

# Généralités sur le rachis : Anatomie descriptive et fonctionnelle

C. DECANTE, D. GAUDET, A. CHALOPIN, E. MAYRARGUE, A. HAMEL

Table des matières :

## I - ANATOMIE

- 1) Généralités : le rachis
- 2) Vertèbres et disques intervertébraux
- 3) Le disque intervertébral
- 4) Surfaces articulaires et moyens d'union
- 5) Vascularisation et innervation (étage lombaire)

## II - CROISSANCE DU RACHIS

- 1) Organogénèse : formation des vertèbres et des disques intervertébraux
- 2) Ossification endochondrale d'une vertèbre

## III - ANATOMIE FONCTIONNELLE DU RACHIS

## I - ANATOMIE

### 1) Généralités : le rachis

Le rachis (du grec ancien  $\rho\acute{\alpha}\chi\iota\varsigma$ , rakhis « épine dorsale »), est une chaîne osseuse articulée composée de 24 vertèbres mobiles (7 vertèbres cervicales, 12 vertèbres thoraciques, 5 vertèbres lombaires) et de 8 à 10 vertèbres fusionnées (5 vertèbres sacrées, 3 à 5 vertèbres coccygiennes). Élément principal du squelette axial, le rachis contient notamment la moelle spinale et les méninges spinales situées dans le canal vertébral [1].

Le rachis mesure environ 70cm chez l'homme, 60cm chez la femme [2]. Debout, en situation physiologique, il présente quatre courbures sagittales qui sont propres à l'espèce humaine. Il existe ainsi une courbure cervicale et une courbure lombaire convexes vers l'avant appelées « lordoses » cervicales et lombaires ; et des courbures thoraciques et sacro-coccygiennes concaves vers l'avant appelées « cyphoses » thoraciques et sacro-coccygiennes. De face, le rachis est rectiligne.

### 2) Vertèbres et disques intervertébraux

Les vertèbres (du latin *vertebra* : articulation, jointure) ont une anatomie semblable, exceptées la première et la deuxième vertèbres cervicales. Au niveau de la portion ventrale du rachis, les corps vertébraux s'articulent entre eux par l'intermédiaire des disques intervertébraux solidement attachés aux plateaux vertébraux. La partie dorsale de la vertèbre est « l'arc neural », comprenant les lames, les processus transverses, les massifs articulaires crâniens et caudaux et le processus épineux. Chaque arc neural s'articule avec les vertèbres adjacentes par l'intermédiaire des 4 massifs articulaires : 2 facettes crânielles et 2 facettes caudales. Enfin, il existe 2 pédicules qui relient le corps vertébral à l'arc neural formant ainsi le canal vertébral. À l'intérieur y passe la moelle spinale (étendue du

foramen magnum jusqu'à la première vertèbre lombaire) puis la queue de cheval contenues dans les méninges, les vaisseaux spinaux et épiduraux.

Entre chaque vertèbre, il existe deux foramens intervertébraux (droit et gauche). Le foramen intervertébral est limité crânialement par le pédicule de la vertèbre crâniale, caudalement par le pédicule de la vertèbre caudale, ventralement par le DIV et les corps vertébraux et dorsalement par les massifs articulaires. Dans chaque foramen intervertébral passe un nerf spinal, anciennement appelée racine nerveuse (Fig. 1a).

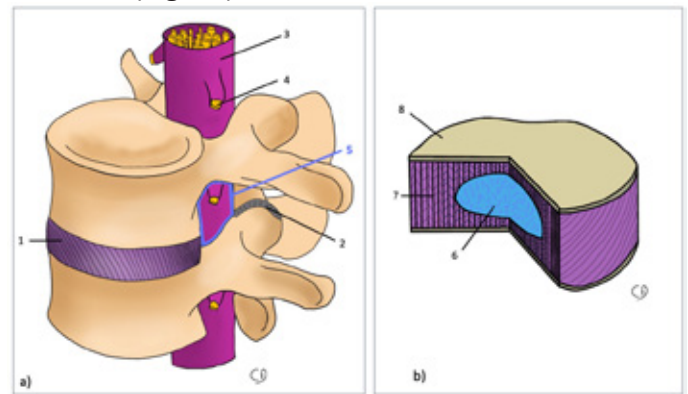


Fig. 1 a) Segment rachidien lombaire (1 : disque intervertébral, 2 : articulation zygapophysaire, 3 : dure-mère, 4 : nerf spinal, 5 : Foramen intervertébral).

b) le disque intervertébral (6 : noyau pulpeux, 7 : anneau fibreux, 8 : Plateau cartilagineux).

### 3) Le disque intervertébral

Le disque intervertébral (DIV) est un fibrocartilage de hauteur variable, atteignant 12mm d'épaisseur dans le secteur lombaire et faisant environ 4 cm de diamètre [3]. Il est composé de trois structures distinctes : le noyau pulpeux (ou Nucleus Pulposus), l'anneau fibreux (ou Annulus Fibrosus) et les plateaux cartilagineux [4] (Fig. 1b).

Le noyau pulpeux est une structure fortement hydratée assimilable à un hydrogel. Cet état d'hydratation s'explique grâce à sa matrice extra-cellulaire riche en protéoglycanes qui retiennent les molécules d'eau [5]. L'anneau fibreux est une structure fibreuse composée de couches lamellaires concentriques enveloppant le noyau pulpeux et s'étendant entre 2 plateaux cartilagineux adjacents. Le nombre de lamelles varie entre 15 et 25. Ces lamelles sont majoritairement composées de fibres de collagène strictement parallèles. Elles sont inclinées par rapport au plan du DIV d'environ 30° et ont donc une orientation hélicoïdale [6,7]. Entre deux lamelles adjacentes, les fibres de collagènes ne sont pas orientées dans le

même sens et la répartition n'est pas ubiquitaire [8]. Les plateaux cartilagineux sont situés sur les faces crâiales et caudales des DIV. Il s'agit d'une « plaque » cartilagineuse de moins d'1 mm d'épaisseur amarrant le DIV aux corps vertébraux adjacents [9,10]. Souvent oubliés, les plateaux cartilagineux ont pourtant un rôle majeur. Le premier est mécanique, ils assurent un solide amarrage du DIV aux corps vertébraux adjacents. Le second est homéostasique, ils permettent les échanges entre la vertèbre richement vascularisée et le DIV qui est avasculaire [11,12]. Les plateaux cartilagineux sont à distinguer des plateaux vertébraux, qui correspondent aux surfaces osseuses crâiales et caudales des corps vertébraux. Un amalgame est souvent fait entre ces deux structures.

#### 4) Surfaces articulaires et moyens d'union

Ainsi entre 2 vertèbres adjacentes, il existe 3 articulations : le DIV qui est une articulation fibro-cartilagineuse (ou symphyse) et 2 articulations synoviales : les articulations zygapophysaires qui sont des articulations à surfaces planes (arthrodies) aux étages cervical et thoracique et des articulations trochoïdes à l'étage lombaire.

Outre les DIV et les articulations zygapophysaires, de nombreux ligaments assurent la liaison entre les vertèbres (Fig. 2). Deux ligaments sont des moyens d'unions inter-corporéaux. Le ligament longitudinal ventral est situé à la face ventrale des corps vertébraux auxquels il est très adhérent. C'est un important frein à l'hyperextension du rachis. Le ligament longitudinal dorsal est situé dans le canal vertébral, à la face dorsale des corps vertébraux. Moins large que son homologue ventral, il est surtout adhérent aux DIV. De nombreux ligaments assurent la jonction entre les arcs neurax. Le ligament supra-épineux est un ligament continu s'insérant sur l'extrémité des processus épineux. Les ligaments inter-épineux et inter-transversaires s'insèrent respectivement entre les processus épineux et les processus transversaires. Très solides, les ligaments inter-épineux sont d'importants freins à l'hyperflexion du rachis. Les ligaments jaunes sont des ligaments se fixant sur le bord des lames adjacentes. Particulièrement épais et résistants, ils limitent également l'hyperflexion du rachis.

Ces ligaments assurent des liaisons extrêmement solides et sont des acteurs majeurs de la stabilité du rachis. Seul un traumatisme à haute énergie peut entraîner la rupture de ces ligaments.

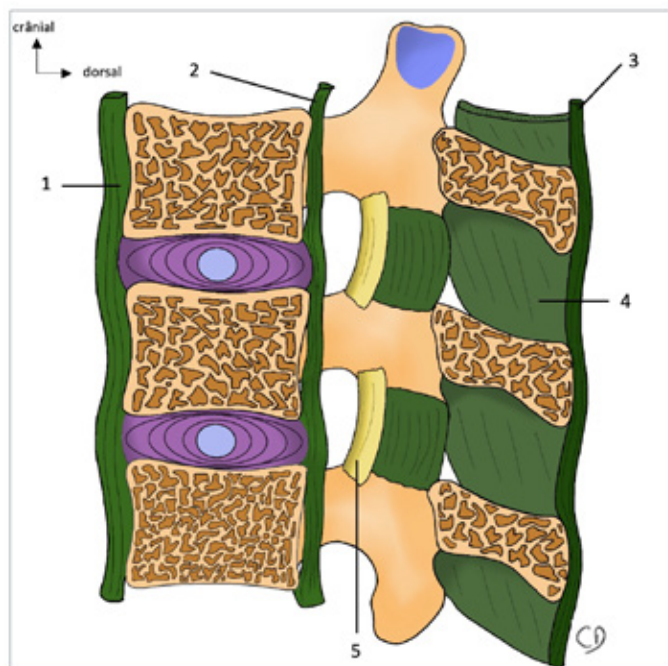


Fig. 2 Coupe sagittale d'un segment vertébral : les moyens d'union ligamentaires (1 : ligament longitudinal ventral, 2 : ligament longitudinal dorsal, 3 : ligament supra-épineux, 4 : ligament inter-épineux, 5 : ligament jaune).

#### 5) Vascularisation et innervation (étage lombaire)

La vascularisation artérielle des vertèbres lombaires provient de branches perforantes, issues des artères radiculo-médullaires, ou directement des artères lombales (Fig. 3a). La vascularisation veineuse est aussi très riche. Il existe un plexus veineux extra-dural dense dans le canal vertébral qui draine la vertèbre. Ce plexus se draine ensuite dans les veines lombales ascendantes par l'intermédiaire de veines radiculo-médullaires (Fig. 3b).

Le disque intervertébral est avasculaire, exceptés les plateaux cartilagineux et la partie la plus périphérique de l'anneau fibreux qui sont vascularisés par de rares capillaires artériels issus d'artéριοles vascularisant le corps vertébral.

L'innervation du rachis est complexe, car elle provient de la moelle spinale, mais également de rameaux nerveux végétatifs provenant des chaînes ganglionnaires latéro-vertébrales [13,14]. Il existe de nombreux rameaux communicants entre ces 2 systèmes.

Après son passage dans le foramen intervertébral le nerf spinal se divise rapidement en un rameau antérieur et un rameau postérieur. Ce dernier contourne l'articulation zygapophysaire qu'il innerve et est donc un acteur des douleurs de ces derniers. Avant sa division, le nerf spinal émet une branche collatérale qui a un trajet récurrent vers le canal vertébral. Il s'agit du rameau méningé ou nerf sinu-vertébral de Luschka qui reçoit à son tour des rameaux communicants provenant de la chaîne latéro-vertébrale. Le nerf sinu-vertébral innerve la face ventrale de la dure-mère, le ligament longitudinal dorsal et l'anneau fibreux du disque intervertébral (Fig. 3c). Il est un acteur majeur dans les lombalgies notamment d'origine

discogénique. Il a d'ailleurs été montré que les disques intervertébraux dégénérés de patients lombalgiques disposent d'une innervation plus riche [15,16].

Le rachis est également innervé par le système végétatif. Des rameaux nerveux innervant la portion antérieure du DIV convergent vers la chaîne ganglionnaire latéro-vertébrale. Au niveau du rachis lombaire, l'innervation végétative des DIV converge vers le ganglion L2. C'est à ce niveau que peuvent être pratiquées des infiltrations chez les patients atteints de lombalgies discogéniques.

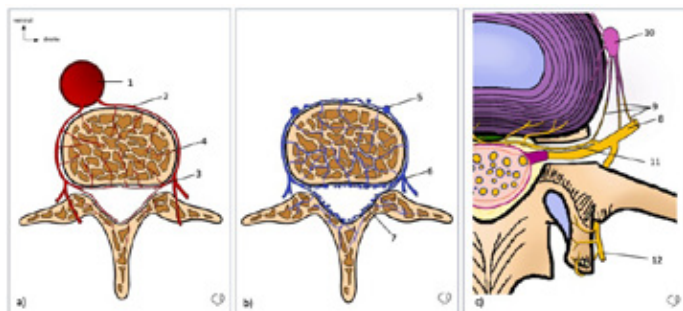


Fig. 3 vues supérieures d'une vertèbre lombaire

a) Vascularisation artérielle (1 : aorte abdominale, 2 : artère lombale droite, 3 : artère radiculo-médullaire droite, 4 : artère perforante)

b) Drainage veineux (5 : veine lombale ascendante droite, 6 : veine radioculo-médullaire droite, 7 : plexus veineux)

c) Innervation (8 : nerf spinal antérieur droit, 9 : rameaux communicants, 10 : chaîne ganglionnaire latéro-vertébrale droite, 11 : nerf sinu-vertébral droit, 12 : nerf spinal postérieur droit)

## II - Croissance du rachis

### 1) Organogénèse : formation des vertèbres et des disques intervertébraux

Lors de la gastrulation (3e semaine de gestation chez l'Homme), la notochorde apparaît au sein du mésoblaste. C'est la notochorde qui définira l'axe longitudinal de l'embryon et qui orchestre la formation des vertèbres et des DIV grâce à de nombreuses voies de signalisation. De part et d'autre de la notochorde, les somites apparaissent au sein du mésoblaste para-axial. Ces somites contiennent le matériel cellulaire pour la constitution du squelette axial, de la musculature du tronc ainsi que des tissus sous-cutanés et cutanés [17].

Sous l'action de certaines molécules de signalisation, telles que Sonic hedgehog et Noggin, la portion ventro-médiale des somites évolue et se différencie en sclérotome [18,19]. Les cellules mésenchymateuses du sclérotome migrent ensuite autour de la notochorde. Un réarrangement cellulaire se produit au sein des sclérotomes. Il apparaît 2 régions de faibles condensations cellulaires : une région crâniale et une région caudale, séparées par un amas de cellules plus condensées formant la limite intra-segmentaire (ou fissure de Von Ebner) [17]. C'est le phénomène de resegmentation des sclérotomes.

Les vertèbres se formeront dans les zones peu

condensées dès lors que les cellules se différencieront en chondrocytes hypertrophiques [20]. La partie la plus ventrale donnera donc les corps vertébraux et les plateaux cartilagineux, la partie la plus dorsale donnera les arcs dorsaux. Une vertèbre est ainsi issue de la partie caudale et de la partie crâniale de 2 sclérotomes adjacents (Fig. 4).

Les zones plus condensées des sclérotomes évolueront vers des structures fibro-cartilagineuses dans lesquelles les cellules s'allongent et s'organisent en cercles concentriques autour de la notochorde. À terme, cette structure tissulaire sera organisée et formera l'anneau fibreux du DIV [18,21,22]. Concernant le noyau pulpeux, il est un reliquat de la notochorde [23,24]. En effet la notochorde régresse dans les régions des futurs corps vertébraux alors que les cellules de la notochorde s'accumulent au centre des futurs DIV (Fig. 4). Pour chaque métamère, les nerfs spinaux apparaissent et traversent les sclérotomes au niveau des futurs foramens intervertébraux. Il est important de préciser que la métamérisation ne concerne pas uniquement le rachis, les sclérotomes les plus crâniens participeront à la formation de la boîte crânienne et certains nerfs crâniens seront d'origine somitique [25].

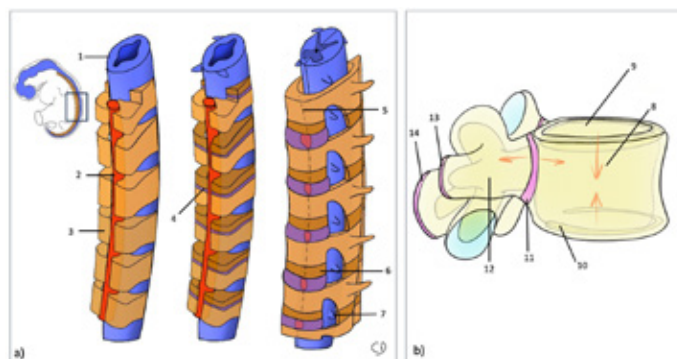


Fig. 4 a) Formation des vertèbres et des DIV à partir des sclérotomes et de la notochorde (1 : tube neural, 2 : notochorde, 3 : Sclérotome, 4 : limite intra-segmentaire (fissure de Von Ebner), 5 : involution partielle de la notochorde, 6 : nerf spinal)

b) Ossification vertébrale (8 : point d'ossification primaire du corps vertébral, 9 : point d'ossification secondaire du plateau vertébral, 10 : point d'ossification secondaire du listel marginal, 11 : cartilage neuro-central, 12 : point d'ossification secondaire du massif articulaire, 13 : cartilage de croissance apophysaire du processus transverse, 14 : cartilage de croissance du processus épineux).

### 2) Ossification endochondrale d'une vertèbre

Une vertèbre type est constituée d'un point d'ossification primaire unique qui correspond au corps vertébral. La vertèbre est également constituée de 2 points d'ossifications secondaires, les massifs articulaires. Ces points d'ossification secondaires sont reliés au point d'ossification primaire par le cartilage neuro-central qui permet la croissance en longueur du pédicule vertébral et donc l'élargissement du canal vertébral au cours de la croissance. L'ossification du cartilage neuro-central se fait bien avant la puberté,

vers 10 ans chez l'Homme et le diamètre du canal vertébral a atteint 95% de son diamètre définitif vers l'âge de 4 ans. Ainsi une arthrodèse vertébrale après cet âge n'aurait pas de conséquence sur le diamètre du canal vertébral [26]. Latéralement, il existe un cartilage de croissance apophysaire permettant la croissance de chaque processus transverse. Les lames vertébrales apparaissent par prolongement des noyaux des massifs articulaires vers l'arrière et vers le dedans et sont reliées par un cartilage de croissance apophysaire qui deviendra le processus épineux. La croissance en hauteur du corps vertébral est assurée par 2 cartilages de croissances situés sur les plateaux vertébraux. Chez l'Homme, ce cartilage de croissance est associé à un point d'ossification secondaire, annulaire, qui ne s'ossifiera qu'à la puberté : c'est le listel marginal (Fig. 4b).

### III - Anatomie fonctionnelle du rachis

Le rachis est un complexe polyphasique faisant alterner des phases rigides : les vertèbres et des phases mobiles : les DIV et les articulations zygapophysaires. Il peut supporter d'importantes charges, grâce aux DIV qui participent à la redistribution des charges appliquées. La présence de courbures rachidiennes permettrait de multiplier par 10 la résistance du DIV à la compression [2]. C'est l'organisation des travées osseuses des vertèbres qui permet de répartir les contraintes entre les articulations zygapophysaires et les DIV. En position neutre, le DIV est soumis à une force de compression axiale. Cette compression est principalement absorbée par le noyau pulpeux qui transmet ces forces à l'anneau fibreux sous forme de contraintes radiales et tangentielles. L'anneau fibreux se retrouve en tension (Fig. 5).

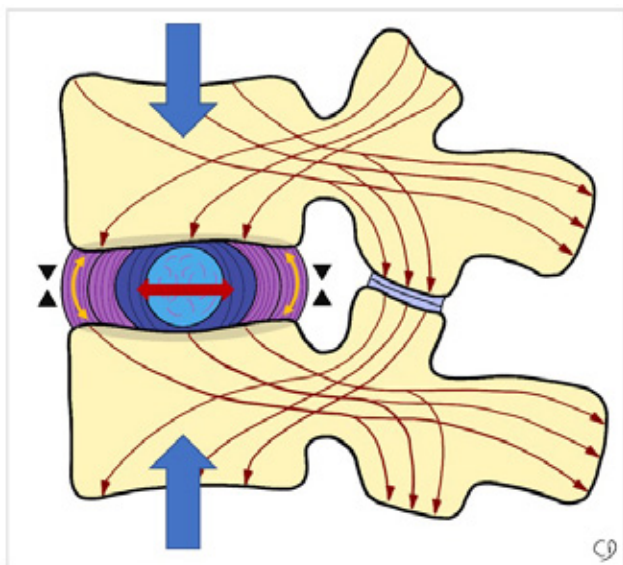


Fig. 5 Répartition des contraintes au sein du disque intervertébral. Flèches bleues : forces de compression axiales, flèches marrons : répartition des contraintes au sein de la vertèbre vers les articulations zygapophysaires et les DIV, flèche rouge : compression du NP et de l'AF interne, flèches jaunes : mise en tension de l'AF externe, triangles noirs : diminution de la hauteur discale

Le DIV permet à 2 vertèbres adjacentes d'avoir 6 mouvements relatifs propres selon les 3 degrés de liberté : rotations, translations et compression-distraktion [27,28]. Les mouvements entre 2 vertèbres adjacentes sont de faibles amplitudes et ces amplitudes ne sont pas les mêmes entre les étages cervicaux, thoraciques ou lombaires. DELMAS a d'ailleurs montré qu'il existait une corrélation entre le ratio « épaisseur du DIV / hauteur crânio-caudale du corps vertébral » (qui est de 1/6 pour l'étage thoracique, et de 1/3 pour les étages cervicaux et lombaires) et les amplitudes autorisées par les DIV [29]. Les DIV cervicaux et lombaires autorisent des mouvements plus amples, sont donc plus sollicités et plus sujets aux lésions. Le DIV est donc soumis en permanence à des contraintes en compression, en traction, en torsion, en flexion et en cisaillement [28,30]. Par exemple, lorsque le rachis effectue une flexion ventrale, la compression est plus importante sur la partie ventrale du DIV. Le NP se déforme et se déplace dorsalement, vers la convexité de la déformation rachidienne. Cela accentue la tension de l'AF dans la portion dorsale du DIV. On comprend ainsi aisément le risque de lésion de l'AF et de hernie discale traumatique lors de l'association de la flexion du rachis et du port de charge.

### Références bibliographiques :

1. Rouvière H, Delmas A. Anatomie Humaine Tome 2 : le Tronc. 15e ed. MASSON, editor. 2002. 784 p.
2. Kamina P. Anatomie clinique Tome 2 : tête, cou, tronc. 3e ed. Maloine, editor. 2008. 405 p.
3. Urban JPG, Roberts S. Degeneration of the intervertebral disc. Vol. 5, Arthritis Research and Therapy. Arthritis Res Ther; 2003. p. 120–30.
4. Marchand F, Ahmed AM. Investigation of the laminar structure of lumbar disc anulus fibrosus. Spine (Phila Pa 1976). 1990;15(5):402–10.
5. Zhang Y, Chee A, Thonar EJMA, An HS. Intervertebral disk repair by protein, gene, or cell injection: a framework for rehabilitation-focused biologics in the spine. [Internet]. Vol. 3, PM & R : the journal of injury, function, and rehabilitation. PM R; 2011.
6. Bruehlmann SB, Rattner JB, Matyas JR, Duncan NA. Regional variations in the cellular matrix of the annulus fibrosus of the intervertebral disc. J Anat. 2002 Aug;201(2):159–71.
7. Inoue H, Takeda T. Three-dimensional observation of collagen framework of lumbar intervertebral discs. Acta Orthop. 1975;46(6):949–56.
8. Postacchini F. Anatomy and pathomorphology. In: Lumbar Disc Herniation. Springer S. 2012. p. 17–131.

9. Moore RJ. The vertebral endplate: Disc degeneration, disc regeneration. In: European Spine Journal. Eur Spine J; 2006.
10. Silva-Correia J, Correia SI, Oliveira JM, Reis RL. Tissue engineering strategies applied in the regeneration of the human intervertebral disc. Vol. 31, Biotechnology Advances. Biotechnol Adv; 2013. p. 1514–31.
11. Urban JPG, Smith S, Fairbank JCT. Nutrition of the intervertebral disc. Spine (Phila Pa 1976). 2004;29(23):2700–9.
12. Brodin H. Paths of nutrition in articular cartilage and intervertebral discs. Acta Orthop. 1954;24(1–4):177–83.
13. Palmgren T, Gronblad M, Virri J, Kaapa E, Karaharju E. An immunohistochemical study of nerve structures in the annulus fibrosus of human normal lumbar intervertebral disc. Spine (Phila Pa 1976). 1999;24:2075–9.
14. Shankar H, Scarlett J, Abram S. Anatomy and pathophysiology of intervertebral disc disease. In: Tech Reg Anesth Pain Manag. 2009. p. 67–75.
15. Coppes M, Marani E, Tomeer R, Groen G. Innervation of “painful” lumbar discs. Spine (Phila Pa 1976). 1997;22:2342–50.
16. Freemont AJ, Peacock TE, Goupille P, Hoyland JA, O’Brien J, Jayson MI. Nerve ingrowth into diseased intervertebral disc in chronic back pain. Lancet. 1997;350(9072):178–81.
17. Larsen WJ. Embryologie humaine. de boeck. 2011.
18. Monsoro-Burq AH. Sclerotome development and morphogenesis: When experimental embryology meets genetics. Vol. 49, International Journal of Developmental Biology. Int J Dev Biol; 2005. p. 301–8.
19. Scaal M. Early development of the vertebral column. Vol. 49, Seminars in Cell and Developmental Biology. Academic Press; 2016. p. 83–91.
20. Alman BA. The role of hedgehog signalling in skeletal health and disease. Vol. 11, Nature Reviews Rheumatology. Nature Publishing Group; 2015. p. 552–60.
21. Hayes AJ, Benjamin M, Ralphs JR. Role of actin stress fibres in the development of the intervertebral disc: Cytoskeletal control of extracellular matrix assembly. Developmental Dynamics. 1999;215(3):179–89.
22. Shapiro IM, Risbud M V. Introduction to the structure, function, and comparative anatomy of the vertebrae and the intervertebral disc. In: the intervertebral disc: molecular and structural studies of the disc in health and disease. Springer s. 2013. p. 3–15.
23. Choi KS, Cohn MJ, Harfe BD. Identification of nucleus pulposus precursor cells and notochordal remnants in the mouse: Implications for disk degeneration and chordoma formation. Developmental Dynamics. 2008 Dec;237(12):3953–8.
24. McCann MR, Séguin CA. Notochord cells in intervertebral disc development and degeneration. Vol. 4, Journal of Developmental Biology. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2016.
25. Müller F, O’Rahilly R. Segmentation in staged human embryos: The occipitocervical region revisited. J Anat. 2003 Sep 1;203(3):297–315.
26. Dimeglio A, Canavese F. The growing spine: how spinal deformities influence normal spine and thoracic cage growth. Eur Spine J. 2012 Jan;21(1):64–70.
27. Hsieh AH, Twomey JD. Cellular mechanobiology of the intervertebral disc: New directions and approaches. J Biomech. 2010 Jan 5;43(1):137–45.
28. Kapandji A-I. Anatomie Fonctionnelle tome 3 : tête et rachis. Maloine. 2019. 20–35 p.
29. Delmas A. Types rachidiens de statique corporelle. Rev Morpho-physiol Hum . 1951;27–32.
30. Jongeneelen C. Biomechanics in intervertebral disc : a literature review. Eindhoven University of Technology; 2006.

**DOI : 10.34814/sofop-2024-01**