

# Pédiatrie

## Clous d'allongement internes: nouvelle méthode de reconstruction des membres inférieurs

Dre ELEFThERIA SAMARA<sup>a</sup> et Pr PIERRE-YVES ZAMBELLI<sup>a</sup>

Rev Med Suisse 2023; 19: 234-8 | DOI : 10.53738/REVMED.2023.19.812.234

Les clous d'allongement intramédullaires pour la reconstruction des membres inférieurs chez les enfants sont un domaine en plein essor et représentent une alternative aux fixateurs externes. Aujourd'hui, 2 types de clous d'allongement intramédullaires sont utilisés: les clous d'allongement osseux motorisés (FITBONE) et à entraînement magnétique (PRECISE). Les indications pour les clous d'allongement des membres sont les suivantes: a) inégalité significative de longueur des membres inférieurs; b) petite taille et déformations dues à des syndromes musculosquelettiques ou à des dysplasies et c) petite taille constitutionnelle. La chirurgie d'allongement intramédullaire est exigeante et représente un mode de traitement sûr et fiable chez les moins de 18 ans, avec un excellent résultat rapporté par les patients.

### Pediatrics

#### Internal lengthening nails: a novel method of lower limb reconstruction in children

*Intramedullary lengthening nails for lower limb reconstruction in children are a rapidly growing field and represent an alternative to external fixators. Today, two types of intramedullary lengthening nails are used: motorized (FITBONE) and magnetically driven (PRECISE) bone lengthening nails. Indications for limb lengthening nails are: 1) Significant lower limb length discrepancy; 2) Short stature and deformities due to musculoskeletal or dysplastic syndromes; 3) Constitutional short stature. Intramedullary lengthening surgery is challenging and represents a safe and reliable mode of treatment in patients under 18 years of age with an excellent reported outcome.*

### INTRODUCTION

La reconstruction par allongement corrige la différence de longueur des membres et les déformations en utilisant l'ostéogénèse par distraction. Cette dernière, aussi appelée callostase, est une technique chirurgicale qui permet de générer du tissu osseux entre les fragments osseux.<sup>1</sup> Une distraction progressive est appliquée directement aux fragments osseux, suite d'une ostéotomie unique, jusqu'à ce que l'allongement soit atteint.<sup>2,3</sup> Les principes biologiques de l'ostéogénèse par distraction pour l'allongement des membres, décrits par Ilizarov il y a environ 60 ans, sont restés largement inchangés.<sup>4,5</sup> Malgré les progrès réalisés dans les systèmes de fixation externe pour l'allongement des membres, plusieurs

complications et obstacles sont inévitables: transfixion musculaire par les broches et les vis, raideur articulaire,<sup>6</sup> faiblesse musculaire,<sup>6,7</sup> douleur, capacité limitée à charger et difficultés dans les activités de la vie quotidienne en raison de la nature encombrante du dispositif.<sup>8</sup> Chez les enfants, des difficultés supplémentaires sont constatées. Elles sont associées à des différences de longueur plus importantes, des déficiences congénitales des membres avec instabilité articulaire<sup>9</sup> et des problèmes sociaux et psychologiques complexes.<sup>10</sup>

Trois types de clous d'allongement intramédullaires entièrement implantables ont été développés. Ces clous créent les forces nécessaires à la distraction du cal, soit par une rotation mécanique du segment, vers l'avant ou l'arrière, pour l'étendre l'un contre l'autre (ISKD (Intramedullary Skeletal Kinetic Distractor)), soit par des moteurs électriques agissant à l'intérieur (FITBONE) ou à l'extérieur du clou (PRECISE).<sup>11,12</sup>

### PRÉSENTATION DES DISPOSITIFS

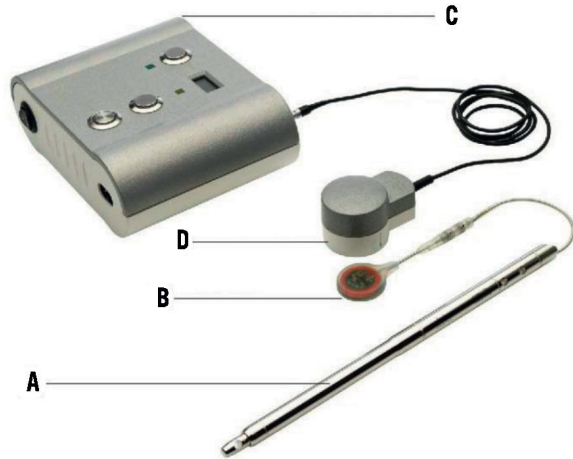
L'ISKD a été introduit sur le marché en 2001 et en a été retiré en 2011.<sup>13</sup> Le FITBONE (Wittenstein Intens, Igersheim, Allemagne) est un clou motorisé en acier inoxydable lancé sur le marché en 1997. Le système FITBONE TAA (Telescopic Active Actuator) se compose du clou d'allongement intramédullaire, avec un récepteur relié par une ligne d'alimentation bipolaire. L'ensemble de contrôle externe FITBONE se compose d'une électronique de contrôle et d'un émetteur (figure 1).<sup>14</sup> L'énergie nécessaire au processus de distraction est transmise au récepteur implanté sous la peau par l'application de l'émetteur. Le clou est doté d'un moteur électromagnétique fermé qui délivre un couple, lequel est converti en mouvement axial par un mécanisme d'engrenage et de broche. Le patient active et contrôle le système par un émetteur (courant d'induction) sur un système récepteur sous-cutané (antenne de réception). Des allongements allant jusqu'à 80 mm dans le fémur et 60 mm dans le tibia peuvent être obtenus. Les clous les plus petits mesuraient 11 mm de diamètre.

L'introduction du clou PRECISE (NuVasive Inc., San Diego, CA) en 2011 aux États-Unis et au niveau international a élargi les indications et rendu possible l'allongement intramédullaire chez les enfants et les adolescents. La disponibilité de clous de petite taille (8,5 mm) rend l'allongement intramédullaire des membres plus applicable à une population de patients pédiatriques et adolescents.<sup>15,16</sup> PRECISE est un clou de verrouillage intramédullaire télescopique en alliage de titane. Le mécanisme comporte une broche en métal magnétique à

<sup>a</sup>Unité d'orthopédie pédiatrique, Hôpital des enfants, Centre hospitalier universitaire vaudois, 1004 Lausanne  
eleftheria.samara@chuv.ch | pierre-yves.zambelli@chuv.ch

**FIG 1** Clou FITBONE TAA System

Il se compose du clou d'allongement intramédullaire (A), avec un récepteur (B) relié par une ligne d'alimentation bipolaire. L'ensemble de contrôle externe FITBONE se compose d'une électronique de contrôle (C) et d'un émetteur (D). TAA: Telescopic Active Actuator.



terres rares qui est reliée à une série de 3 groupes d'engrenages planétaires. Le mécanisme (actionneur) est activé par un dispositif ERC (External Remote Controller). L'ERC fournit une méthode non invasive pour distraire précisément l'angle à des intervalles définis. L'ERC comprend 2 aimants permanents qui sont mis en rotation par un moteur alimenté électroniquement. Lorsque les aimants de l'ERC sont tournés à proximité (moins de 5,5 cm) du clou PRECISE, l'aimant de terre rare dans le clou tourne et la tige de distraction allonge ou raccourcit le clou intramédullaire en fonction du sens de rotation des aimants de l'ERC (figure 2). PRECISE est le seul dispositif implantable d'allongement des membres doté d'une capacité de réglage de la longueur, à la fois en avant et en arrière. L'utilisation du clou PRECISE est interdite pour la population pédiatrique depuis 2021 en raison de l'incidence élevée de l'ostéolyse et de la réaction périostée, qui correspondaient à une corrosion localisée à l'interface télescopique du clou lors de l'implantation.

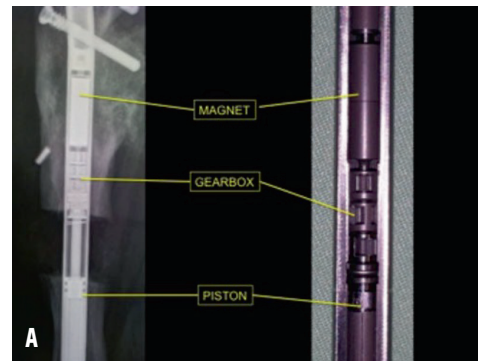
### INDICATIONS CHIRURGICALES

L'allongement des membres pour une inégalité de longueur des membres inférieurs (ILMI) significatif (> 4 cm) est une indication de traitement bien acceptée. On estime que les déformations des membres inférieurs et les ILMI > 2 cm affectent 1 enfant sur 2000<sup>10</sup> et peuvent être dues à des causes congénitales, développementales ou post-traumatiques.

Malgré l'occurrence répandue de l'ILMI, il y a un manque de preuves solides sur lesquelles baser la décision d'initier un traitement de l'ILMI. Les auteurs pensent que, chez les patients présentant une ILMI  $\geq 2$  cm, il y a une indication de traitement. Le **tableau 1** résume les recommandations de traitement. Pour les ILMI entre 2 et 4 cm, une croissance suffisante chez un individu au-dessus du 50<sup>e</sup> percentile pour la taille est une indication pour la modulation de la croissance (épiphysiodèse) et les ostéotomies de raccourcissement, ou

**FIG 2** Clou PRECISE

A. Clou d'allongement; B. External Remote Controller (ERC).



la reconstruction par allongement pour les individus dont la taille finale estimée est inférieure au 50<sup>e</sup> percentile. Les ILMI > 4 cm sont traitées par épiphysiodèse, allongement segmentaire ou la combinaison de ces 2 méthodes, en fonction de l'âge osseux des enfants.<sup>12</sup> Les ILMI significatives ( $\geq 2$  cm), si elles ne sont pas traitées, peuvent entraîner des anomalies de la marche et, à long terme, de l'arthrose du genou<sup>12,17,18</sup> et des asymétries douloureuses des chaînes musculaires.<sup>19</sup> En outre, les anomalies d'apparence et de fonction peuvent rendre difficile la participation des enfants affectés aux activités sportives, éducatives et de loisirs.<sup>10</sup>

La petite taille est une caractéristique commune de la plupart des dysplasies et des syndromes musculosquelettiques. L'allongement de la stature pour le traitement des dysplasies, bien que plus controversé, est également une indication bien acceptée.

**TABLEAU 1** Guide de traitement des ILMI

ILMI: inégalité de longueur des membres inférieurs.

ILMI (cm)	Traitement
0-1	Conservateur, suivi
1-2	Suivi, semelles compensatrices
2-4	Ostéotomies de raccourcissement, épiphysiodèse, allongement
> 4	Épiphysiodèse, allongement

La petite taille constitutionnelle est définie comme étant inférieure au 5<sup>e</sup> percentile pour la taille (5% de la population). De nombreux patients dont la taille est inférieure au 5<sup>e</sup> percentile souffrent de dysphorie de la taille, qui représente un trouble anxieux de l'image corporelle ne répondant généralement pas à une psychothérapie. L'allongement pour la dysphorie de la taille est considéré comme un allongement cosmétique ou esthétique et son indication est relative.

Les décisions de traitement sont principalement basées sur la différence de longueur des membres inférieurs après la maturité squelettique.<sup>12</sup> On détermine l'âge squelettique à l'aide d'un logiciel (BoneXpert) de mesure automatisée à partir de la radiographie de la main de l'enfant mais il existe une incertitude résiduelle d'environ 2 cm, en fonction de la longueur de l'intervalle de pronostic.

Dans notre clinique, l'implantation d'un clou d'allongement interne est réalisée en fonction de la déformation, de l'âge et de l'étiologie. Une approche fémorale antégrade est envisagée pour les enfants de plus de 8 ans qui ne présentent pas de déformation substantielle du plan frontal du genou ou une déformation qui pourrait être traitée par croissance guidée. Seuls les clous d'entrée trochantériens ont été utilisés chez les patients présentant des plaques de croissance ouvertes.

L'implantation de clous fémoraux rétrogrades est utilisée chez les patients présentant une déformation du plan frontal ou sagittal avec une physis fémorale distale fermée. L'implantation de clous tibiaux est réalisée pour un raccourcissement tibial avec ou sans déformation chez les patients ayant la physe (plaque de croissance) tibiale proximal fermée.

## PRÉPARATION PRÉOPÉRATOIRE

La réussite d'un allongement dépend d'une préparation minutieuse. L'examen clinique est la première étape, déterminant l'ILMI et toute déformation associée, l'étiologie, les antécédents et le profil psychologique du patient et de sa famille. Un examen clinique approfondi se concentre sur l'instabilité des articulations et l'amplitude des mouvements, l'état des tissus mous et inclut l'état neurovasculaire. Le jugement fonctionnel par un physiothérapeute expérimenté, les mesures de la force et le laboratoire de la marche sont des outils utiles dans le processus décisionnel des cas complexes. Selon la gravité de l'anomalie, une chirurgie articulaire «préopératoire» peut être indispensable avant l'allongement: ostéotomie pelvienne dans la dysplasie de la hanche ou ostéotomie de valgisation dans la coxa vara. L'impact psychologique est également crucial pour la réussite de la reconstruction par allongement. Une bonne préparation, avec des explications complètes, une prise en charge par un psychologue et éventuellement un contact avec d'autres jeunes permet de réduire le stress.<sup>20,21</sup>

Le bilan radiographique de base comprend des radiographies antéro-postérieures et latérales des 2 jambes en position debout, rotule en avant, avec des blocs placés sous le pied de la jambe courte pour niveler le bassin à l'aide d'un marqueur de calibration. Une tomодensitométrie (CT-scan) est demandée en cas de mauvais alignement rotationnel pour déterminer l'antéversion fémorale et la torsion tibiale.

Les clous d'allongement implantables ne permettent pas de correction postopératoire pendant l'allongement: il est donc essentiel de choisir le bon clou et de planifier soigneusement l'intervention. Notre équipe utilise l'application TraumaCad pour la planification préopératoire.

L'analyse de la déformation basée sur le logiciel comprend un test de malalignement, une analyse du centre de rotation (CORA), la détermination de l'axe mécanique et de sa relation avec le centre du genou et des mesures standardisées des angles d'orientation de l'articulation. Après analyse de la déformation, nous choisissons le site de l'ostéotomie en fonction de l'importance de la correction angulaire et des dimensions du futur clou d'allongement.

## PROCÉDURES CHIRURGICALES

Toutes les interventions chirurgicales sont réalisées en position couchée, sur des tables radiotransparentes, sous anesthésie générale, en utilisant une technique standardisée selon les recommandations du fabricant.<sup>22</sup> Les corticotomies à basse énergie sont réalisées par notre équipe avec des trous de forage multiples et des ostéotomies complétées par des ostéotomes. La technique d'ostéotomie est cruciale pour la réussite de la formation iatrogène d'un nouvel os. Les chirurgiens doivent être conscients que la prévention des dommages thermiques, la séparation soignée des os, la création de surfaces osseuses vasculaires et le respect du périoste sont les pierres angulaires biologiques d'une bonne formation du cal.<sup>19,23</sup>

Les vis de blocage sont utilisées pour stabiliser la correction aiguë et pour empêcher la déformation régénérée pendant l'allongement avec l'implantation de clous fémoraux et tibiaux rétrogrades. Pour l'accomplissement de corrections en 3 dimensions, nous aléons la cavité intramédullaire avec des alésoirs droits et rigides. La bandelette ilio-tibiale est libérée systématiquement au niveau de la rotule pour les allongements fémoraux afin de diminuer la douleur et le risque de subluxation articulaire lors de la distraction. Une distraction peropératoire d'un demi-millimètre est réalisée pour vérifier le dispositif.

## SOINS POSTOPÉRATOIRES

Tous les patients reçoivent une physiothérapie, débutée le premier jour après l'intervention. Après une période de latence de 6 à 7 jours, l'allongement est commencé à raison de 1 mm par jour (0,33 mm × 3) pour l'allongement fémoral et de 0,75 mm par jour (0,25 mm × 3) pour l'allongement tibial. Une mobilisation avec mise en charge partielle est recommandée en fonction du poids du patient, du diamètre du clou et de la compliance, jusqu'à la consolidation de 2 à 3 corticales. Les limites de mise en charge prescrites dans notre clinique sont généralement inférieures aux limites de mise en charge recommandées par les fabricants des implants utilisés. Le suivi postopératoire est effectué 1 fois par semaine avec des radiographies incluant les articulations adjacentes pendant le processus d'allongement. La formation du cal est surveillée à chaque suivi et le taux de distraction est réduit en cas de

mauvaise formation. À la fin de la phase d'allongement, nous effectuons une RX EOS (EOS est un système de radiographie révolutionnaire par ses capteurs très sensibles, basés sur la technologie du Prix Nobel de physique Georges Charpak, permettant une importante diminution de l'irradiation) des membres inférieurs in toto pour valider la fin de cette phase. Par la suite, les patients sont revus et des radiographies standards du membre sont réalisées toutes les 6 semaines, jusqu'à la consolidation complète. Le retrait du matériel est généralement effectué 2 à 3 mois après le temps de consolidation, ce qui est environ 2 fois plus long que le temps de distraction chez les enfants.

## RÉSULTATS ET COMPLICATIONS

Un allongement intramédullaire interne est une procédure exigeante qui, pour être considérée comme réussie, doit remplir les critères suivants: a) allongement adéquat, précis et exact du membre; b) respect de la durée prévue du traitement et c) maintien de la fonction du système musculosquelettique.<sup>24</sup> Tout non-respect de ces critères est considéré comme une complication.

### Fiabilité et précision de l'allongement des membres

Les clous d'allongement fémoral antégrade démontrent une fiabilité de 90 à 97% et une précision de 90 à 92% dans les études rétrospectives publiées dans un seul centre.<sup>25,26</sup> L'alignement physiologique du membre et l'absence de tendance à un mauvais alignement pathologique en valgus, en raison de l'allongement fémoral le long de l'axe anatomique, sont également confirmés par plusieurs études.<sup>25-27</sup> Une complication liée au dispositif a été estimée à 12%, dont 5% sont attribués à des complications liées au mécanisme de distraction et 1% n'a pas atteint l'objectif d'allongement en raison de complications graves liées au dispositif. Globalement, les clous d'allongement intramédullaires semblent être un traitement précis et fiable pour l'allongement dans l'axe anatomique.

### Respect de la durée prévue du traitement

La durée du traitement pour obtenir une régénération osseuse correspond à la date à laquelle la mise en charge totale est autorisée pour un système d'allongement interne. Selon une récente revue systématique de la littérature, les complications liées à la régénération osseuse sont principalement dues à un retard de cicatrisation dans 5% des segments ou à une consolidation prématurée dans 2% des segments. Le retard de cicatrisation ou la reprise chirurgicale due à une infection est de 0,4%.<sup>28</sup>

### Maintien de la fonction du système musculosquelettique

La vitesse du gain de longueur pendant l'ostéogenèse par distraction avec un taux de 0,75 à 1 mm/jour est environ 4 à 8 fois plus rapide que pendant la poussée de croissance de l'adolescent avec ses raccourcissements musculaires temporaires.<sup>29</sup> La complication de la contracture articulaire rapportée est de 5% et la libération primaire des tissus mous pourrait être une clé pour traiter cette complication. Le risque de subluxation et de luxation de l'articulation est estimé, respec-

tivement, à 6 et 1 pour 1000 segments. Les complications neurologiques et vasculaires de l'allongement interne sont rarement rapportées, moins de 1% respectivement.<sup>28</sup>

Frost et coll. ont montré que des complications avec les clous d'allongement peuvent survenir chez 1 patient sur 3 même si, finalement, l'objectif du traitement est toujours atteint.<sup>28</sup>

En résumé, les taux de complications des fixateurs externes sont supérieurs à ceux des clous.<sup>9,26,30</sup> De même, les clous d'allongement ont offert de meilleure qualité de vie ajustée à l'âge du patient (QALY, Quality-Adjusted Life Year) pour les enfants pendant les phases de distraction par rapport aux fixateurs externes.<sup>10</sup> Enfin, les coûts nettement plus élevés des implants sont compensés par des coûts de traitement des complications plus faibles.

## CONCLUSION

L'allongement des membres est une procédure exigeante. Les clous d'allongement sont de plus en plus utilisés à la place des fixateurs externes pour la reconstruction des membres inférieurs. Avec une planification et une préparation préopératoires minutieuses, l'expérience du chirurgien, une technique opératoire méticuleuse, une vigilance à toutes les étapes, les soins et l'éducation du patient et de sa famille, la chirurgie d'allongement intramédullaire est un mode de traitement sûr et fiable chez les moins de 18 ans, avec un excellent résultat rapporté par les patients.

**Conflit d'intérêts:** Les auteurs n'ont déclaré aucun conflit d'intérêts en relation avec cet article.

### IMPLICATIONS PRATIQUES

- Les clous d'allongement intramédullaires constituent l'une des plus grandes avancées technologiques de ces dernières années pour la reconstruction des membres inférieurs chez la population pédiatrique
- Cette technique représente une alternative aux fixateurs externes qui permet de diminuer les complications et d'améliorer la qualité de vie des enfants
- La procédure est exigeante: elle nécessite une planification et une préparation préopératoire minutieuses, une technique opératoire méticuleuse, une vigilance à toutes les étapes, un suivi médical et physiothérapeutique régulier
- Pour le moment, l'utilisation des clous d'allongement internes chez les enfants est limitée par la configuration anatomique, notamment le diamètre et la longueur de l'os, ainsi que par les physes ouvertes



- 1 Sailhan F. Bone lengthening (distraction osteogenesis): A literature review. *Osteoporos Int.* 2011 Jun;22(6):2011-5.
- 2 \*Blázquez-Carmona P, Mora-Maciás J, Sanz-Herrera JA, et al. Mechanical Influence of Surrounding Soft Tissue on Bone Regeneration Processes: A Bone Lengthening Study. *Ann Biomed Eng.* 2021 Feb;49(2):642-52.
- 3 Blázquez-Carmona P, Mora-Maciás J, Morgaz J, et al. Mechanobiology of Bone Consolidation During Distraction Osteogenesis: Bone Lengthening Vs. Bone Transport. *Ann Biomed Eng.* 2021 Apr;49(4):1209-21.
- 4 Ilizarov GA. Clinical application of the tension-stress effect for limb lengthening. *Clin Orthop Relat Res.* 1990 Jan;(250):8-26.
- 5 De Bastiani G, Aldegheri R, Renzi-Bri- vido L, Trivella G. Limb lengthening by callus distraction (callotaxis). *J Pediatr Orthop.* 1987 Mar-Apr;7(2):129-34.
- 6 Song MH, Lee TJ, Song JH, Song HR. Sustained hip flexion contracture after femoral lengthening in patients with achondroplasia. *BMC Musculoskelet Disord.* 2018 Nov;19(1):417.
- 7 Bhavé A, Shabtai L, Woelber E, et al. Muscle strength and knee range of motion after femoral lengthening. *Acta Orthop.* 2017 Apr;88(2):179-84.
- 8 \*\*Paley D, Herzenberg JE, Paremian G, Bhavé A. Femoral lengthening over an intramedullary nail. A matched-case comparison with Ilizarov femoral lengthening. *J Bone Joint Surg Am.* 1997 Oct;79(10):1464-80.
- 9 Horn J, Steen H, Huhnstock S, Hvid I, Gunderson RB. Limb lengthening and deformity correction of congenital and acquired deformities in children using the Taylor Spatial Frame. *Acta Orthop.* 2017 Jun;88(3):334-40.
- 10 \*Hafez M, Nicolaou N, Offiah A, et al. Quality of life of children during distraction osteogenesis: A comparison between intramedullary magnetic lengthening nails and external fixators. *Int Orthop.* 2022 Jun;46(6):1367-73.
- 11 Cole JD, Justin D, Kasparis T, DeVlight D, Knobloch C. The intramedul- lary skeletal kinetic distractor (ISKD): First clinical results of a new intramedul- lary nail for lengthening of the femur and tibia. *Injury.* 2001 Dec;32 Suppl 4:SD129-39.
- 12 \*\*Vogt B, Gosheger G, Wirth T, Horn J, Rödl R. Leg Length Discrepancy- Treatment Indications and Strategies. *Dtsch Arztebl Int.* 2020 Jun;117(24):405-11.
- 13 \*Paley D. PRECICE intramedullary limb lengthening system. *Expert Rev Med Devices.* 2015 May;12(3):231-49.
- 14 Clinical Guide. FITBONE TAA. Disponible sur : [www.orthofix.com/wp-content/uploads/2020/03/Clinician-Guide\\_FITBONE-TAA\\_USA-en\\_Ver- sion-012.pdf](http://www.orthofix.com/wp-content/uploads/2020/03/Clinician-Guide_FITBONE-TAA_USA-en_Ver- sion-012.pdf)
- 15 Shabtai L, Specht SC, Standard SC, Herzenberg JE. Internal lengthening device for congenital femoral deficiency and fibular hemimelia. *Clin Orthop Relat Res.* 2014 Dec;472(12):3860-8.
- 16 \*Kirane YM, Fragomen AT, Roz- bruch SR. Precision of the PRECICE internal bone lengthening nail. *Clin Orthop Relat Res.* 2014 Dec;472(12):3869-78.
- 17 Golightly YM, Allen KD, Helmick CG, et al. Hazard of incident and progressive knee and hip radiographic osteoarthritis and chronic joint symptoms in individuals with and without limb length inequality. *J Rheumatol.* 2010 Oct;37(10):2133-40.
- 18 \*Khamis S, Carmeli E. Relationship and significance of gait deviations associated with limb length discrepancy: A systema- tic review. *Gait Posture.* 2017 Sep;57:115-23.
- 19 Hasler CC, Krieg AH. Current concepts of leg lengthening. *J Child Orthop.* 2012 Jun;6(2):89-104.
- 20 Chhina H, Klassen AF, Kopec JA, et al. What matters to children with lower limb deformities: An international qualitative study guiding the development of a new patient-reported outcome measure. *J Patient Rep Outcomes.* 2021 Apr;5(1):30.
- 21 Moraal JM, Elzing-Plomp A, Jong- mans MJ, et al. Long-term psychosocial functioning after Ilizarov limb lengthening during childhood. *Acta Orthop.* 2009 Dec;80(6):704-10.
- 22 \*\*Rozbruch SR, Birch JG, Dahl MT, Herzenberg JE. Motorized intramedullary nail for management of limb-length discrepancy and deformity. *J Am Acad Orthop Surg.* 2014 Jul;22(7):403-9.
- 23 Aldegheri R. Femoral callotaxis. *J Pediatr Orthop B.* 1997 Jan;6(1):42-7.
- 24 Lascombes P, Popkov D, Huber H, Hau- mont T, Journeau P. Classification of com- plications after progressive long bone lengthening: proposal for a new classification. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2012 Oct;98(6):629-37.
- 25 \*\*Frommer A, Roedl R, Gosheger G, et al. What Are the Potential Benefits and Risks of Using Magnetically Driven Antegrade Intramedullary Lengthening Nails for Femoral Lengthening to Treat Leg Length Discrepancy? *Clin Orthop Relat Res.* 2022 Apr;480(4):790-803.
- 26 \*Tillotson LO, Maddock CL, Hanley J, et al. Femoral Lengthening in Children: A Comparison of Motorized Intramedullary Nailing Versus External Fixation Tech- niques. *J Pediatr Orthop.* 2022 May;42(5):253-9.
- 27 Burghardt RD, Paley D, Specht SC, Her- senberg JE. The effect on mechanical axis deviation of femoral lengthening with an intramedullary telescopic nail. *J Bone Joint Surg Br.* 2012 Sep;94(9):1241-5.
- 28 \*\*Frost MW, Rahbek O, Traerup J, Ceccotti AA, Kold S. Systematic review of complications with externally controlled motorized intramedullary bone lengthening nails (FITBONE and PRECICE) in 983 segments. *Acta Orthop.* 2021 Feb;92(1):120-7.
- 29 Aronson J. Experimental and clinical experience with distraction osteogenesis. *Cleft Palate Craniofac J.* 1994 Nov;31(6):473-81; discussion 481-2.
- 30 \*Black SR, Kwon MS, Cherkashin AM, et al. Lengthening in Congenital Femoral Deficiency: A Comparison of Circular External Fixation and a Motorized Intramedullary Nail. *J Bone Joint Surg Am.* 2015 Sep;97(17):1432-40.

\* à lire

\*\* à lire absolument