

Alignement sagittal et rachialgies

S. PESENTI, S. PROST, E. CHOUFANI, B. BLONDEL, J-L. JOUVE

Introduction

Les dorso-lombalgies sont un motif de consultation fréquent en orthopédie pédiatrique. Au vu de la littérature, on retrouve une incidence en augmentation au cours des dernières décennies, atteignant jusqu'à 2/3 des enfants en âge scolaire [1]. Les origines des douleurs de dos chez l'enfant sont multifactorielles et peuvent s'expliquer par les phénomènes de croissance, les modifications du mode de vie et l'augmentation de la sédentarité et enfin la pratique d'activités sportives inadaptées pour l'âge[2].

Certaines pathologies rachidiennes peuvent entraîner des douleurs de dos. En effet, la spondylolyse accompagnée ou non de spondylolisthésis, la dystrophie rachidienne de croissance (maladie de Scheuermann), la scoliose ou certaines tumeurs/infections rachidiennes sont autant de pathologies pouvant entraîner des douleurs de dos. Elles doivent être recherchées systématiquement devant des symptômes douloureux chez l'enfant. Cependant, dans 70% des cas, aucune étiologie n'est retrouvée malgré un bilan d'imagerie poussé[3]. Se pose alors la question de la statique du rachis et de son rôle dans la genèse des douleurs qui sont alors considérées comme d'origine musculaire.

Il faut différencier la notion d'équilibre de la notion d'alignement. L'équilibre a été défini par Jean Dubousset comme « la stabilité dans le mouvement ». Cela implique une notion dynamique, qui par définition n'est pas analysable par la photographie instantanée que représente la radiographie. Nous parlerons donc ici d'alignement sagittal, notion qui s'intéresse à la description radiographique des courbures sagittales du rachis et du pelvis. L'alignement sagittal est une notion relativement jeune. Elle est née dans les années 70 sous l'égide de « l'école française ». Dans les années 1990, Ginette Duval Beaupère a développé la notion de paramètres pelviens et du centre de masse[4]. Jean Dubousset, en 1994 a introduit les notions de cône d'économie et de vertèbre pelvienne[5]. Un peu plus tard, Bernhardt et al. ont démontré qu'il existait une proportionnalité entre les courbures sagittales du rachis[6]. Depuis, l'importance de l'alignement sagittal physiologique ou de ses modifications dans les pathologies rachidiennes prend une place de plus en plus importante dans la compréhension de la physiologie de la station érigée.

Notions d'alignement sagittal

Pourquoi l'alignement sagittal ?

La notion d'alignement sagittal du rachis n'a de sens que du fait de la bipédie exclusive. En effet, chez les espèces quadrupèdes, le rachis ne comporte qu'une seule grande courbure cyphotique. L'acquisition d'une bipédie permanente dans l'espèce humaine a nécessité des adaptations morphologiques permettant le maintien de station érigée, tout en économisant un maximum d'énergie musculaire. D'un point de vue anthropologique, l'acquisition de la station debout a nécessité une mise en extension des genoux et des hanches, puis une antéversion progressive du bassin. En réponse à cette antéversion pelvienne, le rachis lombaire s'est mis en lordose, condition indispensable pour un travail musculaire économique[7].

Contrairement à ce qui a longtemps été pensé, la lordose lombaire ou lombo-sacrée existe dès la vie fœtale chez l'Humain[8]. On peut penser qu'après des milliers d'années d'adaptation de notre posture, la bipédie est maintenant inscrite dans notre code génétique. Nous sommes donc la seule espèce à avoir une succession de courbures sagittales rachidiennes dont la logique s'envisage de caudal en céphalique :

- Une lordose lombaire, concave en arrière, en réponse à l'antéversion pelvienne
 - Une cyphose thoracique concave en avant, pour augmenter le volume de la cage thoracique
 - Une lordose cervicale (la plupart du temps) concave en arrière, permettant le maintien du regard horizontal.
- A noter que la courbure sagittale du rachis cervical présente une grande variabilité interindividuelle.

Organisation spino-pelvienne

L'alignement sagittal est une adaptation du rachis à la position érigée, et en particulier à la nouvelle position du bassin que cela implique. Comme cité plus haut, Bernhardt et al. ont introduit la notion de proportionnalité des courbures sagittales[6]. Il existe ainsi une chaîne de corrélations entre les paramètres pelviens et les courbures sagittales du rachis[6].

Le bassin est le premier élément à prendre en compte dans l'analyse de l'alignement sagittal du rachis, Jean Dubousset l'ayant défini comme une véritable « vertèbre pelvienne »[5]. Cet élément primordial est le piédestal du rachis et joue un double rôle. En premier lieu, son anatomie, et plus précisément l'orientation du sacrum au sein de l'anneau pelvien, va définir l'amplitude des courbures rachidiennes sus-jacentes. Son deuxième rôle tient à sa capacité de rotation autour

des têtes fémorales (anté ou rétroversion), qui va lui permettre d'agir comme un véritable régulateur de la posture, permettant de maintenir un tronc vertical en cas de diminution ou d'augmentation des courbures sagittales sus-jacentes, comme dans le cadre d'une pathologie rachidienne ou au cours du vieillissement normal du rachis.

D'un point de vue radiographique, le bassin est analysé selon trois paramètres pelviens (Figure 1) :

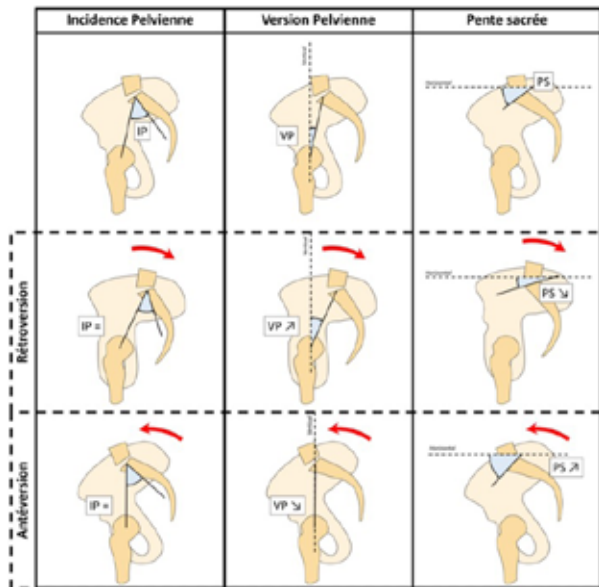


Figure 1 – Paramètres pelviens. L'incidence pelvienne est un paramètre anatomique : elle ne varie pas avec l'anté- ou la rétroversion pelvienne. IP : incidence pelvienne, VP : version pelvienne, PS : Pente sacrée

- L'incidence pelvienne

C'est l'angle entre une perpendiculaire au plateau supérieur de S1 et la ligne reliant le centre du plateau supérieur de S1 et le centre des têtes fémorales. Il s'agit d'un paramètre anatomique, indépendant de la position du sujet. Il reflète l'orientation du sacrum au sein de l'anneau pelvien : en cas de faible incidence pelvienne, le sacrum sera plus vertical ; en cas de grande incidence pelvienne, le sacrum sera plus horizontal. Il n'existe pas de valeur normale de ce paramètre, mais retenons que 75% de la population a une incidence comprise entre 40 et 60° (moyenne de 53°[9]).

- La version pelvienne

C'est l'angle entre la verticale et la ligne reliant le milieu du plateau supérieur de S1 et le centre des têtes fémorales. Il s'agit d'un paramètre positionnel qui mesure l'orientation du bassin dans le plan sagittal. Une faible version pelvienne reflète un bassin antéversé (sacrum positionné au-dessus des têtes fémorales) alors qu'une grande version pelvienne reflète un bassin rétroversé (sacrum en arrière des têtes fémorales). La valeur normale de la version pelvienne est inférieure à 15-20°.

- Pente sacrée

C'est l'angle entre l'horizontale et le plateau supérieur de S1. Il s'agit là encore d'un paramètre positionnel. Il varie en fonction de l'orientation sagittale du bassin,

en même temps que la version pelvienne : plus la version pelvienne augmente, plus la pente sacrée diminue.

Il existe une relation trigonométrique entre ces 3 paramètres : Incidence Pelvienne = Version Pelvienne + Pente Sacrée.

Immédiatement au-dessus du sacrum, on retrouve la lordose lombaire. Il s'agit d'une courbure rachidienne concave en arrière. Historiquement, sa mesure a été décrite comme l'angle entre le plateau supérieur de L1 et le plateau supérieur de S1. Pierre Roussouly a secondairement introduit la notion de courbures globales du rachis, mettant en avant que la « longueur » de la lordose lombaire pouvait varier au sein d'une population saine. En effet, en fonction de l'incidence pelvienne, on pourra avoir une lordose très courte et de faible amplitude. A l'inverse, on retrouve souvent une lordose de grande amplitude et s'étendant au rachis thoracique inférieur dans les incidences élevées. C'est la base de la classification des types de dos de Roussouly[10]. Cependant, la littérature récente a démontré que malgré ces variations interindividuelles, la mesure entre L1 et S1 permettait d'obtenir une évaluation fiable de la lordose lombaire chez la grande majorité des sujets[11]. Le rachis lombaire est un segment extrêmement mobile dans les 3 plans de l'espace et assure la majeure partie de la mobilité du tronc. Il n'existe pas réellement de valeur normale, l'amplitude la lordose étant essentiellement dépendante de l'incidence pelvienne (petite incidence, petite lordose ; grande incidence, grande lordose). De façon simplifiée, on peut retenir que la lordose lombaire L1-S1 doit être comprise dans la fourchette incidence pelvienne ± 10°. En effet, il a été démontré que le respect de ce rapport (« PI-LL mismatch ») en postopératoire permettait de diminuer les complications mécaniques et d'améliorer les résultats fonctionnels[12].

La cyphose thoracique est la courbure rachidienne sus-jacente à la lordose lombaire. Elle est en général mesurée de T1, T2 ou T4 à T12[13]. Son amplitude dépend de la lordose lombaire. En revanche, elle est assez mal corrélée à l'incidence pelvienne[14]. En pathologie rachidienne pédiatrique, on retrouve de fréquentes modifications de la cyphose thoracique (typiquement diminuée dans la scoliose idiopathique, ou à l'inverse augmentée dans la dystrophie rachidienne de croissance).

Enfin, la dernière courbure sagittale concerne le rachis cervical. Celui-ci est souvent en lordose mais il existe une très grande variabilité. La courbure sagittale est dépendante de la cyphose thoracique. Elle est en effet très bien corrélée à l'orientation sagittale de T1. La littérature récente utilise la pente de T1 (angle entre l'horizontale et le plateau supérieur de T1) comme une sorte de « pente sacrée du rachis cervical »[15]. Plus la pente de T1 sera élevée (et donc plus la cyphose thoracique sera importante), plus la lordose cervicale augmentera. A l'instar du rachis lombaire, le rachis

cervical a une grande mobilité et permet le maintien du regard horizontal. Il assure aussi un rôle primordial dans l'orientation des organes des sens (vue, ouïe, etc...).

Les travaux récents de la Société Française de Chirurgie du Rachis ont permis de préciser l'évolution des paramètres sagittaux en fonction de la croissance[16]. En premier lieu, on retrouve une augmentation de l'incidence pelvienne au début du pic de croissance pubertaire. En réponse à cette modification du piédestal du rachis, on retrouve une augmentation de la lordose lombaire, survenant dans la phase d'accélération de la croissance. Enfin, l'augmentation de la lordose lombaire va entraîner une augmentation de la cyphose thoracique, dans la deuxième moitié du pic e croissance.

Bases de l'analyse de l'alignement sagittal

Dans le cadre de pathologies rachidiennes, ou de symptomatologie douloureuse, il est primordial de rechercher des modifications de l'alignement sagittal. Plusieurs éléments sont à prendre en compte.

En premier lieu, il faut rechercher des perturbations de l'alignement global. En pratique, l'alignement global est considéré comme maintenu ou neutre lorsque la tête reste au-dessus du bassin. Il peut s'évaluer par une multitude de paramètres, mais en pratique clinique courante, le plus simple reste de mesurer le Sagittal Vertical Axis (SVA) : il s'agit de la distance horizontale entre le coin postéro-supérieur de S1 et la verticale passant par le centre de C7. La normale est inférieure à 5 cm (il est important de noter que la mesure de ce paramètre nécessite des radiographies calibrées). Chez l'enfant, la physiologie musculaire et la mobilité globale du rachis étant en général excellente, il est rare de voir des défauts d'alignement global du rachis.

Ensuite, il faut rechercher des défauts d'alignement locaux. En d'autres termes, il faut rechercher des modifications des courbures physiologiques du rachis. L'élément primordial est de différencier ce qui est une déformation « primaire » de ce qui est de l'ordre du phénomène de compensation. En effet, la modification d'une courbure locale va entraîner des modifications compensatrices des courbures sus- et sous-jacentes, de façon à maintenir un alignement global normal (tronc vertical et tête au-dessus du bassin) (Figures 2).

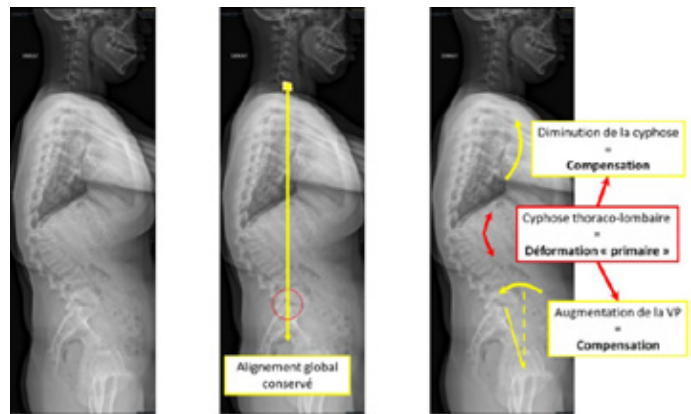


Figure 2 – Analyse de l'alignement sagittal global et local. Ici, l'alignement global est conservé. L'anomalie primaire est la cyphose thoraco-lombaire. En réponse, on retrouve une rétroversion pelvienne et une diminution de la cyphose thoracique, permettant de maintenir un alignement global neutre (tête au-dessus du bassin)

D'une façon générale, il faut retenir qu'une modification des courbures dans le sens de la lordose (augmentation de la version pelvienne, augmentation de la lordose lombaire, diminution de la cyphose) va dévier l'alignement global vers l'arrière. A l'inverse, une modification dans le sens de la cyphose (antéversion pelvienne, diminution de la lordose lombaire, augmentation de la cyphose thoracique) va dévier l'alignement global vers l'avant.

Dans le cadre des défauts d'alignement antérieurs, il faut noter que lorsque les capacités de rétroversion pelvienne sont « épuisées » (rétroversion maximum), on assistera à une flexion des hanches et des genoux pour artificiellement augmenter la rétroversion pelvienne. Notons également que la capacité de rétroversion est plus importante lorsque l'incidence pelvienne est élevée. En théorie, il est impossible d'avoir une pente sacrée négative.

Liens entre alignement sagittal et douleurs

La prise en compte de l'alignement sagittal dans l'évaluation des pathologies rachidiennes devient de plus en plus importante. Chez l'adulte, le rôle du mauvais alignement sagittal est maintenant bien connu, et son influence sur la qualité de vie est démontrée[17]. L'alignement sagittal et la qualité de sa restauration joue un rôle important dans la qualité des résultats post-opératoires chez l'adulte, que ce soit en pathologie dégénérative ou dans les déformations[18].

En revanche, le rôle de l'alignement sagittal chez l'enfant moins clair. Les liens entre alignement sagittal et survenue de douleurs de dos chez l'enfant et l'adolescent n'est que peu documenté dans la littérature. En effet, aucune étude à notre connaissance n'étudie les liens entre les paramètres radiographiques de profil et les scores de qualité de vie ou de douleur chez l'enfant. Cela est probablement lié au fait que pour des raisons éthiques, il est difficile de justifier

la réalisation de radiographies systématiques à une population d'enfants sains. Pour cette raison, la plupart des études s'intéressant à ce sujet spécifique utilisent des méthodes non-invasives de mesure des courbures sagittales, au prix d'une certaine imprécision.

Minghelli et al., dans leur article de 2014, retrouvaient 60% de rachialgies chez 966 enfants de 10 à 16 ans. Parmi les facteurs de risque, on retrouvait la posture debout incorrecte qui était pourvoyeuse de 3 fois plus de douleurs de dos que dans le reste de la cohorte[1]. En 2020, Sains de Baranda et al. rapportaient leurs résultats à partir de données recueillies à l'aide d'un inclinomètre chez plus de 700 enfants en âge scolaire[19]. Ils retrouvaient une cyphose thoracique plus importante chez les garçons et à l'inverse une lordose lombaire plus grande chez la fille. De façon très intéressante, les patients présentant des rachialgies avaient une lordose lombaire significativement plus importante. Ils rapportaient qu'une lordose supérieure à 33° (mesurée à l'inclinomètre) était prédicteur de la survenue de rachialgies. Cette étude va dans le sens de ce qui est fréquemment retrouvé lors des tests posturaux. En effet, le test de Matthias permet de démasquer les déficits posturaux[20]. On demande à l'enfant ou l'adolescent de maintenir une position droite debout, les bras tendus en avant. Les patients avec un déficit postural auront tendance à augmenter leur lordose lombaire pour maintenir cette position. On peut donc penser que les déficits posturaux, et donc probablement musculaires, se traduisent par l'apparition d'une hyperlordose, ce qui expliquerait les résultats de Sains de Baranda et al.[19]. Dans ce cas précis, l'hyperlordose serait plus une conséquence du déficit musculaire qu'une cause primaire de rachialgie.

Plusieurs auteurs ont réalisé des études similaires, mesurant les courbures sagittales à l'aide d'un outil électronique (Spinal Mouse®). En 2017, Feng et al. rapportaient que les lombalgies chez l'enfant étaient corrélée à un excès de cyphose thoracique et une insuffisance de mobilité de la lordose lombaire[21]. De la même façon, Azevedo et al rapportaient les résultats d'une étude chez plus de 1000 enfants de 9 à 19 ans. Ils retrouvaient que l'hypercyphose était un facteur de risque significatif de douleurs rachidiennes[22].

Variations d'alignement sagittal dans les pathologies rachidiennes courantes de l'enfant

Scoliose idiopathique

La scoliose idiopathique est une déformation rachidienne tridimensionnelle. Outre la rotation vertébrale et la déformation frontale, elle induit donc fréquemment des changements de l'alignement sagittal. La déformation sagittale la plus fréquemment rencontrée dans ce contexte est la diminution de la cyphose thoracique (hypocyphose)[23]. Dans l'article d'Abelin et al., on retrouve que plus de la moitié des patients scoliotiques présentent un défaut d'alignement sagittal, principalement un défaut

de cyphose thoracique[23]. L'hypocyphose fait probablement partie de la déformation rachidienne, les autres défauts locaux d'alignement (diminution de la lordose lombaire, antéversion pelvienne) agissant comme des mécanismes de compensation, permettant de maintenir un alignement global acceptable (Figure 3).

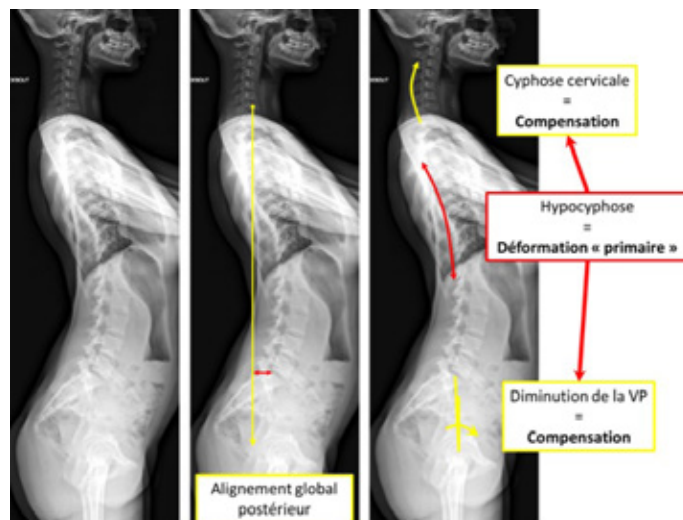


Figure 3 – Alignement sagittal d'une scoliose idiopathique. L'alignement global est postérieur. L'anomalie primaire est la diminution de la cyphose thoracique (déviation de l'alignement global vers l'arrière). En réponse, on retrouve une antéversion pelvienne et une cyphose cervicale.

En effet, plusieurs auteurs rapportent qu'environ 50% des patients scoliotiques ont un alignement global normal, l'autre moitié des patients ayant un alignement discrètement postérieur[24,25]. Malgré ces anomalies sagittales, on ne retrouve que très peu de liens entre douleurs rachidiennes et paramètres sagittaux chez les patients scoliotiques. En effet, plusieurs auteurs se sont attachés à étudier les liens entre qualité de vie et déformation, mais aucun lien statistique n'a pu être mis en évidence[26–28].

Spondylolisthesis

Le spondylolisthesis est défini par le glissement d'une vertèbre sur une autre. Il se produit majoritairement au niveau du rachis lombaire bas, typiquement entre L5 et S1. Le glissement va entraîner un défaut d'alignement antérieur et une diminution de la lordose lombosacrée physiologique. En général, les spondylolisthesis surviennent chez des patients avec une grande incidence pelvienne[29,30]. En réponse au défaut d'alignement antérieur, et en fonction de l'importance du glissement, on va assister à de nombreux phénomènes de compensation. Le premier à se mettre en œuvre est la rétroversion pelvienne, permettant de diminuer la pente sacrée pour lutter contre le glissement antérieur. Dans les formes de haut grade, on retrouve fréquemment des anomalies d'alignement sus-jacentes, avec typiquement une diminution de la cyphose thoracique[30] (Figure 4).

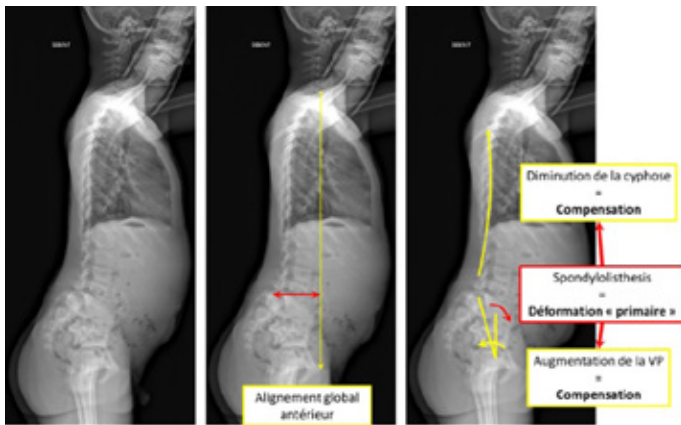


Figure 4 – Alignement sagittal d'un spondylolisthésis de haut grade. L'alignement global est antérieur. L'anomalie primaire est la diminution de la lordose lombo-sacrée (déviation de l'alignement global vers l'avant). En réponse, on retrouve une rétroversion pelvienne et une diminution de la cyphose thoracique.

Ces défauts d'alignement sagittal sont clairement corrélés à la douleur. En effet, Harroud et al. rapporte que le défaut d'alignement antérieur traduit par l'augmentation du SVA était directement corrélé à la diminution des scores de qualité de vie[31]. Outre les douleurs liées à l'instabilité retrouvée dans les spondylolisthésis de haut grade, on peut supposer que tous les mécanismes compensatoires mis en œuvre pour maintenir un alignement global neutre est largement pourvoyeur de douleurs chez ces patients.

Dystrophie rachidienne de croissance

La dystrophie rachidienne de croissance (DRC) entraîne un défaut de croissance antérieur, principalement au niveau du rachis thoracique. En conséquence, on assiste à une cunéiformisation de plusieurs niveaux adjacents avec comme conséquence une augmentation de la cyphose thoracique. Étonnamment, on retrouve chez ces patients une incidence pelvienne plutôt faible, entre 30 et 40° en moyenne[32,33]. De façon très intéressante, l'étude de Jiang et al. retrouvait une version pelvienne négative chez plus de 40% des patients avec DRC[33]. L'hypercyphose entraînant un déséquilibre antérieur, on s'attendrait plutôt à avoir une rétroversion pelvienne compensatrice. Cela signifie que le seul mécanisme compensatoire mis en œuvre par ces patients est l'hyperlordose classiquement décrite. Cependant, ceci peut être partiellement expliqué par la faible incidence pelvienne. En effet, les patients avec une incidence faible ont une capacité de rétroversion moins importante, ce qui pourrait expliquer que seul le rachis lombaire peut être utilisé pour rattraper l'alignement antérieur généré par l'hypercyphose thoracique.

Les douleurs rachidiennes chez les patients avec DRC sont relativement classiques. En effet, les scores de douleurs sont en plus élevés chez ces patients que dans la population générale[34]. En général, ces douleurs sont localisées à l'apex de la déformation, et probablement en rapport avec des phénomènes inflammatoires dans la zone de dystrophies. Ces douleurs sont donc plus en rapport avec la maladie

elle-même qu'en lien avec l'alignement sagittal. Cependant, certains patients présentent des douleurs lombaires en lien avec l'hyperlordose compensatrice, probablement du fait d'une hyperactivité des muscles érecteurs du rachis.

Conclusion

La prise en compte de l'alignement sagittal chez l'enfant revêt une importance majeure, plus probablement dans le planning chirurgical et dans la survenue des complications mécaniques postopératoires. En revanche, il n'y a que peu de preuves scientifiques qu'il existe un lien entre alignement sagittal et douleurs chez l'enfant. Dans la population normative, il semble que l'hyperlordose lombaire et l'hypercyphose thoracique sont des facteurs de risque de rachialgies, sans qu'aucune preuve forte ne permette de l'affirmer. Dans les pathologies rachidiennes, on retiendra que des douleurs peuvent être imputées aux mécanismes compensatoires mis en œuvre pour tenter de maintenir un alignement global neutre. Comme chez l'adulte, les défauts d'alignement antérieurs (« déséquilibres » antérieurs) sont largement plus pourvoyeurs de douleurs que les défauts postérieurs. Il est important de bien analyser l'alignement sagittal en différenciant les anomalies primaires des phénomènes de compensation.

Références

- [1] Minghelli B, Oliveira R, Nunes C. Non-specific low back pain in adolescents from the south of Portugal: prevalence and associated factors. *J Orthop Sci* 2014;19:883–92. <https://doi.org/10.1007/s00776-014-0626-z>.
- [2] Pesenti S, Choufani E, Prost S, Guillaume J-M, Launay F, Jouve J-L. Athletic children: Guidelines and monitoring in pediatric orthopedic surgery. *Orthop Traumatol Surg Res* 2023;109:103455. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2022.103455>.
- [3] Gennari JM, Themar-Noel C, Panuel M, Bensamoun B, Deslandre C, Linglart A, et al. Adolescent spinal pain: The pediatric orthopedist's point of view. *Orthop Traumatol Surg Res* 2015;101:S247-50. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2015.06.012>.
- [4] Duval-Beaupère G, Schmidt C, Cosson P. A Barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng* 1992;20:451–62. <https://doi.org/10.1007/BF02368136>.
- [5] Hasegawa K, Dubousset JF. Cone of Economy with the Chain of Balance-Historical Perspective and Proof of Concept. *Spine Surg Relat Res* 2022;6:337–49. <https://doi.org/10.22603/ssrr.2022-0038>.
- [6] Bernhardt M, Bridwell KH. Segmental analysis of the sagittal plane alignment of the normal thoracic and lumbar spines and thoracolumbar junction.

- Spine (Phila Pa 1976) 1989;14:717–21. <https://doi.org/10.1097/00007632-198907000-00012>.
- [7] Wagner H, Liebetrau A, Schinowski D, Wulf T, de Lussanet MHE. Spinal lordosis optimizes the requirements for a stable erect posture. *Theor Biol Med Model* 2012;9:13. <https://doi.org/10.1186/1742-4682-9-13>.
- [8] Choufani E, Jouve J-L, Pomeroy V, Adalian P, Chaumoitre K, Panuel M. Lumbosacral lordosis in fetal spine: genetic or mechanic parameter. *Eur Spine J* 2009;18:1342–8. <https://doi.org/10.1007/s00586-009-1012-y>.
- [9] Prost S, Charles Y-P, Ilharreborde B, Riouallon G, Pesenti S, Blondel B, et al. Thoracolumbar Sagittal Shape Varies With Pelvic Morphology and Aging. *Spine (Phila Pa 1976)* 2023;48:1726–32. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000004590>.
- [10] Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, Dimnet J. Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. *Spine (Phila Pa 1976)* 2005;30:346–53. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000152379.54463.65>.
- [11] Pesenti S, Prost S, Solla F, Ilharreborde B, Ferrero E, Obeid I, et al. Modern Concepts in Sagittal Curve Measurement: Comparison of Spline-based and Fixed Landmark Measurements in a Cohort of 1520 Healthy Subjects. *Spine (Phila Pa 1976)* 2023. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000004901>.
- [12] Aoki Y, Nakajima A, Takahashi H, Sonobe M, Terajima F, Saito M, et al. Influence of pelvic incidence-lumbar lordosis mismatch on surgical outcomes of short-segment transforaminal lumbar interbody fusion. *BMC Musculoskelet Disord* 2015;16:213. <https://doi.org/10.1186/s12891-015-0676-1>.
- [13] Harrison DE, Cailliet R, Harrison DD, Janik TJ, Holland B. Reliability of centroid, Cobb, and Harrison posterior tangent methods: which to choose for analysis of thoracic kyphosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2001;26:E227–34. <https://doi.org/10.1097/00007632-200106010-00002>.
- [14] Charles YP, Bauduin E, Pesenti S, Ilharreborde B, Prost S, Laouissat F, et al. Variation of Global Sagittal Alignment Parameters According to Gender, Pelvic Incidence, and Age. *Clin Spine Surg* 2022;35:E610–20. <https://doi.org/10.1097/BSJ.0000000000001321>.
- [15] Ames CP, Blondel B, Scheer JK, Schwab FJ, Le Huec J-C, Massicotte EM, et al. Cervical radiographical alignment: comprehensive assessment techniques and potential importance in cervical myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)* 2013;38:S149–60. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3182a7f449>.
- [16] Pesenti S, Charles YP, Prost S, Solla F, Blondel B, Ilharreborde B, et al. Spinal Sagittal Alignment Changes During Childhood: Results of a National Cohort Analysis of 1,059 Healthy Children. *J Bone Jt Surg - Am Vol* 2023;105:676–86.
- [17] Lafage V, Schwab F, Patel A, Hawkinson N, Farcy J-P. Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity. *Spine (Phila Pa 1976)* 2009;34:E599–606. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181aad219>.
- [18] Scheer JK, Smith JS, Passias PG, Kim HJ, Bess S, Burton DC, et al. Outcomes of Surgical Treatment for Patients With Mild Scoliosis and Age-Appropriate Sagittal Alignment With Minimum 2-Year Follow-up. *Neurospine* 2023;20:837–48. <https://doi.org/10.14245/ns.2346454.227>.
- [19] Sainz de Baranda P, Cejudo A, Martínez-Romero MT, Aparicio-Sarmiento A, Rodríguez-Ferrán O, Collazo-Diéguez M, et al. Sitting Posture, Sagittal Spinal Curvatures and Back Pain in 8 to 12-Year-Old Children from the Region of Murcia (Spain): ISQUIOS Programme. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072578>.
- [20] Albertsen IM, Brockmann B, Hollander K, Schröder J, Zech A, Sehner S, et al. Spinal posture changes using dynamic rasterstereography during the modified Matthiass test discriminate between postural weak and strong healthy children (10-14 years): a pilot study. *Eur J Pediatr* 2018;177:1327–34. <https://doi.org/10.1007/s00431-018-3186-y>.
- [21] Feng Q, Jiang C, Zhou Y, Huang Y, Zhang M. Relationship between spinal morphology and function and adolescent non-specific back pain: A cross-sectional study. *J Back Musculoskelet Rehabil* 2017;30:625–33. <https://doi.org/10.3233/BMR-160544>.
- [22] Azevedo N, Ribeiro JC, Machado L. Back pain in children and adolescents: a cross-sectional study. *Eur Spine J* 2023;32:3280–9. <https://doi.org/10.1007/s00586-023-07751-z>.
- [23] Abelin-Genevois K, Sassi D, Verdun S, Roussouly P. Sagittal classification in adolescent idiopathic scoliosis: original description and therapeutic implications. *Eur Spine J* 2018;27:2192–202. <https://doi.org/10.1007/s00586-018-5613-1>.
- [24] Ries Z, Harpole B, Graves C, Gnanapragasam G, Larson N, Weintstein S, et al. Selective Thoracic Fusion of Lenke I and II Curves Affects Sagittal Profiles But Not Sagittal or Spinopelvic Alignment: A Case-Control Study. *Spine (Phila Pa 1976)* 2015;40:926–34. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000000861>.
- [25] Vidal C, Mazda K, Ilharreborde B. Sagittal spinopelvic adjustment in severe Lenke 1 hypokyphotic

adolescent idiopathic scoliosis patients. *Eur Spine J* 2016;25:3162–9. <https://doi.org/10.1007/s00586-016-4681-3>.

[26] Mak T, Cheung PWH, Zhang T, Cheung JPY. Patterns of coronal and sagittal deformities in adolescent idiopathic scoliosis. *BMC Musculoskelet Disord* 2021;22:44. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03937-4>.

[27] Smorgick Y, Mirovsky Y, Baker KC, Gelfer Y, Avisar E, Anekstein Y. Predictors of back pain in adolescent idiopathic scoliosis surgical candidates. *J Pediatr Orthop* 2013;33:289–92. <https://doi.org/10.1097/BPO.0b013e31827d0b43>.

[28] St-Georges M, Teles AR, Rabau O, Saran N, Ouellet JA, Ferland CE. Adolescent idiopathic scoliosis: evaluating perioperative back pain through a simultaneous morphological and biomechanical approach. *BMC Musculoskelet Disord* 2020;21:466. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03462-4>.

[29] Hanson DS, Bridwell KH, Rhee JM, Lenke LG. Correlation of pelvic incidence with low- and high-grade isthmic spondylolisthesis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2002;27:2026–9. <https://doi.org/10.1097/00007632-200209150-00011>.

[30] Vialle R, Ilharreborde B, Dauzac C, Lenoir T, Rillardon L, Guigui P. Is there a sagittal imbalance of the spine in isthmic spondylolisthesis? A correlation study. *Eur Spine J* 2007;16:1641–9. <https://doi.org/10.1007/s00586-007-0348-4>.

[31] Harroud A, Labelle H, Joncas J, Mac-Thiong J-M. Global sagittal alignment and health-related quality of life in lumbosacral spondylolisthesis. *Eur Spine J* 2013;22:849–56. <https://doi.org/10.1007/s00586-012-2591-6>.

[32] Tyrakowski M, Janusz P, Mardjetko S, Kotwicki T, Siemionow K. Comparison of radiographic sagittal spinopelvic alignment between skeletally immature and skeletally mature individuals with Scheuermann's disease. *Eur Spine J* 2015;24:1237–43. <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3595-1>.

[33] Jiang L, Qiu Y, Xu L, Liu Z, Wang Z, Sha S, et al. Sagittal spinopelvic alignment in adolescents associated with Scheuermann's kyphosis: a comparison with normal population. *Eur Spine J* 2014;23:1420–6. <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3266-2>.

[34] Lonner B, Yoo A, Terran JS, Sponseller P, Samdani A, Betz R, et al. Effect of Spinal Deformity on Adolescent Quality of Life Comparison of Operative Scheuermann's Kyphosis, Adolescent Idiopathic Scoliosis and Normal Controls. *Spine (Phila Pa 1976)* 2013;38:1049–55. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3182893c01>.

DOI : 10.34814/sofop-2024-03