, pourrait aussi contribuer à la faible prévalence observée. Le peu d'expérience de certains sujets pourrait en effet faire en sorte que leur jonction lombo-sacrée n'ait pas été soumise à des stress biomécaniques suffisamment longtemps pour qu'une spondylolyse se développe. Cependant, parmi les gymnastes sans spondylolisthésis, 76 pratiquaient la gymnastique depuis plus de 3 ans, 36 compétitionnaient au niveau provincial, et 21 compétitionnaient au niveau national et international. De plus, notre protocole prévoyait des radiographies de contrôle un an après les radiographies initiales pour les sujets sans spondylolisthésis afin d'évaluer s'ils avaient développé un spondylolisthésis après une année additionnelle de pratique de la gymnastique. Alors que la majorité des sujets ont été réévalués, aucun nouveau cas de spondylolisthésis n'a encore été détecté. En somme, le seul fait de pratiquer la gymnastique et de soumettre le corps à des contraintes biomécaniques importantes ne semble pas suffisant pour produire une spondylolyse. Ces résultats sont en accord avec la théorie multifactorielle¹⁰ de l'étiologie du spondylolisthésis. Ils supportent également l'importance d'études comme celle-ci, qui, à travers l'évaluation de la morphologie sacro-pelvienne, cherchent un facteur intrinsèque à chaque individu pouvant influencer la façon dont le stress est distribué à la jonction lombo-sacrée.

De façon plus tangible, la faible prévalence de spondylolisthesis observée pourrait s'expliquer par des méthodes d'entraînement différentes ou nouvelles appliquant moins de stress répétés à la jonction lombo-sacrée (particulièrement les mouvements d'extension forcée). En effet, nos rencontres avec les entraîneurs ont permis de mettre en évidence une conscientisation accrue par rapport aux risques augmentés de spondylolisthesis chez les gymnastes.

Certaines caractéristiques de notre cohorte pourraient aussi expliquer la différence de prévalence avec les études précédentes. Notre étude comprend des athlètes de tous les groupes d'âge (moins de 21 ans) indépendamment de la présence ou non de symptômes douloureux dans la région lombo-sacrée, alors que la plupart des études antérieures se sont concentrées sur de jeunes athlètes symptomatiques habituellement âgés entre 12 et 18 ans.

Notre valeur de prévalence s'écarte des valeurs rapportées par le passé, incluant plus spécifiquement celle de 11% présentée par Jackson¹⁵ dans son étude portant sur une population de 100 gymnastes. Malgré que les critères de sélection de Jackson¹⁵ soient grandement similaires à ceux de notre étude, nous devons souligner la différence de moyenne d'âge entre les deux populations. En effet, notre population présentait une moyenne d'âge de 11.5 ans alors que celle de Jackson¹⁵ était de 14 ans. Cette différence d'âge en plus d'être associée à un nombre d'années de pratique de la gymnastique différent, survient autour de la période potentiellement critique de la poussée de croissance. Ainsi, elle pourrait expliquer, du moins en partie, la différence de prévalence

observée entre les deux populations. D'ailleurs, au sein de notre population, lorsque seulement les gymnastes âgés de plus de 10 ans étaient considérés, une augmentation de la prévalence du spondylolisthésis à 10.7% (6/56) était observée. Il est aussi important de noter que dans son évaluation radiologique, Jackson¹⁵ utilisait des vues obliques de façon systématique, alors que nous avons recours à ces vues spécifiques ou au scan qu'en cas de doute clinique ou radiologique. Bien qu'il soit largement accepté dans la littérature de considérer que les individus asymptomatiques, avec un examen clinique ainsi que des radiographies simples PA et LAT sans particularités soient normaux, ceci aurait pu faire en sorte qu'un certain nombre de spondylolyse asymptomatique soit passé inaperçu dans notre étude.

À ce propos, l'une des limites de cette étude est liée au diagnostic du spondylolisthésis à partir de radiographies simples PA et LAT. Idéalement, une investigation additionnelle à l'aide d'un CT scan, d'une IRM ou d'une scintigraphie osseuse permettrait une meilleure sensibilité dans le diagnostic du spondylolisthésis, surtout lorsque seulement un spondylolyse est présent. Toutefois, dans le cadre de l'étude actuelle, à la moindre suspicion à l'histoire clinique, à l'examen physique ou à l'imagerie, nous procédions avec un CT scan centré sur la jonction lombo-sacrée. À ce sujet, il est à noter qu'il est largement accepté dans la littérature de considérer que les individus asymptomatiques avec un examen clinique normal et l'absence de spondylolisthésis ou de spondylolyse noté sur les radiographies simples PA et LAT soient considérés comme étant normaux. Par ailleurs, aucune étude, avec CT scan, de la prévalence de la spondylolyse et du

spondylolisthésis chez des sujets asymptomatiques, sans évidence d'atteinte à la radiographie simple, n'est parue jusqu'à ce jour.

L'ensemble des biais que présente cette étude tendent à abaisser la valeur obtenue de la prévalence du spondylolisthésis dans notre population. Ainsi, nous pouvons statuer que la prévalence du spondylolisthésis dans notre population de gymnastes est similaire à celle retrouvée dans la population générale, sans toutefois être en mesure d'exclure hors de tout doute qu'elle n'est pas plus élevée.

Nous avons aussi investigué un certain nombre de caractéristiques spécifiques potentiellement associées au développement de la spondylolyse et du spondylolisthésis chez les gymnastes. Bien que le nombre d'heures d'entraînement par semaine ait été le seul facteur statistiquement significatif ($p = 0.013$), une tendance marquée des gymnastes avec spondylolisthésis à être plus lourds ($p = 0.057$), plus âgés ($p = 0.063$) et à avoir plus d'années d'expérience dans le domaine ($p = 0.069$), a été observée. À cela s'ajoute le fait que la plupart des gymnastes avec un spondylolisthésis pratiquaient à de hauts niveaux de compétition. Les individus plus lourds pourraient potentiellement exposer leur jonction lombo-sacrée à un stress plus important, favorisant ainsi le développement du spondylolisthésis. Les résultats pourraient suggérer qu'un nombre d'heures d'entraînement élevé, associé avec des niveaux de compétition supérieurs, soumettent la jonction lombo-sacrée à un stress considérable pour une période de temps plus importante, favorisant ainsi le développement d'un spondylolyse et spondylolisthésis. Le nombre restreint de gymnastes avec spondylolisthésis pourrait possiblement expliquer le fait

qu'une différence statistiquement significative n'ait pas pu être obtenue pour la majorité des caractéristiques, bien qu'une différence majeure ait été démontrée.

Malheureusement, cette étude ne permet pas de déterminer précisément si les anomalies observées sont primaires et étiologiques, ou si elles sont secondaires au remodelage du sacrum et du bassin. Les individus pratiquant la gymnastique sont possiblement moins à risque de spondylolisthésis que l'on pouvait le croire. En effet, on pourrait croire qu'avec un programme d'entraînement adéquat, soumettant la jonction lombo-sacrée à une quantité limitée de stress, les gymnastes ne seraient pas plus à risque de présenter un spondylolisthésis. Il n'en demeure pas moins que les gymnastes présentant des symptômes de douleur lombo-sacrée demeureraient à risque considérable de présenter un spondylolisthésis en raison du stress non négligeable à laquelle ils soumettent leur charnière lombo-sacrée. En ce sens, la nécessité d'un programme de dépistage, clinique et radiologique, du spondylolisthésis généralisé à l'ensemble de la population gymnastique ne peut être recommandé sur la base des trouvailles de l'étude actuelle et reste à déterminer. Toutefois, les gymnastes présentant un tableau de douleur lombo-sacrée, et ainsi à risque de présenter un spondylolisthésis, pourraient certainement bénéficier d'un programme de prise en charge précoce de leurs symptômes. Bien que cette étude ne puisse pas démontrer clairement l'importance de l'angle de table sacrée et de l'incidence pelvienne dans le screening du spondylolisthésis, elle confirme l'importance des deux variables dans l'évaluation de la progression du spondylolisthésis L5-S1 à partir du moment de son apparition. En effet, ces deux mesures se veulent un reflet de la sévérité des changements, primaires et/ou secondaires, survenant au niveau de

la morphologie et de l'équilibre sacro-pelviens en relation au spondylolisthésis. Cette étude semble également suggérer l'existence de covariables additionnelles, encore inconnues, impliquées dans le développement et la progression du spondylolisthésis.

CHAPITRE 7 – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans le passé, Duval-Beaupère et al.¹²⁷ ont démontré que l'incidence pelvienne constitue un paramètre anatomique important déterminant la configuration anatomique du pelvis et influençant grandement la configuration sagittale du rachis et, ainsi, de l'équilibre sagittal spino-pelvien global. Plusieurs études^{21,22,24,25,26,27,28} ont ensuite suggéré une association entre une morphologie et orientation sacro-pelvienne anormale, et le spondylolisthésis. En effet, plusieurs d'entre-elles^{21,23,25,26,27} proposent une relation entre une incidence pelvienne augmentée et cette affection. Dans un contexte où la littérature rapporte une prévalence augmentée de spondylolisthésis chez les gymnastes^{2,3,15,68}, il s'avère essentiel de bien comprendre les particularités de l'équilibre spino-pelvien chez ces derniers, qu'ils soient atteints ou non-atteints d'un spondylolisthésis, afin d'évaluer l'importance du rôle de la morphologie et de l'orientation sacro-pelvienne dans le développement et l'évolution du spondylolisthésis chez cette population à haut risque.

Nos résultats ont démontré que les gymnastes atteints d'un spondylolisthésis présentent une morphologie et une orientation sacro-pelvienne sagittale différentes de celles des gymnastes normaux, mais similaire à celle de sujets non-gymnastes atteints d'un spondylolisthésis de bas grade. Nos observations supportent l'importance du rôle de la morphologie et de l'orientation sacro-pelvienne dans le développement du spondylolisthésis, en plus de souligner l'effet potentiellement non négligeable de certaines caractéristiques démographiques générant un stress augmenté à la jonction lombo-sacrée. De plus, la prévalence de spondylolisthésis de 6.5% trouvée dans notre

cohorte de gymnastes, similaire à celle rapportée dans la population générale⁹, soulève l'hypothèse selon laquelle les sujets pratiquant la gymnastique de façon encadrée sont possiblement moins à risque de spondylolisthésis que l'on pouvait le croire. Ces mêmes résultats présentent l'aspect contributif, mais non essentiel, de différentes caractéristiques, démographiques et liées à la morphologie sacro-pelvienne, impliquées dans le développement du spondylolisthésis. En ce sens, ils supportent la théorie multifactorielle¹⁰ de l'étiologie du spondylolisthésis.

La relation entre la morphologie sacro-pelvienne et le développement du spondylolisthésis mérite cependant d'être explorée plus en détails. Dans cette perspective, l'étude présentée se poursuivra à l'aide d'évaluation annuelle des sujets permettant ainsi une analyse prospective de l'influence de la morphologie sacro-pelvienne et de l'équilibre spino-pelvien sur l'apparition et l'évolution du spondylolisthésis. Nous espérons donc, à partir de cette première étude prospective dans la littérature, établir un consensus clair sur les paramètres de morphologie sacro-pelvienne et d'équilibre spino-pelvien à utiliser dans l'évaluation clinique et le traitement du spondylolisthésis. Par ailleurs, il deviendrait possible de conseiller les athlètes désirant participer à des activités à haut risque de développer un spondylolisthésis et ce, à partir de leur morphologie sacro-pelvienne et de leur équilibre spino-pelvien. Plus spécifiquement, il deviendrait possible de leur exposer leur risque de développer un spondylolisthésis, de subir une progression de leur spondylolisthésis, ou de devoir subir une chirurgie.

RÉFÉRENCES

- 1- Jackson RP, Hales C. Congruent spinopelvic alignment on standing lateral radiographs of adult volunteers. *Spine* 2000;25:2808-2815
- 2- Letts M, Smallman T, Afanasiev R, et al. Fracture of the pars interarticularis in adolescent athletes: a clinical biomechanical analysis. *J Pediatr Orthop* 1986;6:40-46
- 3- Micheli LJ, Wood R : Back pain in young athletes. *Arch Pediatr Adolesc Med* 1995 ;149 :15-18.
- 4- Farfan HF, Osteria V, Lamy C. The mechanical etiology of spondylolysis and spondylolisthesis. *Clin Orthop* 1976;117:40-55.
- 5- Hutton WC, Stott JR, Cyron BM. Is spondylolysis a fatigue fracture? *Spine* 1977;2:202-209.
- 6- Lafferty JF, Winter WG, Gambaro SA. Fatigue characteristics of posterior elements of vertebrae. *J Bone Joint Surg Am* 1997;58:154-158.
- 7- Herbinaux G. *Traité sur divers accouchements laborieux et sur les polypes de la matrice*. Brussels, Belgium: JL DeBoubers, 1782
- 8- Kilian HF. *Schilderungen neuer Beckenformen und ihres Verhaltens im Leben*. Mannheim, Verlag von Bassermann und Mathy, 1854.
- 9- Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1984;66:699-707.
- 10- Lonstein JE. Spondylolisthesis in children. Cause, natural history, and management. *Spine* 1999;24:2640-2648.
- 11- Beutler WJ, Fredrickson BE, Murtland A, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. 45-year follow-up evaluation. *Spine* 2003;28:1027-1035.
- 12- Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1984;66:699-707.
- 13- Monticelli G, Ascani E. Spondylolysis and spondylolisthesis. *Acta Orthop Scand* 1975;46:498-506.
- 14- Wiltse LL, Jackson DW. Treatment of spondylolisthesis and spondylolysis in children. *Clin Orthop* 1976;117:92-100.

- 15- Jackson DW, Wiltse LL, Cirincoine RJ. Spondylolysis in the female gymnast. *Clin Orthop* 1976;117:68-73.
- 16- Bradford DS. Management of spondylolysis and spondylolisthesis. *Instruct Course Lect* 1983;32:151-162.
- 17- Ferguson RJ, McMaster JH, Stanitski CL. Low back pain in college football linemen. *J Sports Med* 1975;2:63-69
- 18- McCarroll JR, Miller JM, Ritter MA. Lumbar spondylolysis and spondylolisthesis in college football players. A prospective study. *Am J Sports Med* 1986;14:404-406.
- 19- Mac-Thiong J-M, Labelle H, Berthonnaud É, et al. Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents. *Eur Spine J* 2007;16:227-234.
- 20- Mac-Thiong J-M, Berthonnaud É, Dimar II JR, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine* 2004;29:1642-1647.
- 21- Curylo LJ, Edwards C, DeWald RW. Radiographic markers in spondyloptosis. Implications for spondylolisthesis progression. *Spine* 2002;27:2021-2025.
- 22- During J, Goudfrooij H, Keessen W, et al. Towards standards for posture. Postural characteristics of the lower back system in normal and pathologic conditions. *Spine* 1985;10:83-87.
- 23- Hanson DS, Bridwell KH, Rhee JM, et al. Correlation of pelvic incidence with low- and high-grade isthmic spondylolisthesis. *Spine* 2002;27:2026-2029.
- 24- Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine* 2003;28:151-160.
- 25- Labelle H, Roussouly P, Berthonnaud É, et al. Spondylolisthesis, pelvic incidence, and spinopelvic balance. A correlation study. *Spine* 2004;29:2049-2954.
- 26- Marty C, Boisaubert B, Descamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients. *Eur Spine J* 2002;11:119-125.
- 27- 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.
- 28- Whitesides Jr TE, Horton WC, Hutton WC, et al. Spondylotic spondylolisthesis. A study of pelvic and lumbosacral parameters of possible etiologic effect in two genetically and geographically distinct groups with high occurrence. *Spine* 2005;30(6S):S12-S21.

- 29- Friberg S. Studies on spondylolisthesis. *Acta Chir Scand* 1939;82(Suppl):56.
- 30- Newman PH, Stone KH. The etiology of spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Br* 1963;45:39-59.
- 31- Taillard WF. Etiology of spondylolisthesis. *Clin Orthop* 1976;117:30-39.
- 32- Turner RH, Bianco A Jr. Spondylolysis and spondylolisthesis in children and teenagers. *J Bone Joint Surg Am* 1971;53:1298-1306.
- 33- Wiltse LL. Spondylolisthesis in children. *Clin Orthop* 1961;21:156-163.
- 34- Borkow SE, Kleiger B. Spondylolisthesis in the newborn. A case report. *Clin Orthop* 1971;81:73-76.
- 35- Eisenstein S. Spondylolysis: a skeletal investigation of two population groups. *J Bone Joint Surg Br* 1978;60:488-494.
- 36- Rowe GG, Roche MB. The etiology of separate neural arch. *J Bone Joint Surg Am* 1953;35:102-109.
- 37- Kettelkamp DB, Wright DG. Spondylolysis in the Alaskan Eskimo. *J Bone Joint Surg Am* 1971;53:563-566.
- 38- Merbs CF. Spondylolysis in Inuit skeletons from Arctic Canada. *Int J Osteoarchaeol* 2002;12:279-290.
- 39- Simper LB. Spondylolysis in Eskimo skeletons. *Acta Orthop Scand* 1986;57:78-80.
- 40- Stewart T. The age incidence of neural arch defects in Alaskan natives, considered from the standpoint of etiology. *J Bone Joint Surg Am* 1953;35:937-959.
- 41- Tower SS, Pratt WB. Spondylolysis and associated spondylolisthesis in Eskimo and Athabaskan populations. *Clin Orthop* 1990;250:171-175.
- 42- Lenke LG, Bridwell KH. Evaluation and surgical treatment of high-grade isthmic dysplastic spondylolisthesis. *Instruct Course Lect* 2003;52:525-532.
- 43- Saraste H, Brostrom LA, Aparisi T. Prognostic radiographic aspects of spondylolisthesis. *Acta Radiol Diagn* 1984;25:427-432.
- 44- Saraste H. Long-term clinical and radiological follow-up of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1987;7:631-638.
- 45- Wiltse LL, Newman PH, Macnab I. Classification of spondylolysis and spondylolisthesis. *Clin Orthop* 1976;117:23-29.

- 46- Marchetti PC, Bartolozzi P. Classification of spondylolisthesis as a guideline for treatment. In: Bridwell KH, DeWald RL, Hammerberg KW, et al., eds. *The Textbook of Spinal Surgery*, 2nd ed. Philadelphia, PA: Lippincott-Raven;1997:1211-1254.
- 47- Herman MJ, Pizzutillo PD, Cavalier R. Spondylolysis and spondylolisthesis in the child and adolescent athlete. *Orthop Clin North Am* 2003;34:461-467.
- 48- McCarroll JR, Miller JM, Ritter MA. Lumbar spondylolysis and spondylolisthesis in college football players. A prospective study. *Am J Sports Med* 1986;14:404-406.
- 49- Standaert CJ. Spondylolysis in the adolescent athlete. *Clin J Sport Med* 2002;12:119-122.
- 50- Sys J, Michielsens 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.
- 51- Mardjetko S, Albert T, Andersson G, et al. Spine/SRS Spondylolisthesis Summary Statement, *Spine* 2005;30:S3.
- 52- Mac-Thiong J-M and Labelle H. A proposal for a surgical classification of pediatric lumbosacral spondylolisthesis based on the literature. *Eur Spine J* 2006;15:1425-1435.
- 53- Mac-Thiong JM, Labelle H, Parent S, et al. Reliability and development of a new classification of lumbosacral spondylolisthesis. *Scoliosis* 2008; 3:19
- 54- Labelle H, Mac-Thiong J-M, Roussouly P. Spino-pelvic sagittal balance of spondylolisthesis: a review and classification. *Eur Spine J* 2011; publié en ligne 2/8/2011
- 55- Meyerding HW. Spondylolisthesis. *Surg Gynecol Obstet* 1932;54:371-377.
- 56- Hresko MT, Labelle H, Roussouly P, et al. Classification of high-grade spondylolisthesis based on pelvic version and spine balance: possible rationale for reduction. *Spine* 2007;32:2208-2213.
- 57- Mac-Thiong JM, Duong L, Parent S, et al. Reliability of the SDSG classification of lumbosacral spondylolisthesis. *Spine* 2011. en voie de publication.
- 58- Haukipuro K, Keranen N, Koivisto E, et al. Familial occurrence of lumbar spondylolysis and spondylolisthesis. *Clin Genet* 1978;13:471-476.
- 59- Wynne-Davies R, Scott JH. Inheritance and spondylolisthesis: a radiologic family survey. *J Bone Joint Surg Br* 1979;61:301-305.

- 60- Albanese M, Pizzutillo PD. Family study of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Pediatr Orthop* 1982;2:496-499.
- 61- Laurent LE, Einola S. Spondylolisthesis in children and adolescents. *Acta Orthop Scand* 1961;31:45-64.
- 62- Carl RL, Noonan, KJ, Nemeth BA. Isthmic spondylolisthesis in a nonambulatory patient. A case report. *Spine* 2007; 32:E723-E724.
- 63- O'Neil DB, Micheli LJ. Postoperative radiographic evidence for fatigue fracture as the etiology in spondylolysis. *Spine* 1989;14:1342-1255.
- 64- Pennell RG, Maurer AH, Bonakdarpour A. Stress injuries of the pars interarticularis: radiologic classification and indications for scintigraphy. *AJR Am J Roentgenol* 1985;145:763-766.
- 65- Wiltse LL, Widell E Jr, Jackson DW. Fatigue fracture: the basic lesion in isthmic spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1975;57:17-22.
- 66- Hammerberg KW. New concepts on the pathogenesis and classification of spondylolisthesis. *Spine* 2005;30;S4-11.
- 67- Dietrich M, Kurowski P. The importance of mechanical factors in the etiology of spondylolysis. A model analysis of loads and stresses in human lumbar spine. *Spine* 1985;10:532-542.
- 68- Soler T, Claderon C. The prevalence of spondylolysis in the Spanish elite athlete. *Am J Sports Med.* 2000;28;57-62.
- 69- Robin H, Damsin JP, Filipe G, et al. Spinal deformities in Marfan disease [in French]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1992;78:464-469.
- 70- Sponseller PD, Hobbs W, Riley 3rd LH, et al. The thoracolumbar spine in Marfan syndrome. *J Bone Joint Surg Am* 1995;77:867-876.
- 71- Taylor LJ. Severe spondylolisthesis and scoliosis in association with Marfan's syndrome. Case report and review of the literature. *Clin Orthop* 1987;221:207-211.
- 72- Winter RB. Severe spondylolisthesis in Marfan's syndrome: report of two cases. *J Pediatr Orthop* 1982;2:51-55.
- 73- Nematbakhsh A, Crawford AH. Non-adjacent spondylolisthesis in Ehlers-Danlos syndrome. *J Pediatr Orthop B* 2004;13:336-339.
- 74- Basu PS, Hilali Noordeen MH, Elsebaie H. Spondylolisthesis in osteogenesis imperfecta due to pedicle elongation: report of two cases. *Spine* 2001;26:E506-E509.

- 75- Rask MR. Spondylolisthesis resulting from osteogenesis imperfecta: report of a case. Clin Orthop 1979;139:164-166.
- 76- 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.
- 77- Huang RP, Bohlman HH, Thompson GH, et al. Predictive value of pelvic incidence in progression of spondylolisthesis. Spine 2003;28:2381-2385.
- 78- Antoniadou SB, Hammerberg KW, Dewald RL. Sagittal plane configuration of the sacrum in spondylolisthesis. Spine 2000;25:1085-1091.
- 79- Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K. Radiographic classification of L5 isthmic spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. Spine 2002;27:831-838.
- 80- Wang Z, Parent S, Mac-Thiong JM, et al. Influence of sacral morphology in developmental spondylolisthesis. Spine 2008; 33: 2185-2191.
- 81- Blackburne JS, Velikas EP. Spondylolisthesis in children and adolescents. J Bone Joint Surg Br 1977;59:490-494.
- 82- Sairyo K, Katoh S, Ikata T, et al. Development of spondylolytic olisthesis in adolescents. Spine J 2001;1:171-175.
- 83- Seitsalo S, Osterman K, Hyvarinen H, et al. Progression of spondylolisthesis in children and adolescents. A long-term follow-up of 272 patients. Spine 1991;16:417-421.
- 84- Yue W-M, Brodner W, Gaines RW. Abnormal spinal anatomy in 27 cases of surgically corrected spondyloptosis: proximal sacral endplate damage as a possible cause of spondyloptosis.. Spine 2005;30 :S22-6.
- 85- Kajiura K, Katoh S, Sairyo K, et al. Slippage mechanism of pediatric spondylolysis: biomechanical study using immature calf spines. Spine 2001;26:2208-2213.
- 86- Konz RJ, Goel VK, Grobler LJ, et al. The pathomechanism of spondylolytic spondylolisthesis in immature primate lumbar spines. *In vitro* and finite element assessments. Spine 2001;26:E38-E49.
- 87- Sakamaki T, Sairyo K, Katoh S, et al. The pathogenesis of slippage and deformity in the pediatric lumbar spine: a radiographic and histologic study using a new rat *in vivo* model. Spine 2002;28:645-650.
- 88- Sairyo K, Katoh S, Sakamaki T, et al. Vertebral forward slippage in immature lumbar spine occurs following epiphyseal separation and its occurrence is unrelated to disc

degeneration. Is the pediatric spondylolisthesis a physis stress fracture of vertebral body? *Spine* 2004;29:524-527.

89- Curylo LJ, Edwards C, DeWald RW. Radiographic markers in spondyloptosis. Implications for spondylolisthesis progression. *Spine* 2002;27:2021-2025.

90- Miyake R, Ikata T, Katoh S, et al. Morphologic analysis of the facet joint in the immature lumbosacral spine with special reference to spondylolysis. *Spine* 1996;21:783-789.

91- Yue W-M, Brodner W, Gaines RW. Abnormal spinal anatomy in 27 cases of surgically corrected spondyloptosis. Proximal sacral endplate damage as a possible cause of spondyloptosis. *Spine* 2005; 30(6S):S22-S26.

92- Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1984; 66:699-707.

93- Molinari RW, Bridwell KH, Lenke LG, et al. Complications in the surgical treatment of pediatric high-grade, isthmic dysplastic spondylolisthesis. A comparison of three surgical approaches. *Spine* 1999; 24:1701-1711.

94- Belfi LM, Ortiz O, Katz DS. Computed tomography evaluation of spondylolysis and spondylolisthesis in asymptomatic patients. *Spine* 2006; 31:E907-E910.

95- Sherman FC, Wilkinson RH, Hall JE. Reactive sclerosis of a pedicle and spondylolysis in the lumbar spine. *J Bone Joint Surg Am* 1977; 59:49-54.

96- Sairyō K, Katoh S, Takata Y, et al. MRI signal changes of the pedicle as an indicator for early diagnosis of spondylolysis in children and adolescents. A clinical and biomechanical study. *Spine* 2006; 31:206-211.

97- Vallois HV, Lozarthès G. Indices lombaires et indice lombaire total [in French]. *Bull Soc Anthropol* 1942; 3:117.

98- Mac-Thiong J-M, Labelle H, Parent S, et al. Assessment of sacral doming in lumbosacral spondylolisthesis. *Spine* 2007;1888-1895.

99- Frennered AK, Danielson BI, Nachemson AL. Natural history of symptomatic isthmic low-grade spondylolisthesis in children and adolescents: a seven-year follow-up study. *J Pediatr Orthop* 1991;11:209-213.

100- Baker D, McHollick W. Spondylolysis and spondylolisthesis in children. *J Bone Joint Surg Am* 1956;38:933-934.

101- Bradford DS. Spondylolysis and spondylolisthesis. *Curr Pract Orthop Surg* 1979;8:12-37.

- 102- Dubousset J. Treatment of spondylolysis and spondylolisthesis in children and adolescents. *Clin Orthop* 1997;337:77-85.
- 103- Hu SS, Bradford DS. Spondylolysis and spondylolisthesis. In: Weinstein SL, ed. *The Pediatric Spine Principles and Practice*. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins;2001:433-451.
- 104- Seitsalo S, Osterman K, Poussa M, et al. Spondylolisthesis in children under 12 years of age: long-term results of 56 patients treated conservatively or operatively. *J Pediatr Orthop* 1988;8:516-521.
- 105- Barash HL, Galante JO, Lambert CN, et al. Spondylolisthesis and tight hamstrings. *J Bone Joint Surg Am* 1970;52:1319-1328.
- 106- Libson E, Bloom RA, Shapiro Y. Scoliosis in young men with spondylolysis or spondylolisthesis. A comparative study in symptomatic and asymptomatic subjects. *Spine* 1984;9:445-447.
- 107- Mau H. Scoliosis and spondylolysis-spondylolisthesis. *Arch Orthop Trauma Surg* 1981;99:29-34.
- 108- Pneumaticos SG, Esses SI. Scoliosis associated with lumbar spondylolisthesis: a case presentation and review of the literature. *Spine J* 2003;3:321-324.
- 109- Lenke LG, Bridwell KH, Bullis D, et al. Results of in-situ fusion for isthmic spondylolisthesis. *J Spinal Disord* 1992;5:433-442.
- 110- Kuntz C, Levin LS, Ondra SL, et al. Neutral upright sagittal spinal alignment from the occiput to the pelvis in asymptomatic adults: a review and resynthesis of the literature. *J Neurosurg Spine* 2007;6:104-112.
- 111- Mac-Thiong J-M, Wang Z, de Guise JA, et al. Postural model of sagittal spino-pelvic alignment and its relevance for lumbosacral developmental spondylolisthesis. *Spine* 2008; 33: 2316-25.
- 112- Roussouly P, Gollogly S, Nosedà O, et al. The vertical projection of the sum of the ground reactive forces of a standing patient is not the same as the C7 plumb line. A radiographic study of the sagittal alignment of 153 asymptomatic volunteers. *Spine* 2006;31:E320-E325.
- 113- Taillard WF. Le spondylolisthésis chez l'enfant et l'adolescent. Étude de 50 cas. *Acta Orthop Scand* 1954;24:115-144.
- 114- Timon SJ, Gardner MJ, Wanich T, et al. Not all spondylolisthesis grading instruments are reliable. *Clin Orthop Relat Res* 2005; 434:157-62.

- 115- Lowe RW, Hayes TD, Kaye J, et al. Standing roentgenograms in spondylolisthesis. *Clin Orthop Relat Res* 1976; 117:80–4.
- 116- Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, et al. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *JBJS* 1984; 66:699–707.
- 117- Mac-Thiong JM, Labelle H. Spondylolysis and spondylolisthesis. Kim DH, Betz RR, Huhn SL, eds. *Surgery of the Pediatric Spine*. New York, NY:Thieme Medical Publishers Inc.; 2007: 236–56.
- 118- Antoniadou SB, Hammerberg KW, DeWald RL. Sagittal plane configuration of the sacrum in spondylolisthesis. *Spine* 2000;25:1085–91.
- 119- Inoue H, Ohmori K, Miyasaka K. Radiographic classification of L5 isthmic spondylolisthesis as adolescent or adult vertebral slip. *Spine* 2002; 27:831–8.
- 120- Jackson RP, Phipps T, Hales C, et al. Pelvic lordosis and alignment in spondylolisthesis. *Spine* 2003; 28:151–60.
- 121- Huang RP, Bohlman HH, Thompson GH, et al. Predictive value of pelvic incidence in progression of spondylolisthesis. *Spine* 2003; 28: 2381–5.
- 122- Wiltse LL, Winter RB. Terminology and measurement of spondylolisthesis. *JBJS* 1983; 65:768–72.
- 123- Boxall D, Bradford DS, Winter RB. Management of severe spondylolisthesis in children and adolescents. *JBJS* 1979; 61:479–95.
- 124- Bourassa-Moreau E, Mac-Thiong J-M, Labelle H. Redefining the Technique for the radiologic measurement of slip in spondylolisthesis. *Spine* 2010; 30: 1401-1405.
- 125- Boxall D, Bradford DS, Winter RB, et al. Management of severe spondylolisthesis in children and adolescents. *J Bone Joint Surg Am* 1979;61:479-495
- 126- 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.
- 127- Duval-Beaupère G, Schimdt C, Cosson P. A baricentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng* 1992; 20: 451–62.
- 128- Lowe J, Schachner E, Hirschberg E, et al. Significance of bone scintigraphy in symptomatic spondylolysis. *Spine* 1984;9:653-655.

- 129- Van der Oever M, Merrick MV, Scott JH. Bone scintigraphy in symptomatic spondylolysis. *J Bone Joint Surg Br* 1987;69:453-456.
- 130- 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.
- 131- Collier BD, Johnson RP, Carrera GF. Painful spondylolysis or spondylolisthesis studied by radiography and single-photon emission computed tomography. *Radiology* 1985;154:207-211.
- 132- Dumas R, Aissaoui R, Mitton D, et al. Personalized body segment parameters from biplanar low-dose radiography. *IEEE Trans Biomed Eng* 2005; 52: 1756-1763
- 133- Deschênes S, Charron G, Beaudoin G, et al. Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager. *Spine* 2010; 35: 989-994
- 134- 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
- 135- 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
- 136- Rillardon L, Levassor N, Guigui P, et al. Validation d'un outil de mesure des paramètres pelviens et rachidiens de l'équilibre sagittal du rachis. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 2003; 89: 218-227
- 137- Vialle R, Ilharreborde B, Dauzac C, et al. Intra and inter-observer reliability of determining degree of pelvic incidence in high-grade spondylolisthesis using a computer assisted method. *Eur Spine J* 2006; 15: 1449-1453

ANNEXES

QUESTIONNAIRE CLINIQUE

Nom: _____

Prénom: _____

Club de gymnastique: _____

Date d'aujourd'hui (JJ/MM/AAAA)

--	--	--

IDENTIFICATION

1. Quel est votre date de naissance (JJ/MM/AAAA) ?

--	--	--

2. Quel est votre sexe ?

 F M

3. Quel est votre ethnicité ?

 Amérindien Asiatique Afro-américain ou noir Hispanique Caucasien ou blanc Autre – Spécifiez : _____**CARACTÉRISATION DE DOULEUR LOMBO-SACRÉE**

4. Avez-vous déjà ressentie de la douleur dans le bas du dos dans le passé ?

 Oui, de façon constante Oui, souvent Oui, parfois Oui, mais rarement Non, jamais

5. Ressentez-vous toujours actuellement de façon soutenue ou intermittente de la douleur dans le bas du dos (région lombo-sacrée) ?

 Oui, la douleur est constante Oui, la douleur est variable Non**N.B. Si vous avez répondu que la douleur était constante à la question 5, sautez la question suivante. Passez à la question 7.**

6. Si la douleur est variable, les épisodes de douleur surviennent-ils :

- à n'importe quel moment de la journée
- seulement au lever
- seulement en fin de journée
- seulement après une activité physique soutenue
- autre :

spécifiez _____

7. La douleur au bas du dos est-elle présente au repos ?

- Oui, tout le temps
- Oui, la plupart du temps
- Parfois
- Rarement
- Non, jamais

8. La douleur au bas du dos nuit-elle à votre endormissement ou à votre sommeil ?

- Oui, tout le temps
- Oui, la plupart du temps
- Parfois
- Rarement
- Non, jamais

9. Quelle est l'intensité maximale de douleur au bas du dos que vous avez ressentie dans la dernière semaine sur une échelle de 1 à 10 ?

- 1 (faible) 6
- 2 7
- 3 8
- 4 9
- 5 10 (élevé)

10. Est-ce que l'un ou l'autre des événements suivants ont contribué à vos problèmes de dos ? (Choisissez autant que nécessaire)

- Raison inconnue
- Déformation de la colonne vertébrale connue
- Accident / Trauma
- Accident de travail
- Accident en travaillant autour de la maison
- Sport
- Stress
- Autre – Spécifiez : _____

11. Sentez-vous que la douleur ressentie dans le bas du dos s'étend au niveau de l'une ou l'autre des régions suivantes ? (Choisissez autant que nécessaire)

- Aucunement
- Au niveau des fesses
- À l'arrière des cuisses

- Au niveau des jambes (i.e. au niveau des mollets ou des tibias)
- S'étend à un autre endroit
Spécifiez _____

SYMPTÔMES NEUROLOGIQUES

12. Avez-vous déjà ressenti des engourdissements ou sensations anormales ou douleur aux jambes que vous croyez être en relation avec la condition de votre dos ?

- Dans le passé, de façon constante, mais actuellement résolu
- Dans le passé, de façon intermittente, mais actuellement résolu
- Actuellement, de façon constante
- Actuellement, de façon intermittente
- Jamais

13. Avez-vous déjà ressenti des faiblesses aux jambes que vous croyez être en relation avec la condition de votre dos ?

- Dans le passé, de façon constante, mais actuellement résolu
- Dans le passé, de façon intermittente, mais actuellement résolu
- Actuellement, de façon constante
- Actuellement, de façon intermittente
- Jamais

14. Avez-vous déjà eu des épisodes d'incontinence urinaire ou fécale que vous croyez être en relation avec la condition de votre dos ?

- Dans le passé, de façon constante, mais actuellement résolu
- Dans le passé, de façon intermittente, mais actuellement résolu
- Actuellement, de façon constante
- Actuellement, de façon intermittente
- Jamais

DIAGNOSTIC ET TRAITEMENT

15. Avez-vous déjà consulté un médecin en raison de la douleur que vous éprouvez dans le bas du dos ?

- Oui
- Non

N.B. Si vous avez répondu non à la question 15, passez à la question 19

16. Si vous avez déjà consulté un médecin en raison de la condition de votre dos, était-ce un :

- MD généraliste
- MD spécialiste

Spécifiez la ou les spécialités dans lesquelles vous avez été vu :

17. Si vous avez déjà consulté un médecin, quel fût le diagnostic émis par ce dernier pour expliquer la condition affectant votre dos ?

18. Êtes-vous actuellement toujours suivi par un médecin pour vos problèmes de dos ?

- Oui
 Non

19. Avez-vous passé l'un ou l'autre des examens diagnostiques suivants pour la condition qui affecte votre dos ?

	NON	OUI	Si oui, spécifiez la date de l'examen
Rayons-X			
Scan			
EMG			
IRM			
Autre			
SVP Spécifiez le test:			

20. Avez-vous eu recours à l'un ou l'autre des traitements suivants pour la condition qui affecte votre dos ? (Sélectionnez autant que nécessaire)

- Aucun
 Repos au lit
 Traction
 Physiothérapie
 Massothérapie
 Manipulation de la colonne par un chiropraticien, un ostéopathe, un MD ou un physiothérapeute
 Support dorsal, brace, corset, plâtre
 Stimulation électrique
 Injections (ex. épiscopurale, etc.)
 Programme d'exercice spécifique
 Autre

SVP Spécifiez : _____

21. Avez-vous, actuellement, toujours recours à l'un ou l'autre des traitements suivants pour la condition qui affecte votre dos ? (Sélectionnez autant que nécessaire)

- Aucun
 Repos au lit
 Traction
 Physiothérapie
 Massothérapie

- Manipulation de la colonne par un chiropraticien, un ostéopathe, un MD ou un physiothérapeute
- Support dorsal, brace, corset, plâtre
- Stimulation électrique
- Injections (ex. épidurale, etc.)
- Programme d'exercice spécifique
- Autre

SVP Spécifiez : _____

22. SVP listez l'ensemble des médicaments (à la fois prescrits et non-prescrits) que vous prenez présentement, la posologie usuelle et la raison pour laquelle vous prenez chacun d'eux.

Médicaments	Posologie usuelle	Raison

ANTÉCÉDENTS MÉDICAUX ET CHIRURGICAUX

23. Indiquez si vous avez l'un ou l'autre des problèmes de santé suivants :

	NON	OUI	Décrivez
Fièvre, perte de poids ou malaise			
Problèmes gastriques ou intestinaux			
Problème respiratoires / pulmonaires (ex. asthme, bronchite)			
Urinaire (problèmes ou fréquence urinaire augmentée)			
Reproducteurs (écoulement, troubles sexuels)			
Nez / Gorge (écoulement, congestion, douleur, sinus)			
Yeux / Oreilles (vision double ou embrouillée, douleur, rougeur)			
Peau (rash ou autre)			
Neurologique (maux de tête, perte de conscience, confusion, convulsion)			
Hématologique (anémie ou autre)			

Musculosquelettique (ex. Fracture, atrophie, douleur articulaire, raideur)			
Psychiatrique (ex. Dépression, trouble de l'humeur ou du sommeil)			
Allergies			

24. Indiquez si vous ou un membre de votre famille (mère, père, frères/sœurs) avez l'une ou l'autre des affections médicales suivantes :

	Patient		Membre de la famille			
	Non	Oui	Non	Oui	Incertain	Relation (si oui)
Arthrite						
Haute pression						
Problèmes cardiaques						
Diabète						
Cancer						
Ostéoporose						
Scoliose						
Spondylolisthésis						
Problèmes au bas du dos						
Autres problèmes de dos						
Spécifiez: _____						

25. SVP listez l'ensemble des chirurgies que vous avez subit dans le passé en indiquant le type de chirurgie, la date et la raison de chaque intervention.

Type de chirurgie	Date	Raison

26. Est-ce que vous fumez ou utilisez d'autres produits dérivés du tabac ?

- Oui
 Non

N.B. Si vous avez répondu non à la question 26, sautez à la question 29

27. Si vous fumez, combien de cigarettes par jour consommez-vous en moyenne ? (20 cigarettes = 1 paquet)

- Moins de 1 paquet
 1 paquet
 2 paquets
 3 paquets

Plus de 3 paquets

28. Si vous fumez, depuis combien de temps êtes-vous fumeur ?

Moins de 6 mois

6 mois à 1 an

1 à 2 ans

2 à 4 ans

4 à 6 ans

Plus de 6 ans

POUR LES FILLES SEULEMENT

29. Avez-vous commencé à être menstrué ?

Non

Oui si oui, depuis quand (mois/année) : _____

QUESTIONNAIRE SUR LE NIVEAU D'ACTIVITÉ PHYS.

Nom: _____

Prénom: _____

Club de gymnastique: _____

1. Si impliqué dans des activités physiques, quelles des activités suivantes pratiquez-vous le plus ? (Sélectionnez autant que nécessaire)

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Ballet | <input type="checkbox"/> Jogging |
| <input type="checkbox"/> Baseball | <input type="checkbox"/> Arts martiaux |
| <input type="checkbox"/> Basketball | <input type="checkbox"/> Soccer |
| <input type="checkbox"/> Danse | <input type="checkbox"/> Football |
| <input type="checkbox"/> Natation | <input type="checkbox"/> Gymnastiques |
| <input type="checkbox"/> Haltérophilie | <input type="checkbox"/> Hockey |
| <input type="checkbox"/> Autre – Spécifiez : _____ | |
| _____ | |

Pour chacun des sports coché à la question précédente :

2. pour : _____ (indiquez le sport)

a) Le plus haut niveau de compétition auquel vous avez participé :

- loisir
- local
- régional
- provincial
- national
- international

b) Le nombre moyen d'heures de pratique par semaine durant la dernière année ?

- moins de 5 h par semaine
- 5 à 10 h par semaine
- 10 à 15 h par semaine
- 15 à 20 h par semaine
- plus de 20 h par semaine

c) Combien de mois par années pratiquez-vous ce sport ?

- moins de 3 mois par année
- 3 à 6 mois par année
- 6 à 9 mois par année
- Toute l'année

d) Depuis combien de temps pratiquez-vous ce sport ?

- depuis moins de 6 mois
- depuis 6 mois à 1 an
- depuis 1 à 2 ans
- depuis 2 à 5 ans
- depuis 5 à 10 ans
- depuis plus de 10 ans

e) Le nombre de compétition par année auxquels vous participez dans le cadre de ce sport ?

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- plus de 6

3. pour : _____ (indiquez le sport)

a) Le plus haut niveau de compétition auquel vous avez participé :

- loisir
- local
- régional
- provincial
- national
- international

b) Le nombre moyen d'heures de pratique par semaine durant la dernière année ?

- moins de 5 h par semaine
- 5 à 10 h par semaine
- 10 à 15 h par semaine
- 15 à 20 h par semaine
- plus de 20 h par semaine

c) Combien de mois par années pratiquez-vous ce sport ?

- moins de 3 mois par année
- 3 à 6 mois par année
- 6 à 9 mois par année
- Toute l'année

d) Depuis combien de temps pratiquez-vous ce sport ?

- depuis moins de 6 mois
- depuis 6 mois à 1 an
- depuis 1 à 2 ans

- depuis 2 à 5 ans
- depuis 5 à 10 ans
- depuis plus de 10 ans

e) Le nombre de compétition par année auxquels vous participez dans le cadre de ce sport ?

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- plus de 6

4. pour : _____ (indiquez le sport)

a) Le plus haut niveau de compétition auquel vous avez participé :

- loisir
- local
- régional
- provincial
- national
- international

b) Le nombre moyen d'heures de pratique par semaine durant la dernière année ?

- moins de 5 h par semaine
- 5 à 10 h par semaine
- 10 à 15 h par semaine
- 15 à 20 h par semaine
- plus de 20 h par semaine

c) Combien de mois par années pratiquez-vous ce sport ?

- moins de 3 mois par année
- 3 à 6 mois par année
- 6 à 9 mois par année
- Toute l'année

d) Depuis combien de temps pratiquez-vous ce sport ?

- depuis moins de 6 mois
- depuis 6 mois à 1 an
- depuis 1 à 2 ans
- depuis 2 à 5 ans
- depuis 5 à 10 ans
- depuis plus de 10 ans

e) Le nombre de compétition par année auxquels vous participez dans le cadre de ce sport ?

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- plus de 6

