

1. Définition et Étiologie

La lyse isthmique (LI) ou spondylolyse est une pathologie acquise de la colonne vertébrale qui débute dans l'enfance et qui résulte d'une fragilité constitutionnelle de l'isthme vertébral de la 5^e vertèbre lombaire (L5), parfois la 4^e (L4) [1]. Il en résulte une rupture de continuité au niveau de l'un ou des deux isthmes (Figure 1). L'incidence de cette pathologie varie de 2,5 à 6% en fonction des séries[1,2] et touche deux fois plus souvent les garçons que les filles[1,3]. La LI peut être unilatérale ou bilatérale. La LI bilatérale représente la cause de 80% des spondylolisthésis (SPL), c'est-à-dire du glissement antérieur de L5 sur le sacrum[4]. L'espace entre l'arc postérieur et la partie antérieure de la vertèbre se comble par un tissu fibreux parfois pseudo-kystique appelé : nodules de Gill[5].

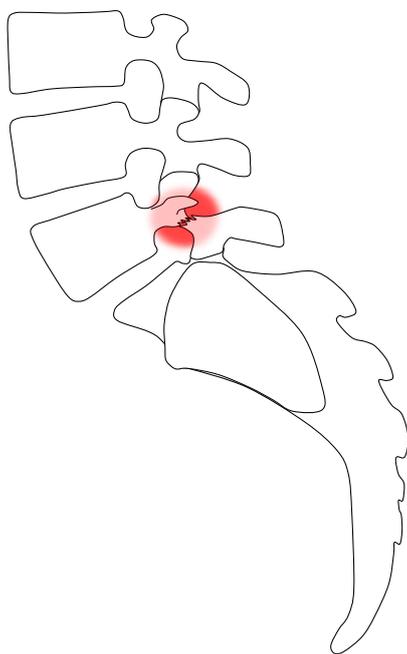


Figure 1 : Schéma de la vue de profil de la jonction lombo-sacrée montrant la localisation d'une lyse isthmique bilatérale en L5 entraînant un minime spondylolisthésis. (Coll. Y Lefevre)

Des prédispositions génétiques semblent contribuer à la LI. Wynne-Davies et al.[6] ont constaté que les parents au premier degré de ceux affectés par une LI présentaient une incidence plus élevée (19%) de LI par rapport à la population générale. Plusieurs histoires familiales de LI ont également été rapportées[7,8]. Il existe par ailleurs, une forte association entre LI et anomalies congénitales telles que la spina bifida

occulta[1,9]. Des prédispositions anatomiques comme le sacrum horizontal et une réduction de l'espace entre l'articulaire inférieure de L4 et l'articulaire supérieure du Sacrum semblent influencer la formation et la persistance de la LI par une augmentation des contraintes mécaniques de part et d'autre de l'isthme de L5 [10-12].

Les jeunes athlètes constituent la majorité des patients présentant une spondylolyse symptomatique[13]. En effet, certains gestes sportifs spécifiques comprenant des rotations et des extensions du rachis répétées augmentent la charge sur la colonne vertébrale et peuvent entraîner des lésions de fatigue de l'isthme vertébral. Schroeder et al. [13] ont montré que la prévalence d'une spondylolyse symptomatique avec ou sans glissement était plus élevée chez les athlètes par rapport aux non-athlètes (32 % contre 2 %, respectivement) présentant des douleurs lombaires basses (DLB). Plus récemment, Li et al. ont estimé à 41% la prévalence de LI chez des athlètes présentant des DLB[14]. Les sports tels que la gymnastique, l'haltérophilie, la course à pied, la lutte ainsi que les sports de lancer, de rame, sont plus à risque de développer une LI symptomatique [15,16].

Même si la LI est le plus souvent asymptomatique et découverte de manière fortuite sur des examens radiographiques, elle est la cause la plus fréquente de DLB chez l'enfant et l'adolescent sportif[17]. A la lumière de la littérature, la LI n'est pas plus fréquente chez les sportifs mais elle est plus souvent symptomatique chez les sportifs. Lors d'une découverte fortuite d'une LI, la méconnaissance de cette pathologie chez les pédiatres et les médecins généraliste associée à des comptes rendus radiographiques au vocabulaire complexe rendent inévitables la consultation chez le spécialiste.

2. L'évaluation clinique

Le motif de consultation peut être soit une DLB aiguë soit, plus souvent, une DLB chronique.

Parfois une chute sur les fesses peut avoir exacerbé une LI débutante et conduire à une consultation en urgence. Cependant, la présentation chronique est la plus fréquente.

La plainte la plus fréquente est une douleur lombaire, localisée ou diffuse. Les mouvements d'hyperextension ou de rotation du tronc exacerbent généralement la douleur, et le repos la soulage partiellement. En cas de douleur invalidante, les patients ont tendance à adapter

une posture en délordose qui diminue les contraintes sur la LI. Elle est généralement située dans le bas du dos. Cependant, les patients peuvent se plaindre de douleurs aux fesses ou de douleurs irradiantes dans l'un ou les deux membres inférieurs [18,19]. La contracture des ischios-jambiers est fréquemment associée[19].

Le stork test (test de la cigogne) ou la manœuvre d'hyperextension sur une jambe est considéré comme un signe pathognomonique de LI. Il consiste à demander au patient de se tenir debout sur une jambe et de placer le pied controlatéral sur la face interne du genou tendu (hanche et genou fléchis) et de réaliser une extension du dos. L'extension de la région lombosacrée reproduit la douleur habituelle et indique une possible spondylolyse du côté ipsilatéral[20].

En cas de LI isolée, l'examen neurologique est normal. S'il existe des symptômes neurologiques (douleurs radiculaires, paresthésies etc...), ils sont liés à un spondylolisthésis plutôt qu'à la LI elle-même.

3. Examens complémentaires

Plusieurs examens d'imagerie peuvent aider au diagnostic d'une LI[21]. En cas de suspicion d'une LI, il est nécessaire de procéder à des examens radiographiques complémentaires pour confirmer le diagnostic. Les radiographies lombaires à 4 incidences (Face, Profil, Oblique droit et gauche) ont longtemps été considérées comme utiles au diagnostic car les vues obliques permettaient la description du « chien » au cou brisé. Il est désormais démontré que ces vues n'apportent pas de bénéfice comparées aux vues de face et de profil standard (Figure 2) [22]. Il est donc préférable de prescrire ces radiographies avec le système de radiographie EOS (EOS-Imaging – Paris) qui diminue l'exposition aux irradiations [23].



Figure 2: Radiographie de profil montrant une lyse isthmique L5 bilatérale chez un enfant de 6 ans. La lyse isthmique est associée à un spondylolisthésis de bas grade

Si la radiographie n'est pas contributive pour le diagnostic, en particulier pour des formes aiguës unilatérales, il est utile de proposer des examens

alternatifs. En revanche, il n'existe pas de consensus sur le type d'imagerie à proposer.

La scintigraphie est un excellent outil de dépistage pour les douleurs lombaires chez les enfants ou les adolescents. Elle est très sensible pour le dépistage des LI mais peu spécifique.

La tomodensitométrie (TDM) est très spécifique de la lyse isthmique. Elle peut permettre le diagnostic de LI chroniques peu déplacées et donc peu ou pas visibles sur la radiographie de profil (Figure 3). Une sclérose marginale hypertrophique sera en faveur d'une lésion chronique alors qu'une résorption osseuse des berges sera plutôt en faveur d'une lésion aiguë.

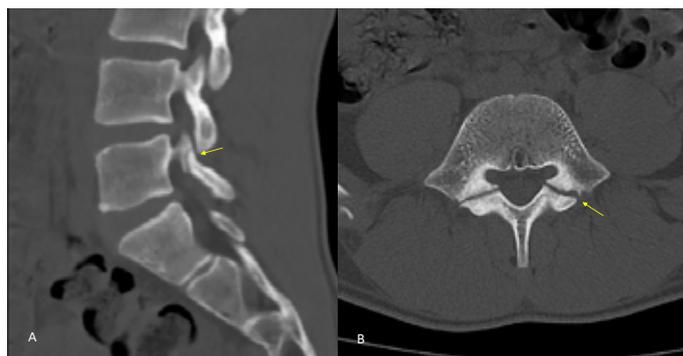


Figure 3 : (A) Coupe sagittale scanner de la jonction lombo-sacrée montrant une lyse isthmique L5 peu déplacée ancienne. (B) Même patiente, coupe axiale montrant une lyse isthmique bilatérale peu déplacée avec une sclérose des berges.

Le PET-Scan est un examen très sensible qui peut être également utilisé pour détecter des lésions précoces [24]. Certains le considèrent même comme le meilleur complément diagnostique lorsque les radiographies simples sont négatives[25]. Mais il n'est pas spécifique de la LI et d'autres lésions infectieuses ou tumorales peuvent simuler l'aspect d'une LI en PET-Scan.

L'IRM offre des avantages tant pour le diagnostic positif que pour le diagnostic différentiel de LI. Un œdème de l'isthme détecté sur l'IRM peut permettre de mettre en évidence une lésion pré-fracturaire. L'absence de radiation ionisante en fait un moyen d'exploration privilégié en cas de DLB chez l'enfant. Des séquences spécifiques telles que STIR ou T1-VIBE peuvent aujourd'hui permettre également d'apprécier la consolidation[26].

La radiographie standard permet le plus souvent de faire le diagnostic de LI. Aucun examen supplémentaire n'est alors nécessaire en complément. Si la radiographie est normale, l'IRM est, en France, l'examen de choix pour progresser dans le diagnostic. Elle peut être complétée par la tomodensitométrie dont la meilleure résolution spatiale permet de détecter des lésions plus fines. Certains considèrent d'ailleurs, comme un facteur de bon pronostic, l'association d'une lésion récente peu déplacée en TDM à un hypersignal T2 important en IRM[27].

4. Traitement

1. Le traitement conservateur

Le traitement conservateur est le traitement de choix devant tout type de LI symptomatique (ou non). Comme évoqué plus haut, les lésions peu déplacées et récentes ont plus de chance de consolider. Les examens d'imagerie sont alors pertinents pour proposer un pronostic.

Le traitement conservateur consiste généralement en une combinaison d'un traitement orthopédique par corset, d'une modulation/arrêt de l'activité sportive et de kinésithérapie, le tout pour une durée de 2 à 3 mois en moyenne. La séquence n'est toutefois pas consensuelle[28]. Pour des lésions aiguës et peu déplacées, ce traitement permet la consolidation dans 80 à 95% des cas[27,29-31].

Il n'existe pas de différence entre le type corset utilisé (souple ou rigide)[32]. Les exercices de kinésithérapie doivent comporter des étirements des chaînes postérieures et du travail en délordose. Cet accompagnement doit se poursuivre pour les athlètes qui considèrent une reprise de leur sport au même niveau qui est possible dans 95% des cas [33].

Récemment, certains auteurs ont proposé une technique utilisant des ultra-sons pulsés[34] (LIPUS) en complément du traitement conservateur avec des résultats qui semblent prometteurs sur la consolidation de la LI[35].

2. Le traitement chirurgical

Le traitement chirurgical ne doit être envisagé qu'après un échec d'un traitement conservateur bien conduit d'au-moins 6 mois à 1 an. Plusieurs techniques sont possibles : la reconstruction de l'isthme et l'arthrodèse lombo-sacrée dans les formes les plus sévères. La reconstruction isthmique est privilégiée pour maintenir la mobilité du segment L5-S1.

I. La reconstruction isthmique (Figures 4 A et B)

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour réaliser l'ostéosynthèse de la LI soit par abord direct soit en percutané guidée par fluoroscopie ou navigation soit plus récemment par voie endoscopique[36]. Les techniques utilisées par abord direct consistent en un débridement de la lyse (Nodule de Gill), une greffe osseuse et une ostéosynthèse. Plusieurs types d'ostéosynthèse ont été décrits : vissage direct (Buck[37]), lassage isolé ou associé à un vissage pédiculaire ou encore une combinaison vis et crochet sous-lamaire etc...[38-47]. Une méta-analyse récente[48] a comparé une partie de ces techniques et conclue que la technique de Buck et les techniques utilisant des vis pédiculaires[49] offrent le plus de chance de consolidation (80%) et un faible taux de complication. Il faut noter que certains patients ne consolident pas mais deviennent asymptomatiques[46].

Certains prérequis à l'utilisation de ces techniques de réparation isthmiques sont à respecter : le disque L5-S1 doit être sain et le spondylolisthésis doit être minime (grade 1). La réparation isthmique est le traitement de

choix en cas d'échec du traitement conservateur pour une LI unilatérale.

II. L'arthrodèse lombo-sacrée (Figure 4 C)

L'arthrodèse lombo-sacrée est le stade ultime du traitement chirurgical d'une LI symptomatique. Elle doit être considérée en cas de LI symptomatique réfractaire, avec une discopathie L5-S1 et/ou un spondylolisthésis de haut-grade. Ce thème sera abordé dans un autre chapitre.

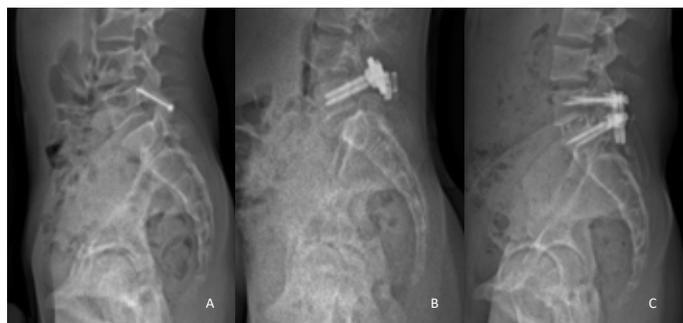


Figure 4 : radiographies de profil de la jonction lombo-sacrée montrant (A) un exemple de reconstruction isthmique percutanée selon Buck réalisée sous navigation chirurgicale, (B) un exemple de reconstruction isthmique par vis pédiculaire associée à une fixation de la lame par un ligament, (C) un exemple de d'arthrodèse lombo-sacrée L5-S1 circonférentielle réalisée par voie postérieure à l'aide vis pédiculaires et de cages intersomatiques PLIF.

5. Diagnostics différentiels

Il est indispensable de bien identifier les autres causes possibles de DLB.

- Tumeurs
- Infections
- Inflammations : spondylarthropathies
- Douleurs de l'articulation sacro-iliaque
- Scheuermann lombaire
- Hernies discales

6. Pronostic

La progression d'un spondylolisthésis est l'une des principales préoccupations chez les patients présentant une LI. Dans l'ensemble, le risque de progression est faible, estimé à environ 3 à 4% [50]. La progression est surtout à surveiller pendant la poussée de croissance à l'adolescence. Les paramètres pelviens exercent une influence sur la progression du SPL. Certaines études suggèrent qu'une incidence pelvienne élevée est à risque de progression dans les SPL de bas grade[51,52]. Comme nous l'avons présenté plus haut, la majorité des adolescents reprennent leurs activités après six mois de traitement conservateur. Les enfants et adolescents présentant une LI ou un SPL nécessitent des radiographies debout pour évaluer la progression du glissement tous les 6 à 12 mois jusqu'à ce qu'ils atteignent la maturité squelettique.

Il n'existe pas à ce jour de contre-indication à la

pratique sportive chez les patients présentant une LI. La présence d'un SPL de haut grade ou de douleurs invalidantes à l'effort peuvent toutefois conduire à une réorientation sportive pour des athlètes de haut niveau.

7. Messages clés

- Prévalence de la LI est 5% après 6 ans
- Souvent asymptomatique
- Cause mixte : génétique / mécanique
- Cause avérée la plus fréquente de DLB chez l'enfant
- Les sportifs sont plus souvent symptomatiques que les non-sportifs
- Traitement conservateur efficace dans plus de 80% des cas
- La réparation isthmique est à privilégier en première intention
- Surveillance de la progression d'un SPL pendant toute la croissance

8. Références

1. Fredrickson, B.E.; Baker, D.; McHolick, W.J.; Yuan, H.A.; Lubicky, J.P. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am* 1984, 66, 699-707.
2. Song, B.; You, S.K.; Lee, J.E.; Lee, S.M.; Cho, H.H. Prevalence of Incidentally Detected Spondylolysis in Children. *Taehan Yongsang Uihakhoe Chi* 2022, 83, 127-137, doi:10.3348/jksr.2021.0020.
3. Mansfield, J.T.; Wroten, M. Pars Interarticularis Defect. In *StatPearls; Treasure Island (FL) ineligible companies. Disclosure: Michael Wroten declares no relevant financial relationships with ineligible companies.*, 2023.
4. Saraste, H. Spondylolysis and spondylolisthesis. *Acta Orthop Scand Suppl* 1993, 251, 84-86, doi:10.3109/17453679309160129.
5. Gill, G.G. Long-term follow-up evaluation of a few patients with spondylolisthesis treated by excision of the loose lamina with decompression of the nerve roots without spinal fusion. *Clin Orthop Relat Res* 1984, 215-219.
6. Wynne-Davies, R.; Scott, J.H. Inheritance and spondylolisthesis: a radiographic family survey. *J Bone Joint Surg Br* 1979, 61-B, 301-305, doi:10.1302/0301-620X.61B3.383720.
7. Kato, K.; Hakozaiki, M.; Mashiko, R.; Konno, S.I. Familial development of lumbar spondylolysis: a familial case report of 7- and 4-year-old brothers and their father. *J Int Med Res* 2021, 49, 3000605211015559, doi:10.1177/03000605211015559.
8. Yurube, T.; Kakutani, K.; Okamoto, K.; Manabe, M.; Maeno, K.; Yoshikawa, M.; Sha, N.; Kuroda, R.; Nishida, K. Lumbar spondylolysis: A report of four cases from two generations of a family. *J Orthop Surg (Hong Kong)* 2017, 25, 2309499017713917, doi:10.1177/2309499017713917.
9. Turner, R.H.; Bianco, A.J., Jr. Spondylolysis and spondylolisthesis in children and teen-agers. *J Bone Joint Surg Am* 1971, 53, 1298-1306.
10. Peleg, S.; Dar, G.; Steinberg, N.; Masharawi, Y.; Been, E.; Abbas, J.; Hershkovitz, I. Sacral orientation and spondylolysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2009, 34, E906-910, doi:10.1097/BRS.0b013e3181b34b75.
11. Zehnder, S.W.; Ward, C.V.; Crow, A.J.; Alander, D.; Latimer, B. Radiographic assessment of lumbar facet distance spacing and pediatric spondylolysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2009, 34, 285-290, doi:10.1097/BRS.0b013e3181956053.
12. Ward, C.V.; Latimer, B.; Alander, D.H.; Parker, J.; Ronan, J.A.; Holden, A.D.; Sanders, C. Radiographic assessment of lumbar facet distance spacing and spondylolysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007, 32, E85-88, doi:10.1097/01.brs.0000252200.66545.43.
13. Schroeder, G.D.; LaBella, C.R.; Mendoza, M.; Daley, E.L.; Savage, J.W.; Patel, A.A.; Hsu, W.K. The role of intense athletic activity on structural lumbar abnormalities in adolescent patients with symptomatic low back pain. *Eur Spine J* 2016, 25, 2842-2848, doi:10.1007/s00586-016-4647-5.
14. Li, J.; Liang, J.; Xu, Y.; Du, D.; Feng, F.; Shen, J.; Cui, Y. Incidence of lumbar spondylolysis in athletes with low back pain: A systematic evaluation and single-arm meta-analysis. *Medicine (Baltimore)* 2023, 102, e34857, doi:10.1097/MD.0000000000034857.
15. Soler, T.; Calderon, C. The prevalence of spondylolysis in the Spanish elite athlete. *Am J Sports Med* 2000, 28, 57-62, doi:10.1177/03635465000280012101.
16. Bono, C.M. Low-back pain in athletes. *J Bone Joint Surg Am* 2004, 86, 382-396, doi:10.2106/00004623-200402000-00027.
17. Altaf, F.; Heran, M.K.; Wilson, L.F. Back pain in children and adolescents. *Bone Joint J* 2014, 96-B, 717-723, doi:10.1302/0301-620X.96B6.33075.
18. Pate, J.W.; Joslin, R.; Hurtubise, K.; Anderson, D.B. Assessing a child or adolescent with low back pain is different to assessing an adult with low back pain. *J Paediatr Child Health* 2022, 58, 566-571, doi:10.1111/jpc.15933.
19. Kayser, R.; Mahlfeld, K.; Heyde, C.E.; Grasshoff, H.; Mellerowicz, H. Tight hamstring syndrome and extra- or intraspinal diseases in childhood: a multicenter study. *Eur Spine J* 2006, 15, 403-408, doi:10.1007/s00586-005-0886-6.

20. Sung, P.S.; Yoon, B.; Lee, D.C. Lumbar spine stability for subjects with and without low back pain during one-leg standing test. *Spine (Phila Pa 1976)* 2010, 35, E753-760, doi:10.1097/BRS.0b013e3181d53b9c.
21. Standaert, C.J.; Herring, S.A. Spondylolysis: a critical review. *Br J Sports Med* 2000, 34, 415-422, doi:10.1136/bjsm.34.6.415.
22. Beck, N.A.; Miller, R.; Baldwin, K.; Zhu, X.; Spiegel, D.; Drummond, D.; Sankar, W.N.; Flynn, J.M. Do oblique views add value in the diagnosis of spondylolysis in adolescents? *J Bone Joint Surg Am* 2013, 95, e65, doi:10.2106/JBJS.L.00824.
23. Hamzian, N.; Afereydoon, S.; Ghorbani, M.; Abrisham, S.M.J.; Roozmand, Z.; Abdollahi-Dehkordi, S.; Sepehr Javan, M.; Reza Deevband, M. Equivalent Dose and Risk of Exposure Induced Cancer Death of Different Organs due to Various Image Techniques of EOS Imaging System. *J Biomed Phys Eng* 2021, 11, 289-296, doi:10.31661/jbpe.v0i0.2012-1242.
24. Peng, Z.; Jia, Y.; Li, J.; Wang, G. Diagnostic performance of SPECT in lumbar spondylolysis: a systematic review and meta-analysis. *Clin Radiol* 2024, 79, e137-e146, doi:10.1016/j.crad.2023.10.004.
25. Zukotynski, K.; Curtis, C.; Grant, F.D.; Micheli, L.; Treves, S.T. The value of SPECT in the detection of stress injury to the pars interarticularis in patients with low back pain. *J Orthop Surg Res* 2010, 5, 13, doi:10.1186/1749-799X-5-13.
26. Watura, C.; Mitchell, A.W.M.; Fahy, D.; Houghton, J.; Kang, S.; Lee, J.C. T1-VIBE and STIR MRI of lumbar pars interarticularis injuries in elite athletes: fracture characterisation and potential prognostic indicators. *Skeletal Radiol* 2023, doi:10.1007/s00256-023-04437-x.
27. Sairyo, K.; Sakai, T.; Yasui, N. Conservative treatment of lumbar spondylolysis in childhood and adolescence: the radiological signs which predict healing. *J Bone Joint Surg Br* 2009, 91, 206-209, doi:10.1302/0301-620X.91B2.21256.
28. Hollabaugh, W.L.; Foley Davelaar, C.M.; McHorse, K.J.; Achar, S.A.; MacDonald, J.P.; Riederer, M.F. Clinical Practice Patterns of Isthmic Spondylolysis in Young Athletes: A Survey of Pediatric Research in Sports Medicine Members. *Curr Sports Med Rep* 2022, 21, 405-412, doi:10.1249/JSR.0000000000001008.
29. Kurd, M.F.; Patel, D.; Norton, R.; Picetti, G.; Friel, B.; Vaccaro, A.R. Nonoperative treatment of symptomatic spondylolysis. *J Spinal Disord Tech* 2007, 20, 560-564, doi:10.1097/BSD.0b013e31803dcccc.
30. Goetzinger, S.; Courtney, S.; Yee, K.; Welz, M.; Kalani, M.; Neal, M. Spondylolysis in Young Athletes: An Overview Emphasizing Nonoperative Management. *J Sports Med (Hindawi Publ Corp)* 2020, 2020, 9235958, doi:10.1155/2020/9235958.
31. Kuroshima, K.; Miyazaki, S.; Hiranaka, Y.; Ryu, M.; Inoue, S.; Yurube, T.; Kakutani, K.; Tadokoro, K. Rate and Duration of Bone Union for Conservative Treatment in Pediatric Lumbar Spondylolysis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2023, doi:10.1097/BRS.0000000000004849.
32. Virkki, E.; Holstila, M.; Kolari, T.; Lastikka, M.; Mattila, K.; Malmi, S.; Pajulo, O.; Helenius, I. Elastic Lumbar Support Versus Rigid Thoracolumbar Orthosis for Acute Pediatric Spondylolysis: A Prospective Controlled Study. *Spine (Phila Pa 1976)* 2023, 48, 89-96, doi:10.1097/BRS.0000000000004424.
33. Kasamasu, T.; Ishida, Y.; Sato, M.; Mase, Y.; Sairyo, K. Rates of Return to Sports and Recurrence in Pediatric Athletes after Conservative Treatment for Lumbar Spondylolysis. *Spine Surg Relat Res* 2022, 6, 540-544, doi:10.22603/ssrr.2021-0242.
34. Tan, Y.; Guo, Y.; Reed-Maldonado, A.B.; Li, Z.; Lin, G.; Xia, S.J.; Lue, T.F. Low-intensity pulsed ultrasound stimulates proliferation of stem/progenitor cells: what we need to know to translate basic science research into clinical applications. *Asian J Androl* 2021, 23, 602-610, doi:10.4103/aja.aja_25_21.
35. Arima, H.; Suzuki, Y.; Togawa, D.; Mihara, Y.; Murata, H.; Matsuyama, Y. Low-intensity pulsed ultrasound is effective for progressive-stage lumbar spondylolysis with MRI high-signal change. *Eur Spine J* 2017, 26, 3122-3128, doi:10.1007/s00586-017-5081-z.
36. Lu, V.M.; Levi, A.D.; Basil, G.W. Endoscopic-assisted fusion for lumbar pars fracture repair in an adolescent patient. *Clin Neurol Neurosurg* 2023, 233, 107920, doi:10.1016/j.clineuro.2023.107920.
37. Buck, J.E. Direct repair of the defect in spondylolisthesis. Preliminary report. *J Bone Joint Surg Br* 1970, 52, 432-437.
38. Sairyo, K.; Goel, V.K.; Faizan, A.; Vadapalli, S.; Biyani, S.; Ebraheim, N. Buck's direct repair of lumbar spondylolysis restores disc stresses at the involved and adjacent levels. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2006, 21, 1020-1026, doi:10.1016/j.clinbiomech.2006.06.011.
39. Roca, J.; Iborra, M.; Cavanilles-Walker, J.M.; Alberti, G. Direct repair of spondylolysis using a new pedicle screw hook fixation: clinical and CT-assessed study: an analysis of 19 patients. *J Spinal Disord Tech* 2005, 18 Suppl, S82-89, doi:10.1097/01.bsd.0000123425.12852.3c.
40. Nozawa, S.; Shimizu, K.; Miyamoto, K.; Tanaka, M. Repair of pars interarticularis defect by segmental wire fixation in young athletes with spondylolysis. *Am J Sports Med* 2003, 31, 359-364, doi:10.1177/03635465030310030601.

41. Reitman, C.A.; Esses, S.I. Direct repair of spondylolytic defects in young competitive athletes. *Spine J* 2002, 2, 142-144, doi:10.1016/s1529-9430(02)00179-1.

42. Omran, K.; Othman, A.M. Lumbar Spondylolysis Reconstruction-Stabilization Using a Motion-Preserving Technique. *World Neurosurg* 2021, 154, e698-e706, doi:10.1016/j.wneu.2021.07.124.

43. Okuwaki, S.; Tatsumura, M.; Gamada, H.; Ogawa, T.; Mammoto, T.; Hirano, A.; Yamazaki, M. Direct reduction and repair of spondylolysis with grade 1 slip using the smiley face rod: a case report. *J Rural Med* 2021, 16, 56-61, doi:10.2185/jrm.2020-039.

44. Gould, H.P.; Winkelman, R.D.; Tanenbaum, J.E.; Hu, E.; Haines, C.M.; Hsu, W.K.; Kalfas, I.H.; Savage, J.W.; Schickendantz, M.S.; Mroz, T.E. Epidemiology, Treatment, and Performance-Based Outcomes in American Professional Baseball Players With Symptomatic Spondylolysis and Isthmic Spondylolisthesis. *Am J Sports Med* 2020, 48, 2765-2773, doi:10.1177/0363546520945727.

45. Bennett, J.T.; Zook, K.J.; Eyvazzadeh, P.M.; Lin, P.S. A Novel Motion-Preservation Technique for Intra and Intra-Intersegmental Repair of Spondylolysis and Spondylolisthesis: The Lin Technique. *Surg Technol Int* 2016, 29, 367-373.

46. Snyder, L.A.; Shufflebarger, H.; O'Brien, M.F.; Thind, H.; Theodore, N.; Kakarla, U.K. Spondylolysis outcomes in adolescents after direct screw repair of the pars interarticularis. *J Neurosurg Spine* 2014, 21, 329-333, doi:10.3171/2014.5.SPINE13772.

47. de Bodman, C.; Bergerault, F.; de Courtivron, B.; Bonnard, C. Lumbo-sacral motion conserved after isthmic reconstruction: long-term results. *J Child Orthop* 2014, 8, 97-103, doi:10.1007/s11832-014-0560-9.

48. Tsai, S.H.L.; Chang, C.W.; Chen, W.C.; Lin, T.Y.; Wang, Y.C.; Wong, C.B.; Yolcu, Y.U.; Alvi, M.A.; Bydon, M.; Fu, T.S. Does Direct Surgical Repair Benefit Pars Interarticularis Fracture? A Systematic Review and Meta-analysis. *Pain Physician* 2022, 25, 265-282.

49. Linton, A.A.; Hsu, W.K. A Review of Treatment for Acute and Chronic Pars Fractures in the Lumbar Spine. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2022, 15, 259-271, doi:10.1007/s12178-022-09760-9.

50. Danielson, B.I.; Frennered, A.K.; Irstam, L.K. Radiologic progression of isthmic lumbar spondylolisthesis in young patients. *Spine (Phila Pa 1976)* 1991, 16, 422-425, doi:10.1097/00007632-199104000-00005.

51. Hanson, D.S.; Bridwell, K.H.; Rhee, J.M.; Lenke, L.G. Correlation of pelvic incidence with low- and

high-grade isthmic spondylolisthesis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2002, 27, 2026-2029, doi:10.1097/00007632-200209150-00011.

52. Sevrain, A.; Aubin, C.E.; Gharbi, H.; Wang, X.; Labelle, H. Biomechanical evaluation of predictive parameters of progression in adolescent isthmic spondylolisthesis: a computer modeling and simulation study. *Scoliosis* 2012, 7, 2, doi:10.1186/1748-7161-7-2.

DOI : 10.34814/sofop-2024-10