



HAL
open science

Rapports méninges des nerfs spinaux dans leur trajet intra et extra foraminal : application en pratique chirurgicale

Thomas Wavasseur

► **To cite this version:**

Thomas Wavasseur. Rapports méninges des nerfs spinaux dans leur trajet intra et extra foraminal : application en pratique chirurgicale. Médecine humaine et pathologie. 2017. dumas-01623489

HAL Id: dumas-01623489

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01623489>

Submitted on 25 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

- Université de Bordeaux -
U.F.R. des Sciences médicales

Année 2017

n°3142

THESE

Pour l'obtention du
Diplôme d'Etat de Docteur en Médecine

Présentée et soutenue publiquement

le 19 Octobre 2017

par

Thomas WAVASSEUR

né le 19 Novembre 1986 à Metz (57)

RAPPORTS MENINGES DES NERFS SPINAUX DANS LEUR TRAJET INTRA ET EXTRA FORAMINAL - APPLICATION EN PRATIQUE CHIRURGICALE -

Directrice de thèse : Madame le Professeur Dominique LIGUORO
Rapporteur : Monsieur le Professeur Jean-Marc VITAL

- Jury de Thèse -

Monsieur le Professeur Jean-Rodolphe VIGNES	Président
Madame le Professeur Dominique LIGUORO	Juge
Monsieur le Professeur Jean-Marc VITAL	Juge
Monsieur le Professeur Olivier GILLE	Juge
Monsieur le Docteur Patrice MENEGON	Juge

REMERCIEMENTS

A mes Maitres,

Monsieur le Professeur J.Guerin, pour ses enseignements cliniques de grandes qualités. Vous avez appris à de nombreux étudiant à apprivoiser le SNC et renforcé ma passion pour la neuro-anatomie.

Madame le Professeur D.Liguoro, pour m'avoir donné l'envie de devenir Neurochirurgien (depuis le PCEM2), pour sa bienveillance, son soutien, ses conseils dans ce travail mais aussi au quotidien. Merci de participer si activement à la formation théorique et pratique de vos internes.

Monsieur le Professeur JR.Vignes, pour sa confiance accordée (à raison ?), ses encouragements et sa participation dans ma formation chirurgicale. Travailler ensemble est vraiment un plaisir.

Monsieur le Professeur R.Assaker, pour avoir grandement participé à ma formation en chirurgie du Rachis en me faisant partager son expérience théorique et pratique (« Que des beaux gestes !! », « Il faut que tu sois convainquant »). Merci de m'avoir aussi bien reçu et traité en véritable « Lillois ».

Messieurs les Professeurs O.Gille et JM.Vital, d'avoir bien voulu juger ce travail mais aussi pour m'avoir fait partager leurs expériences, leurs connaissances et leurs passions pour la chirurgie du Rachis. Merci de m'avoir traité comme un véritable « Orthopédiste ».

Monsieur le Pr H.Loiseau, pour ses conseils dans ma formation neurochirurgicale, son aide et ses tentatives de dissuasion « il y a vouloir et pouvoir... ». J'espère ne pas vous avoir déçu !

A tous ceux qui ont largement participé à ma Formation,

Le service de Neurochirurgie A : au Dr Dautheribes grâce à qui je suis devenu, entre autre, spécialiste du « suricat et de la cagouille », le Dr Gimbert car « les complications, on n'aime pas ça...ça sert à rien ! », le Dr San-Galli qui m'a fait réaliser mon premier volet crânien et partager sa large expérience chirurgicale. A Vincent, ancien co-interne puis chef merci pour ton soutien, ton aide et ta disponibilité.

Le service de Neurochirurgie B : aux Pr Cuny et Loiseau pour leur soutien et encouragements. Au Dr Monteil : parce que la TWA ne s'est pas encore crashée ! Au Dr Penchet parce que c'est probablement « l'anévrisme le plus difficile que j'ai jamais clippé ! ». Au Dr Mollier pour sa gentillesse et sa patience.

Le service de Neurochirurgie D de Lille : au Pr Assaker merci encore pour votre accueil, votre apprentissage et tous ces « beaux gestes ! », au Dr Zairi merci pour ta patience, tes conseils et soutien ; au Dr Marinho pour sa gentillesse et sa finesse légendaire ; au Dr Têtard pour m'avoir surnommé Wavavalve après quelques soirées à bidouiller des KT et fait « caresser des disques » ; au Dr Ouammou pour la pire infection de scoliose jamais vue et le seul à mettre des pantalons en taille 0 ! A Henri parce que « le matin c'est 7h30, ok ? » Et puis tous les autres : Rabi, Marc, Dr Bourgeois, aux Pr Vinchon et Lejeune.

Le service de Neuroradiologie du Pr Dousset que je remercie pour son accueil et sa confiance accordée. Merci à Jérôme (« le bon ») car « c'est du caviar », Xavier (« la brute ») « t'as pas une cigarette ? J'ai arrêté de fumer », Patrice (« le truand ») « non mais la tu vas gérer cette vacation » ^^ . Travailler avec vous est un vrai plaisir !!

Le service d'ORL du CH de PAU : le Dr Barthelme pour sa confiance et sa gentillesse. Le Dr Mondina pour sa joie, son entrain ; le Dr Rau pour ses conseils ; le Dr Petria un modèle de vivacité et d'expérience ; le Dr Solans pour sa confiance.

Le laboratoire Inserm U1034 du Pr Couffinhal pour m'avoir bien aidé à la réalisation des coupes histologiques : Myriam sans qui la réalisation des lames aurait été bien plus compliquée.

A tous mes anciens co-internes pour certains devenus chefs :

Vincent pour sa disponibilité et son aide « la chirurgie ? C'est facile », Julien pour ces grands moments de déconne, Gauthier et son humour légendaire ! Florent alias Jean Remi !!

Alix pour un semestre inoubliable, Elodie toujours à fond !

En ortho : Alexandre « et alors tu veux une médaille ? », Clément « on est que 2 et on gère...bof », Samuel « j'ai dit avec la main !! », Wendy pour sa bonne humeur et son entrain !!

Mes anciens co-internes Lillois devenus de véritables amis qui ont rendu ce semestre moins difficile :

Mathilde et ses séances de yoga improvisées, Victor le petit excité, Louis alias « mister CHU » le noyau dur, Anaïs et sa bonne humeur quotidienne.

Aux plus jeunes qui assureront la relève :

Paul alias Paquito « moi ça ne me choque pas »...du calme. Cassandre, Mathilde, bon courage.

A ma famille,

Papa, pour ta leçon de vie, ton courage, tes conseils et ton soutien au quotidien, tu restes pour moi un modèle.

Maman, pour tes sacrifices, pour l'éducation que tu m'as donné, la confiance que tu m'as apportée et ton aide au quotidien.

Mon frère Julien, comme tu le dis si bien « sans moi tu n'aurai pas été le même » ^^, merci pour ton soutien même si tu ne comprend pas ce que je fais « tu travailles encore aux urgences non ? » !!

A ma Femme, Alexandra, la meilleure des épouses et la plus fantastique des mamans. Ton énergie, ton soutien et ton amour me sont indispensables. Merci pour tes conseils, ton petit caractère ^^, tu me rends meilleur !

A mon fils Valentin : un amour d'enfant, une force de la nature, ton énergie est incroyable et me motive chaque jours.

A mes grands parents défunts, Gisèle et Constant : vous avez largement participé à mon éducation, mon seul regret restera votre absence. Je ne vous oublie pas.

A tous et toutes les infirmier (es) et aides soignant (es) avec qui j'ai pu travailler ainsi que les secrétaires. Je ne nommerai personne de peur d'en oublier ! Vous avez largement participé à ma formation médicale. Merci de votre soutien et votre aide dans les moments difficiles. J'espère ne pas avoir été trop pénible.

A José, Bernard et Etienne du laboratoire d'anatomie alias « les nettoyeurs ». Merci de votre aide dans ce travail, votre bonne humeur. Travailler avec vous a vraiment été un plaisir.

Liste des Abréviations

AV : Artère vertébrale
CV : Corps vertébral
DLE : Drain Lombaire Externe
DM : Dure Mère
DIV : Disque intervertébral
DVE : Drain Ventriculaire Externe
ESA : Espaces sous Arachnoïdiens
FIV : Foramen Intervertébral
LCS : Liquide cérébro-spinal
LLA : Ligament Longitudinal Antérieur
LLP : Ligament Longitudinal Postérieur
ME : Moelle Epinière
PL : Ponction Lombaire
SNA : Système Nerveux Autonome
SNC : Système Nerveux Central
SNP : Système Nerveux Périphérique

INTRODUCTION	10
RAPPELS EMBRYOLOGIQUES	11
1 DEVELOPPEMENT DE L'AXE VERTEBRAL	11
A PARTIR DU 13 ^{ME} JOUR	11
A PARTIR DU 15 ^{EME} JOUR.....	11
FORMATION DE LA CHORDE	12
➤ <i>La plaque chordale</i>	12
➤ <i>La chorde</i>	12
FORMATION DES SOMITES (3 ^{EME} SEMAINE)	13
VERTEBRE CARTILAGINEUSE	15
OSSIFICATION PRIMAIRE DES VERTEBRES (4-5 ^{EME} MOIS)	15
OSSIFICATION SECONDAIRE (NAISSANCE – PUBERTE).....	15
2 DEVELOPPEMENT DE LA MOELLE EPINIÈRE	16
3 DEVELOPPEMENT DES RACINES NERVEUSES	18
LE GANGLION SPINAL.....	19
LA RACINE DORSALE	19
LA RACINE VENTRALE.....	19
LES CELLULES DE SCHWANN.....	20
4 DEVELOPPEMENT DES MENINGES SPINALES ET DES VILLOSITES ARACHNOÏDIENNES	20
LES LEPTOMENINGES	20
➤ <i>La pie-mère</i>	20
➤ <i>L'arachnoïde</i>	21
LA PACHYMENINGE.....	21
➤ <i>La dure-mère</i>	21
LES VILLOSITES ARACHNOÏDIENNES.....	22
RAPPELS ANATOMIQUES	24
1 LE FORAMEN INTERVERTEBRAL	24
A L'ETAGE CERVICAL HAUT (C0-C2).....	24
A L'ETAGE CERVICAL BAS (C3-C7)	25
<i>Son orientation :</i>	25
<i>Dimensions et contenu:</i>	26
A L'ETAGE THORACIQUE	26
<i>Orientation</i>	26
<i>Limites</i>	27
<i>Dimensions</i>	27
A L'ETAGE LOMBAIRE.....	28
<i>Limites</i>	28
<i>Orientation</i>	28
<i>Dimensions</i>	29
2 LE SYSTEME LIGAMENTAIRE	30
LE RACHIS CERVICAL HAUT.....	30
LE RACHIS CERVICAL INFÉRIEUR.....	31
➤ <i>Ligaments radiés</i>	31
➤ <i>Ligaments trans-foraminaux</i>	31
A L'ETAGE THORACIQUE	32
➤ <i>Les ligaments trans-foraminaux</i>	32
➤ <i>Les ligaments intra-foraminaux</i>	33
➤ <i>Les ligaments extra-foraminaux</i>	33

A L'ETAGE LOMBAIRE.....	33
➤ <i>Les ligaments trans-foraminaux</i>	34
➤ <i>Les ligaments extra-foraminaux</i>	34
➤ <i>Le ligament jaune (LJ)</i>	35
3 RAPPORTS VASCULO-NERVEUX	36
A L'ETAGE CERVICAL	36
▪ <i>Le Système artériel</i>	36
• Les branches foraminales	36
▪ <i>Système veineux</i>	37
• Système veineux intradural	38
• Système veineux péri-rachidien	38
A L'ETAGE THORACIQUE	38
▪ <i>Système artériel</i>	38
▪ <i>Système veineux</i>	39
• Extra-rachidien	39
• Intra-rachidien extra-dural	39
• Intra-dural	40
A L'ETAGE LOMBAIRE.....	41
▪ <i>Système Artériel</i>	41
▪ <i>Système veineux</i>	42
• Les plexus veineux	42
• Les veines foraminales	43
4 LES PLANS MUSCULAIRES.....	43
A L'ETAGE CERVICAL	43
A L'ETAGE THORACIQUE	44
A L'ETAGE LOMBAIRE.....	45
5 LES NERFS SPINAUX	47
LES RACINES LOMBAIRES.....	48
▪ <i>Rapports avec le disque intervertébral</i>	49
▪ <i>Rapports avec le ganglion spinal</i>	49
▪ <i>Angles de raccords mésentériques</i>	50
6 LES MENINGES SPINALES	50
LA PACHYMENINGE	51
LES LEPTOMENINGES.....	53
➤ <i>L'arachnoïde</i>	53
➤ <i>La pie-mère</i>	53
ETUDE ANATOMIQUE CADAVERIQUE DES NERFS SPINAUX.....	55
1 MATERIEL ET METHODES.....	55
MATERIEL	55
1- <i>Etude Anatomique</i>	55
2- <i>Etude radio-anatomique</i>	56
3- <i>Etude Histologique</i>	56
METHODES.....	56
1- <i>Etude anatomique</i>	56
2- <i>Etude Histologique</i>	58
3- <i>Etude Radiologique</i>	59
<i>Myélo-scanner</i>	59
<i>Myélo-IRM</i>	60
2 RESULTATS.....	61
1- <i>Etude Anatomique</i>	61
LES RACINES SPINALES.....	61

<i>A l'étage cervical</i>	61
<i>A l'Étage Thoracique</i>	62
<i>A l'étage Lombar</i>	64
CARACTERISTIQUES DES MENINGES	65
<i>Dure-mère</i>	65
<i>L'arachnoïde</i>	66
2- <i>Etude histologique</i>	68
3- <i>Radiologiques</i>	70
DISCUSSION	72
CONCLUSION	82
BIBLIOGRAPHIE	84

INTRODUCTION

Les tumeurs des nerfs spinaux à extension foraminale et/ou extra-foraminale sont dans la majorité des cas des schwannomes (ou neurinomes) et représentent environ 30% des tumeurs primitives intra-rachidiennes. Ces tumeurs bénignes, se manifestant par des douleurs et/ou des signes neurologiques, posent surtout des problèmes chirurgicaux en fonction de leurs extensions.

Il est rapporté dans la littérature jusqu'à 14% de fuite du liquide cérébro-spinal (LCS) en post opératoire. Il s'agit de fuite de LCS par la cicatrice ou la formation d'une méningocèle ou l'apparition d'hypotension intra-crânienne persistante.

Cette complication augmente la morbidité péri-opératoire : reprise(s) chirurgicale(s), risques infectieux (méningite), retard de cicatrisation, complications de décubitus prolongé, d'allongement de la durée d'hospitalisation, et pose le problème de sa prise en charge.

Le but de ce travail est de préciser les rapports des nerfs spinaux avec les structures et espaces méningés au niveau des foramina intervertébraux des trois étages cervical, thoracique et lombaire de la colonne vertébrale, sur la base d'une étude anatomique réalisée sur cadavres.

En fonction de nos résultats et d'une étude de la littérature nous proposerons les solutions possibles pour prévenir ces fuites de LCS ou les prendre en charge en post-opératoire

RAPPELS EMBRYOLOGIQUES

1 Développement de l'axe vertébral

La colonne vertébrale, protégeant le système nerveux central (SNC), est mobile, avec des particularités morphologiques liées à l'acquisition de la station érigée et à un contrôle neurologique (notamment par des informations proprioceptives) pour le maintien de la posture. L'axe vertébral va se développer progressivement chez l'embryon jusqu'à l'âge adulte.

A partir du 13^{me} jour

A ce stade l'embryon est dit di-blastique : l'œuf primitif n'est composé que de 2 feuillets embryonnaires que sont l'épiblaste (feuillelet supérieur), en contact avec le liquide amniotique, et l'hypoblaste (feuillelet inférieur).

Les cellules de l'épiblaste vont migrer médialement selon un axe cranio-caudal pour former la ligne primitive puis le sillon primitif et enfin la gouttière primitive par invagination.

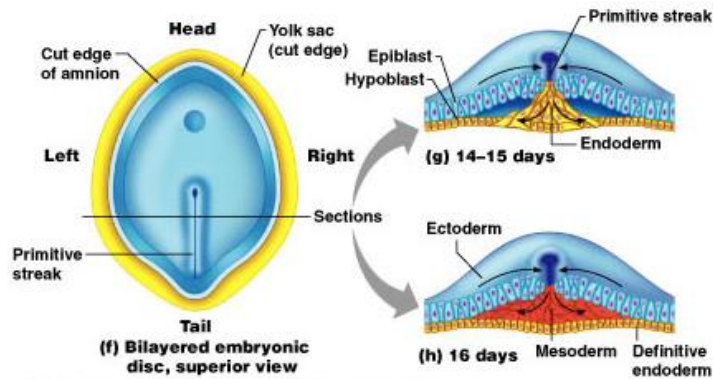
Ceci va définir les différents axes embryonnaires (rostro-caudal ; médio-latéral).

A partir du 15^{ème} jour

Progressivement, l'invagination des cellules épiblastiques de l'embryon va former 3 couches successives : l'ectoblaste – le mésoblaste et l'endoblaste lors du processus de gastrulation. L'embryon devient tri-dermique. En partie crâniale, l'accolement ectoblaste – endoderme est appelé membrane oro-pharyngée et en partie caudale, membrane cloacale (Figure 1).

Les cellules épiblastiques vont migrer du nœud de Hansen vers la membrane bucco-pharyngée. Elles forment la plaque pro-chordale avec une différenciation épithélio-mésenchymateuse.

Le canal chordal sera lui formé par l'invagination en doigt de gant des cellules épiblastiques qui restent épithéliales.



Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

Figure 1. Processus de gastrulation ou passage d'un embryon di-dermique à un embryon tri-dermique. La ligne primitive d'origine épiblastique forme l'axe embryonnaire. Les 3 couches vont se mettre en place par invagination de l'épiblaste au niveau de la ligne primitive.

Formation de la chorde

➤ La plaque chordale

Quand le canal chordal arrive au niveau de la plaque pro-chordale, il est composé d'un plancher (zone d'accolement à l'entoblaste). Ce dernier va dégénérer et permettre une communication directe entre la cavité amniotique et le sac vitellin par l'intermédiaire du canal neurentérique. C'est la formation de la plaque chordale.

➤ La chorde

Cette plaque va se détacher de l'endoblaste vers le 22^{ème} jour. Elle va former une entité, un cordon : la notochorde.

Le canal neurentérique va progressivement régresser.

Au pourtour du processus chordal, les cellules mésenchymateuses vont former le mésoblaste para axial par accumulation cellulaire.

Ce dernier va se condenser en structures particulières : les somitomères. Cette somitogénèse se fait dans le sens cranio caudal.

La notochorde va induire la formation de la plaque neurale (Figure 2).

Autour de la notochorde vont s'accumuler des groupes de cellules mésoblastiques paires et symétriques de manière métamérique. On parle de groupes de somites. La notochorde joue donc un rôle inducteur dans la formation du rachis.

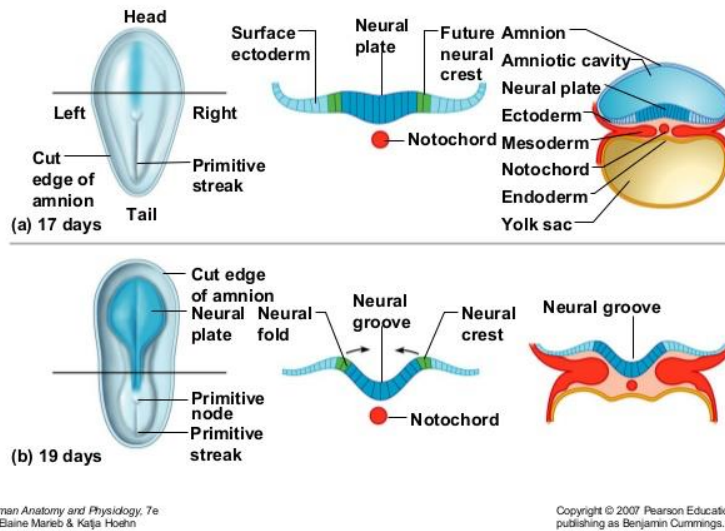


Figure 2. Formation de la plaque neurale puis du tube neural sous l'impulsion de la notochorde

Formation des somites (3^{ème} semaine)

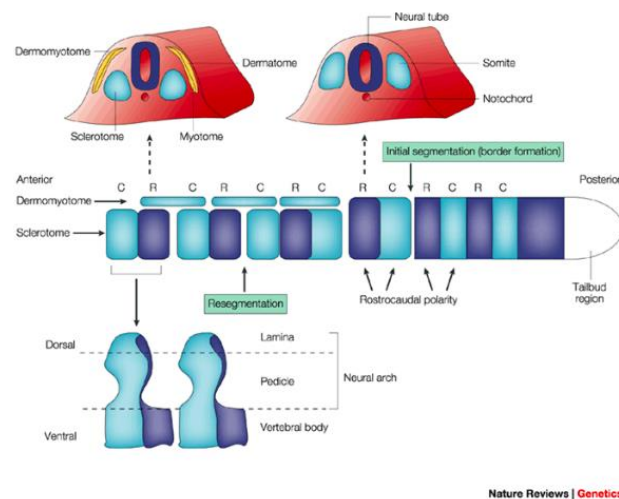
Les somitomères vont progressivement exprimer des molécules d'adhérence. Les premiers somitomères ne vont pas se différencier, seuls les suivants vont évoluer en somites en s'épithélialisant petit à petit.

Ils participent à la segmentation de l'individu : les 4 premiers vont former l'os occipital puis les 8 suivants les cervicales, les 12 thoraciques puis les 5 lombaires et les derniers les pièces sacro coccygiennes. Soit au total 37 à 38 paires de somites.

Les cellules des somites vont s'individualiser dans le sens ventro-dorsal pour former :

- le sclérotome : tissu conjonctif à différenciation (fibroblaste, chondroblaste et ostéoblaste) et migration vers le tube neural. Le reste du somite va former :
- le dermatome formé de fibroblastes (tissu sous cutané)
- le myotome formé de myoblastes

Chez l'Homme le rachis est segmenté mais cette segmentation est différente de la segmentation des somites. La théorie de la re-segmentation de Remack (1855) selon laquelle chaque somite est divisé en 2 parties : rostrale et caudale et la théorie selon laquelle l'association du somite caudal avec le somite rostral de la vertèbre sous jacente est à l'origine de la vertèbre définitive restent d'actualité (Figure 3).



Nature Reviews | Genetics

Figure 3 : Schéma de la re-segmentation après différenciation des somites ventraux en sclérotomes. Chaque hémisclérotome caudal va s'associer avec un hémisclérotome rostral sous-jacent pour former la vertèbre définitive. Tiré de « The making of the somite: molecular events in vertebrate » Yumiko Saga and al. Nature Review (2001) (1)

On obtient donc un bloc cartilagineux inter-segmentaire à cheval sur 2 métamères.

Les dermatomes et myotomes ainsi que les ébauches des nerfs spinaux vont garder leur formation métamérique. De ce fait ils seront situés au même niveau que le disque intervertébral (Figure 4).

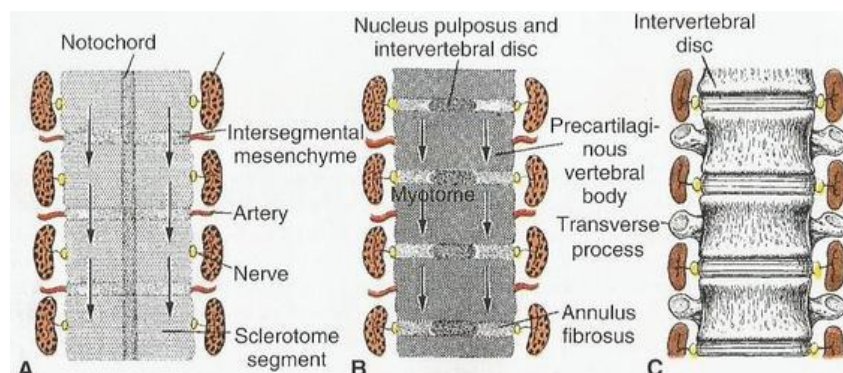


Figure 4. Re-segmentation selon Sadler (« The formation of the vertebral column-2012 »). Les artères corporelles sont situées au niveau du disque intervertébral au début (A) et les nerfs au niveau des corps vertébraux. La re-segmentation (B) est responsable de la réorganisation des racines spinales situées au niveau du disque inter vertébral.

Vertèbre cartilagineuse

A partir du 2^{ème} mois, l'ébauche cartilagineuse se met en place. La corde a régressé sauf au niveau de la partie centrale du disque intervertébral où elle devient nucléus pulposus. Les éléments du sclérotome forment la vertèbre cartilagineuse.

Ossification Primaire des vertèbres (4-5^{ème} mois)

La croissance se fera progressivement à partir de 3 noyaux d'ossification primaires : un au niveau du corps vertébral (croissance en hauteur du corps vertébral) et 2 au niveau de l'arc dorsal (croissance dans le sens ventro-dorsal de l'arc dorsal). Ces noyaux sont séparés par des synchondroses. Ces dernières vont se fermer dans les 2 premières années de vie pour les hémis- arcs dorsaux et vers 5-6 ans pour les synchondroses séparant l'arc neural du corps vertébral.

Ossification secondaire (Naissance – Puberté)

Les points d'ossification secondaire (environ 5) apparaissent vers 8-10 ans : au niveau du listel marginal supérieur et inférieur qui vont se fusionner vers l'âge de 20 ans ; au niveau des processus transverses, des épineuses et des processus articulaires (Figure 5).

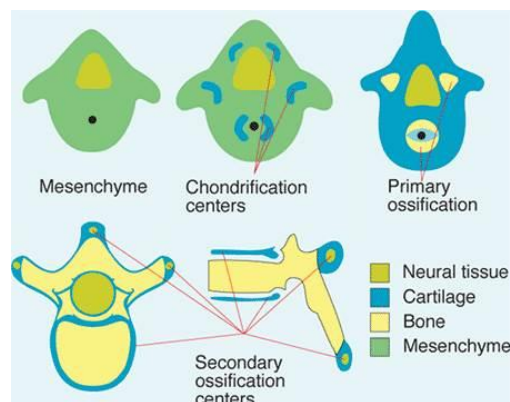


Figure 5. Croissance vertébrale selon Moore (1988). Selon des points d'ossification primaire (x3) puis secondaire (x4 à 5).

2 Développement de la moelle épinière

Le premier élément de formation du SN apparaît au 19^{ème} jour avec la formation de la plaque neurale sous l'influence de la notochorde (2). Cette dernière est un épaissement médio sagittal de l'ectoblaste (50%) sous l'action inductrice du mésoblaste axial (cf. supra).

A partir de la 3^{ème} semaine de développement embryonnaire la plaque neurale se modifie avec surélévation de ses bords formant d'abord la gouttière neurale puis progressivement un véritable tube neural au 25^{ème} jour par rapprochement des bords (Figure 6).

Ce tube neural est composé primitivement de 2 couches cellulaires : une centrale ou neuro-épithélium qui borde la lumière du tube et une couche périphérique ou zone marginale qui est au contact des méninges. Au moment de la fermeture de la gouttière neurale, des amas cellulaires vont se détacher des lèvres latérales pour former les cellules des crêtes neurales.

Ces cellules vont subir une importante différenciation et former : le SNP, le SNA (neurones ganglionnaires, cellules en T et cellules gliales) et du fait de leur capacité de migration, les cellules mélanocytaires, thyroïdiennes (cellules à calcitonine) et surrénaliennes (cellules médullaires).

Le tube neural possède donc 2 orifices à ses extrémités qui vont se fermer au cours du développement :

- Le Neuropore rostral dont la fermeture a lieu vers le 29^{ème} jour
- Le Neuropore caudal se ferme plus tard vers le 30^{ème} jour

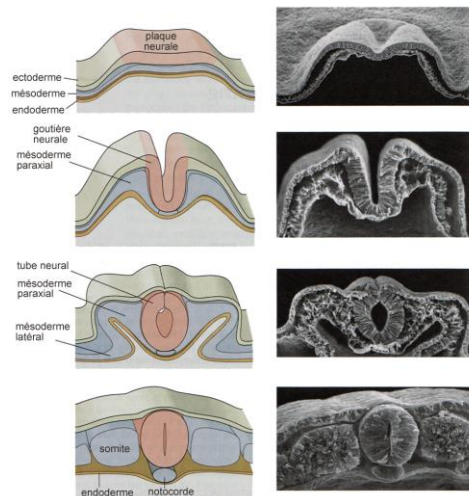


Figure 6 Résumé du développement du tube neural et des crêtes neurales. Les somites (S) dérivent du mésoderme et vont former le futur rachis.

C'est à partir de la **4^{ème} semaine** que vont se former les différentes vésicules par dilatation de ce tube neural, au niveau céphalique. Ces dilatations seront à l'origine du développement de l'encéphale et du tronc cérébral. La partie caudale de ce tube neural va rester tubulée pour former la moelle épinière et à partir de la 4^{ème} semaine, les premières cellules à l'origine des ganglions spinaux vont se différencier des crêtes neurales.

Le développement de la ME résulte de la maturation de la partie caudale du tube neural à partir de la 4^{ème} semaine de développement. Elle est segmentée d'un point de vue fonctionnel avec pour chaque segment médullaire une racine dorsale sensitive avec le ganglion spinal, ainsi qu'une racine ventrale motrice. Chacune de ces racines reçoit les afférences sensibles, ou assure la motricité d'un territoire périphérique précis (métamérisation).

D'un point de vue de son embryogenèse (3): le tube neural va subir des modifications structurelles avec un épaississement ventral et dorsal séparés par le sulcus limitans. L'épaississement ventral va être à l'origine du développement des lames fondamentales (pour la motricité), le développement dorsal sera à l'origine des lames alaires (pour la sensibilité).

A partir du **2^{ème} mois**, la moelle épinière s'étend du foramen magnum au sacrum (S1), chaque paire de nerfs spinaux (31 paires) est formée et quitte le foramen vertébral par les FIV.

A partir du **4^{ème} mois**, on observe une croissance différentielle entre le rachis, la moelle épinière et la dure-mère. En effet l'augmentation de croissance du rachis et de la dure mère,

supérieure à celle de la moelle épinière, explique l'ascension de cette dernière avec amarrage sacré via une expansion caudale de pie-mère - le filum terminal (S2) - et l'apparition d'une obliquité croissante des racines spinales. Ceci explique la longueur des racines lombo sacrées qui forment la queue de cheval et leurs angles de raccordement médullaire.

Ainsi à **la naissance** le cône terminal se projette en L3 et va progressivement être ascensionné au niveau du disque L1-L2 à l'âge adulte (4).

L'arachnoïde et la dure-mère forment le cul-de-sac dural qui s'étend jusqu'au sacrum alors que la pie-mère se prolonge via le filum terminal.

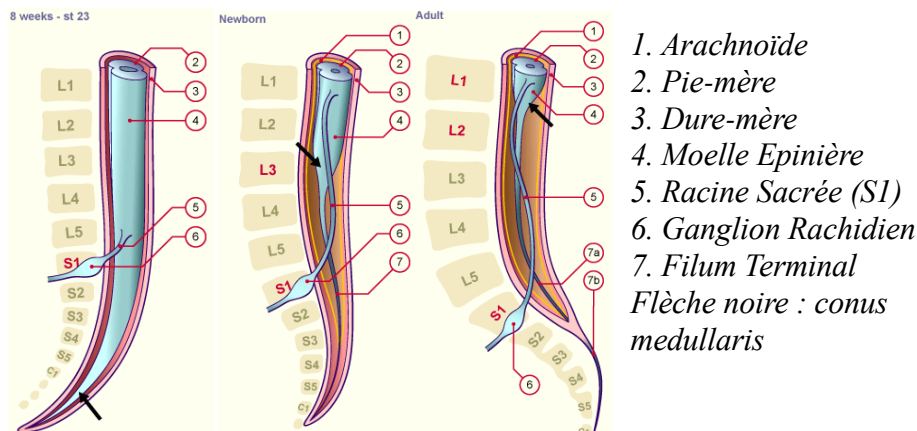


Figure 7. Schéma de l'évolution de la position de la Moelle épinière et des racines lombo-sacrées au cours du développement A gauche : 8s-23s, milieu : naissance, à droite : adulte, avec le phénomène d'ascension du cône médullaire par différentiel de croissance. Schémas tirés de « embryology.ch ».

3 Développement des racines nerveuses

Les racines nerveuses sont au nombre de 31 paires, bilatérales et symétriques. Elles se composent d'une racine ventrale motrice et d'une racine dorsale sensitive portant le ganglion spinal. L'organisation est dite métamérique : un segment médullaire correspondant à un somite va être responsable d'un dermatome (territoire cutané spécifique) et d'un myotome (groupe musculaire spécifique). Le développement des différents territoires périphériques permet la formation de ces racines.

Le ganglion spinal

Les ganglions spinaux dérivent des crêtes neurales entre la 4^{ème} semaine et le 2^{ème} mois de développement. Situés sur la racine sensitive dorsale, ils sont entourés d'une capsule dense fibreuse qui émet des septa délimitant des lobules. Ils sont composés de cellules unipolaires dites en « T ». Ces cellules en T sont multipolaires à leur origine puis deviennent bipolaires.

La racine dorsale

Formée par le prolongement centripète des cellules en T qui vont pour partie se connecter avec les corps des neurones des lames alaires via leurs dendrites. Les fibres vont former : les faisceaux néo-spino-thalamiques et paléo-réticulo-spino-thalamique qui décussent à chaque segment médullaire pour la sensibilité thermo-algique, le faisceau cordonal dorsal pour la sensibilité épicrotique (tact et proprioception) qui reste homolatéral.

La racine ventrale

Il s'agit d'un regroupement d'axones de neurones de la corne ventrale (ancienne lame fondamentale) qui ont traversé la zone marginale au niveau de chaque myélomère. Les neuroblastes (initialement bipolaires) vont se différencier en neurones par bourgeonnement d'une portion axonale et de dendrites (multipolaires) à la fin du 2^{ème} mois. Ces axones rejoignent les axones des cellules en T au niveau post-ganglionnaire pour former la racine spinale émergente dans le FIV.

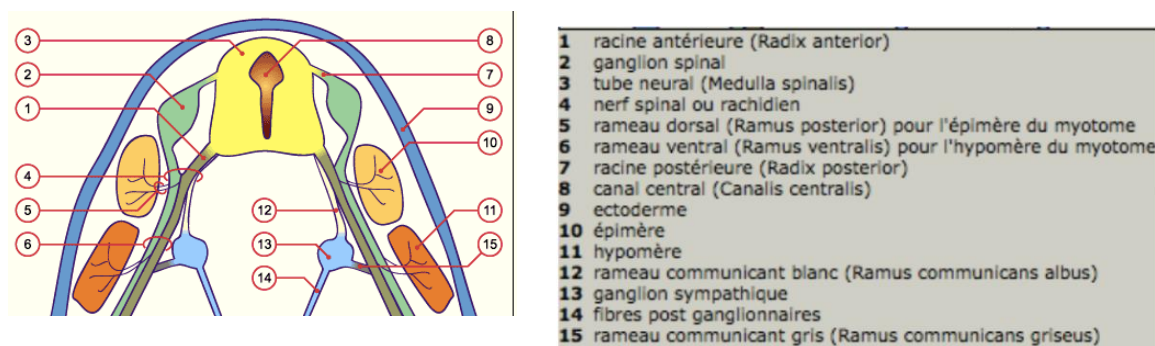


Figure 8 : Coupe d'embryon d'environ 1 mois – Mise en place des éléments du SNC et du SNP (d'après <http://www.embryology.ch/francais/vcns/moelle01.html>)

Les cellules de Schwann

Elles forment la gaine de myéline isolante des axones des motoneurones périphériques et des cellules en « T ». Elles sont séparées par les nœuds de Ranvier responsables de la conduction saltatoire (A.Huxley et Hodgkin).

Ces cellules dérivent des crêtes neurales d'un point de vue embryologique.

Leur multiplication pathologique est à l'origine de tumeurs bénignes de la gaine des nerfs : les schwannomes (ou anciennement neurinomes).

4 Développement des Méninges spinales et des villosités arachnoïdiennes

Les méninges vont se développer autour du tube neural à partir d'une seule membrane dense la « meninx primitiva » (5).

Les Leptoméninges

➤ *La pie-mère*

C'est la couche la plus étendue et la plus adhérente au système nerveux.

Elle est avasculaire mais elle porte les vaisseaux. Elle dérive de la couche interne de la meninx primitiva, donc de l'ectomésenchyme (6,7). Elle se différencie au **57^{ème} jour IU** ((8)).

Au niveau médullaire elle émet des prolongements latéraux ou ligaments dentelés qui traversent l'arachnoïde pour amarrer la moelle épinière à la dure-mère. A son niveau le plus caudal elle va former le filum terminal qui amarre la moelle épinière au sacrum par sa terminaison en regard de S2.

On décrit volontiers 2 couches à cette méninge : une profonde intime (intima Pia), réticulaire qui forme les espaces de Virchow-Robin et une plus superficielle qui entoure les vaisseaux et les nerfs spinaux.

➤ *L'arachnoïde*

C'est la couche intermédiaire, avasculaire qui va délimiter l'espace sous arachnoïdien contenant le LCS et les vaisseaux nourriciers. Elle dérive de la couche interne de la méninx primitiva comme la pie-mère. Au niveau spinal elle est particulière car l'espace la séparant de la dure-mère est plus réduit.

Elle est formée par 2 feuillets : externe cellulaire dense avec des cellules reliées par des desmosomes ; interne trabéculaire formant un espace réticulé. L'espace sous arachnoïdien apparaît donc comme trabéculé avec des septa surtout dans la région cervicale basse et au niveau du cul-de-sac lombaire (9).

La Pachyméninge

➤ *La dure-mère*

C'est la première enveloppe à se développer (autour du **44^{ème} jour IU**) au niveau ventral de la moelle épinière avec une extension dorsale vers le 52^{ème} jour. Des études histologiques sur embryons humains en rapprocheraient l'origine au mésoderme para axial (7). Elle se forme à partir de la couche externe de la méninx primitiva.

Elle est formée de 3 couches composées de fibroblastes, collagène et fibres élastiques (10).

Elle est séparée du périoste osseux par l'espace épidual graisseux au niveau du foramen vertébral alors qu'à l'étage crânien l'espace épidual est inexistant. A l'étage spinal cet espace contient beaucoup de plexus veineux expliquant la fréquence des hématomes épiduraux chez les patients sous anticoagulants (11). C'est la couche la plus externe qui se poursuit au niveau des FIV jusqu'au ganglion spinal.

Après le cône médullaire en L1-L2 elle forme le cul-de-sac dural contenant l'ensemble des racines à destinée des membres inférieurs et du périnée.

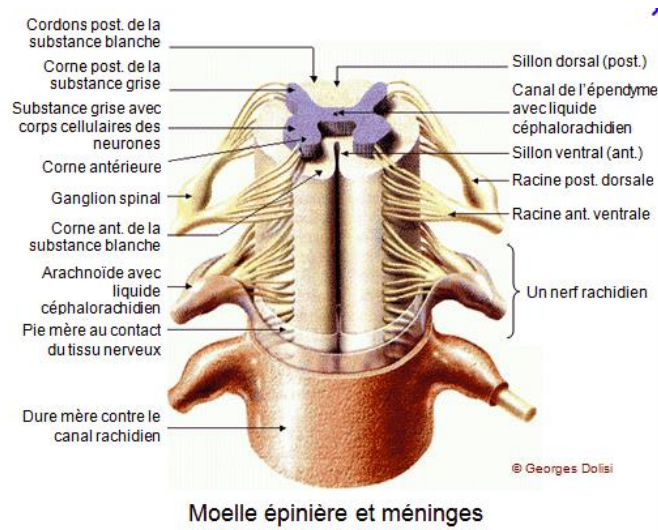


Figure 9: Formation anatomique de la moelle épinière et de ses différentes enveloppes (DM – arachnoïde – Pie mère)

Les villosités arachnoïdiennes

Principale structure de drainage du LCS, ce sont des expansions arachnoïdiennes au travers de l'enveloppe dure-mérienne en contact avec le système veineux de drainage (Figure 10). Elles sont présentes au niveau encéphalique mais aussi au niveau spinal, particulièrement au niveau des nerfs spinaux.

Au niveau encéphalique, leur développement commence à la **26^{ème} semaine intra-utérine** par dilatation de l'abouchement de certaines veines cérébrales dans les sinus endocrâniens.

A partir de la **35^{ème} semaine**, un stroma arachnoïdien va faire irruption au travers d'un defect de dure mère et débute la formation des futures villosités qui formeront des structures multilobulées caractéristiques à partir de la **39-40^{ème} semaine** (5).

La maturation du système villositaire se fait tardivement vers le 12^{ème} - 18^{ème} mois post natal. Avant, il est supposé que la résorption du LCS se fait via l'adventice des vaisseaux dans les espaces péri-vasculaires de Virchow-Robin et dans l'espace péri-neural des nerfs crâniens.

Au niveau spinal, des villosités arachnoïdiennes sont surtout décrites au niveau des racines lombaires et thoraciques et principalement au niveau de leur face dorsale. Leur rôle et leur développement sont encore mal connus (12).

Au niveau spinal, l'une des hypothèses est que l'espace épidual graisseux joue un rôle dans la résorption du LCS à la naissance jusqu'à la maturation villositaire.

Au niveau des racines spinales on décrit 3 types de granulations (13) en fonction de leur morphologie et de leur relation avec la dure-mère : complètement intra-durale au niveau de la racine nerveuse, complètement trans-durale avec une extension dans l'espace épidural, et enfin celles qui traversent la dure mère pour pénétrer dans les vaisseaux épiduraux.

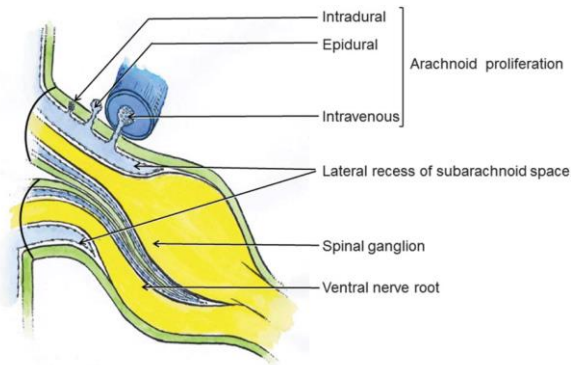


Figure 10. Représentation des 3 types de granulations arachnoïdiennes au niveau de la racine dorsale en fonction de la morphologie et relation à la DM. D'après SAKKA (2015)(5)

RAPPELS ANATOMIQUES

1 Le Foramen intervertébral

Véritables voies de passage paires et symétriques pour les nerfs spinaux entre le foramen vertébral et les régions extra-vertébrales, les foramina intervertébraux possèdent une anatomie particulière qui leur permet un rôle de voie de passage et un rôle de protection du nerf spinal lors des mouvements de la colonne vertébrale dans tous les plans.

D'un point de vue anatomique, le foramen intervertébral est le seul foramen de l'organisme limité par des structures mobiles avec dans sa partie ventrale, l'espace discal intervertébral et dans sa partie dorsale, les processus articulaires.

Il comprend aussi les différents éléments vasculaires artériels à destinée radiculaire ou médullaire, les éléments veineux de drainage disco-corporéaux, radiculaires et médullaires ainsi que les villosités arachnoïdiennes de rapport très étroit avec les veines radiculaires assurant le drainage spinal du LCS.

Il forme un espace cloisonné par de multiples ligaments qui sont soit foraminaux soit extra-foraminaux. Il existe des particularités anatomiques en fonction des différents étages anatomiques étudiés : cervical, thoracique ou lombaire.

A l'étage cervical haut (C0-C2)

L'atlas ne possède pas de pédicules à proprement parler et la première racine nerveuse (C1) émerge du foramen vertébral par une gouttière située en arrière des masses latérales à la face dorsale de l'artère vertébrale dans sa portion V3 pré-durale. La racine se situe dans le plan horizontal.

Le foramen intervertébral est donc limité *en avant* par l'articulation C0-C1, *en dedans* par le foramen vertébral, en partie *supérieure* par la partie inféro-latérale de l'os occipital, en partie

inférieure par la lame de la vertèbre C1 qui est recouverte dans sa partie supéro-médiale par la membrane occipito-atloïdienne qui remplace le ligament jaune absent à cet étage.

L'orientation est volontiers oblique en arrière et en dehors avec un enroulement à concavité antérieure.

La racine est horizontale à ce niveau.

A l'étage cervical bas (C3-C7)

Les éléments se modifient avec apparition d'un vrai disque intervertébral et modification des surfaces articulaires postérieures dans leur morphologie et leur orientation.

On distingue 3 espaces:

- Médial : entre l'orifice de sortie de la racine spinale et le bord médial du foramen intervertébral. A ce niveau la racine nerveuse est protégée en arrière par le ligament jaune.
- Intermédiaire : le foramen a proprement parler, avec le pédicule en partie supérieure, l'uncus du corps vertébral et le disque intervertébral en avant, le complexe articulaire zygapophysaire en partie postérieure et surtout l'extrémité supérieure du processus articulaire supérieur de la vertèbre sous jacente.
- Latéral : ou canal de sortie de la racine spinale dans une gouttière le long du processus transverse ; elle chemine dans l'espace inter-transversaire.

Son orientation :

Le FIV cervical est orienté dans le plan sagittal de 45° en direction ventrale et latérale ce qui ne le rend visible en radiologie conventionnelle que sur des radiographies réalisées dans son axe en trois-quart.

Dimensions et contenu:

On définit 2 parties :

- Supérieure : du bord postéro inférieur du corps vertébral de la vertèbre sus-jacente au bord antéro-inférieur du massif articulaire inférieur. C'est la partie la plus large contenant le nerf spinal ainsi que les différents éléments vasculaires.
- Inférieure : du bord postérieur de la partie supérieure du corps de la vertèbre sous-jacente à la partie antérieure de l'articulaire inférieure de la vertèbre sus-jacente. Cette partie contient de la graisse ainsi que des plexus veineux.

De forme ovoïde, sa hauteur moyenne est de 11,08mm +/- 1,88mm, sa largeur de 5,69mm +/- 1,91mm avec une aire de 5,61 +/- 1,83 mm² (14). Il est donc environ 2 fois plus haut que large. Le plus petit foramen est à l'étage C2-C3 et le plus large à l'étage C7-T1.

Ses dimensions sont variables en fonction des mouvements car le FIV est composé d'éléments du segment mobile rachidien de JUNGHANN'S. Ainsi en flexion de 30° il s'élargit d'environ 13% et en extension de 30° il se rétrécit d'environ 11% (15).

On définit volontiers un canal d'environ 20mm de longueur.

A l'étage Thoracique

Le diamètre du foramen vertébral est réduit en taille (environ 10mm) ; il présente une forme arrondie en rapport avec la sagittalisation des pédicules vertébraux qui sont plus hauts que larges à ce niveau, plus longs et plus solides.

D'un point de vue biomécanique, il s'agit d'un étage particulier car limité par deux jonctions mobiles (cervico-thoracique et thoraco-lombaire), alors qu'il est lui même solidement fixé au thorax par les articulations costo-vertébrales.

Orientation

Ici le FIV apparaît plutôt dans le plan sagittal du fait des limites pédiculaires sus et sous-jacentes, plus sagittales. Ainsi à la différence du rachis cervical, le FIV est bien visible sur une simple radiographie de profil strict.

Limites

En postérieur par les complexes articulaires zygapophysaires qui sont orientés dans le plan coronal, de T1 à T11, limitant les mouvements antéro-postérieurs en flexion. En T11-12 ils redeviennent sagittaux comme en lombaire.

En antérieur par le disque intervertébral dont la hauteur est à ce niveau plus petite qu'en cervical ou en lombaire.

Il existe d'autres particularités de ce segment rachidien : de T1 à T10, les côtes les plus proches (ex : T6 pour le foramen T5-T6) participent aux limites du FIV ce qui n'est plus le cas en T11 et T12 où à ces niveaux les côtes flottantes ne sont plus associées aux foramens.

L'articulation costo-vertébrale, sa capsule et ses ligaments associés participent aux limites **antéro-inférieures** du FIV de T1 à T10. Ainsi la pathologie dégénérative costo-vertébrale peut retentir sur la taille du FIV.

Dans sa partie **médiane** il est limité par le foramen vertébral.

Dans sa partie **supérieure** par le pédicule de la vertèbre sus-jacente, dans sa partie **inférieure** par le pédicule de la vertèbre sous-jacente.

En thoracique, les pédicules vertébraux se projettent postérieurement depuis la partie supérieure du corps vertébral, dans un plan sagittal.

Dimensions

Les dimensions du FIV ne sont pas constantes sur l'ensemble du rachis thoracique (16) ainsi :

- le diamètre antéro-postérieur supérieur contenant la racine va progressivement augmenter de T1 à T12 (10.7mm à 13mm environ). Il est plus grand qu'au niveau cervical
- le diamètre antéro-postérieur inférieur va lui aussi augmenter de 6.5mm à 8.6mm environ.

La racine spinale n'occupe qu'environ 1/12^{ème} de l'espace du FIV, elle est donc moins sujette à compression par protrusion/hernie discale, également moins fréquente à ce niveau, du fait de la moindre mobilité du rachis qui est articulé avec la cage thoracique.

A l'étage Lombaire

Le rachis lombaire assure environ 50% des mouvements de flexion-extension entre L4 et S1.

A ce niveau ce sont les racines de la queue de cheval qui pénètrent le FIV du fait de la terminaison de la moelle épinière en L1-L2 dans la majorité des cas (T11-L3) (4).

Les racines spinales seront donc plus verticales avec un angle de raccordement plus aigu par rapport aux éléments centraux. Cet angle d'inclinaison diminue de L1-L2 à L5-S1 (17).

Les moyens de fixation sont nombreux dans le FIV afin d'assurer une protection des racines lors des mouvements du rachis lombaire.

Limites

En partie ***supérieure*** par le bord inférieur du pédicule de la vertèbre sus-jacente.

En ***antérieur*** par la partie postéro-inférieure du corps vertébral de la vertèbre sus-jacente et la partie postéro-supérieure de la vertèbre sous-jacente avec le disque intervertébral.

En ***postérieur*** par l'articulation zygapophysaire (processus articulaire inférieur de la vertèbre sus-jacente et processus articulaire de la vertèbre sous-jacente avec leurs moyens d'union ligamentaires et capsulaires).

En partie ***inférieure*** par le bord supérieur du pédicule de la vertèbre sous-jacente.

Orientation

Comme au niveau thoracique bas, le processus de sagittalisation des pédicules se poursuit au niveau lombaire. Le FIV apparaît de forme plus triangulaire dans la partie haute du rachis lombaire.

Dimensions

Pour certains auteurs (Stephen 1991), le foramen L1 apparait comme le plus petit et L5 comme le plus gros alors que d'autres comme Putti (1927), Torun (2006) et Ruhli (2006), le foramen L1 apparaît de plus grande dimension avec une diminution de taille progressive jusqu'en L5 (de 9mm à 6mm pour le diamètre sagittal inférieur et de 13mm à 10mm pour le diamètre sagittal supérieur).

Ces différences peuvent s'expliquer par les variations anatomiques liées aux populations étudiées ou dans la manière de mesurer la taille du foramen notamment dans les phénomènes dégénératifs avec atteinte discale ou arthrose zygapophysaire postérieure responsable d'un rétrécissement foraminal, parfois avec spondylolisthésis associé.

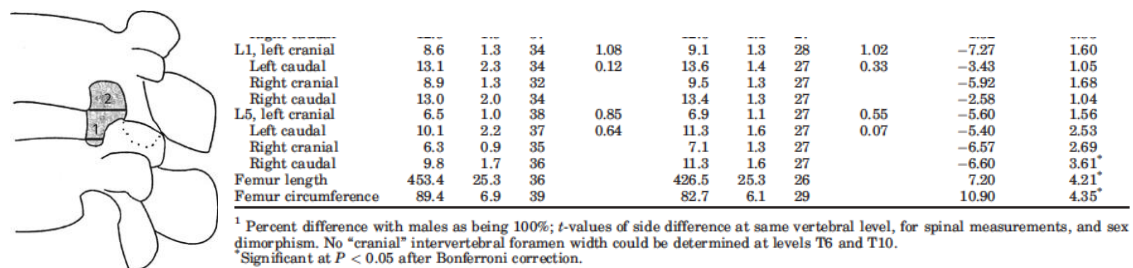


Figure 11. Modification des dimensions du FIV lombaire de L1 à L5 d'après Ruhli « Human Osseous Intervertebral Foramen Width » AMERICAN JOURNAL OF PHYSICAL ANTHROPOLOGY 129:177-188 (2006)(16)

Pour Cramer et al. (18), après étude de 95 sujets en IRM, la taille du foramen intervertébral lombaire est stable de L1 à L5 avec une moyenne de 10mm de diamètre antéro-postérieur supérieur. Il décrit des variations en fonction de la taille (avec une augmentation de la surface globale), de l'âge (diminution en hauteur et une augmentation du diamètre antéro-postérieur supérieur) et du poids.

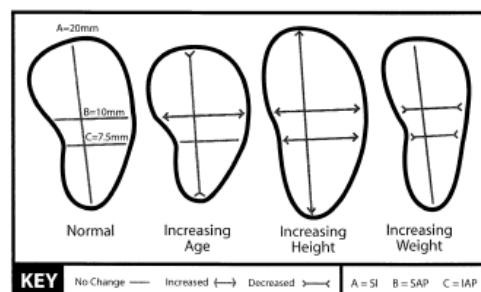


Fig 6. Illustration demonstrating changes in IVF dimensions with increasing age, height, and weight.

Figure 12. Modification de la taille du FIV lombaire en fonction des caractéristiques morphologiques des sujets étudiés d'après Gregory D. Cramer et al. « Dimensions of the lumbar intervertebral foramina as determined from the sagittal plane magnetic resonance imaging scans of 95 normal subjects » Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics, volume 26, Number 3, 2003.(18)

En fonction du mouvement, le foramen intervertébral augmente de taille en flexion du rachis lombaire (30% en antéro-postérieur, 14% en supéro-inférieur) (19,20)

En flexion, le disque intervertébral est projeté vers l'arrière mettant en tension les fibres postérieures de l'annulus fibrosus : on observe une augmentation de la distance inter-pédiculaire et une diminution de l'épaisseur du ligament jaune par mise en traction des fibres.

Lors de l'extension c'est l'inverse qui se produit, sauf en cas de lésion discale ou la variation de dimension est moindre.

2 Le système ligamentaire

Le rachis cervical haut

En antérieur : la dent est maintenue solidement en place au sein de l'articulation odonto-atloïdienne par le ligament apical, tendu de l'apex dentaire à la partie postérieure du clivus, et les ligaments alaires qui s'insèrent latéralement au précédent avec un trajet rostral oblique en haut et en dehors pour s'insérer sur les parties latérales du foramen magnum, en dessous des foramina condyliens (XII).

De plus, le ligament cruciforme est composé de fibres verticales recouvrant la dent, qui s'insèrent sur le clivus et qui se terminent en partie dorsale du corps de C2, et de fibres horizontales réalisant un véritable haubanage de la dent, la maintenant contre la facette articulaire de l'atlas, se terminant sur les parties médiales de l'arc antérieur de l'atlas. Ce dernier est recouvert par la membrana tectoria, qui s'insère sur la partie dorsale du clivus et qui devient ligament longitudinal commun postérieur rapidement.

En postérieur : la membrane occipito-atloïdienne, équivalente du ligament jaune - qui n'existe pas à ce niveau -, ferme le foramen vertébral par son insertion du pourtour postérieur du foramen magnum à la face ventrale de l'arc dorsal de l'atlas. Cette membrane est perforée de part et d'autre par l'artère vertébrale (portion V3) et le premier nerf spinal cervical en arrière.

Les articulations occipito-atloïdiennes sont renforcées en dehors par une expansion des fibres superficielles vers l'apophyse transverse tandis que les fibres profondes laissent un orifice de passage avec la capsule articulaire pour l'artère vertébrale et C1.

Le rachis cervical inférieur

Il existe 2 types de ligaments à ce niveau.

➤ *Ligaments radiés*

Ce sont les moins fréquents. Ils interviennent dans le maintien de la racine spinale au sein du foramen intervertébral (protection dans les mouvements du rachis cervical dans les 3 plans de l'espace).

Il en existe 4 types :

- Le supérieur s'insère sur le processus transverse de la vertèbre sus-jacente avec un trajet oblique en bas et en dehors pour s'insérer sur le périmère du nerf spinal.
- L'inférieur prend son insertion sur les tubercules antérieur et postérieur du processus transverse de la vertèbre sous-jacente, présente un trajet oblique en haut et en dehors pour s'insérer sur le périmère ; parfois l'insertion se fait au niveau du foramen transversaire.
- L'antérieur s'insère sur la capsule de l'articulation unco-vertébrale. Il est inconstant.
- Le postérieur s'insère au niveau de la capsule articulaire postérieure. Comme l'antérieur, son trajet est assez horizontal et en dehors.

➤ *Ligaments trans-foraminaux*

Ils forment parfois une membrane fibreuse. Ils s'insèrent le plus souvent au niveau de la partie supérieure du tubercule antérieur du processus transverse de la vertèbre sous-jacente pour se terminer au niveau de la partie antéro-inférieure du processus transverse de la vertèbre sus-jacente croisant dans leur trajet la racine spinale par l'avant et perpendiculairement. Ainsi la

partie postérieure adhère à la racine.

Ces ligaments trans-foraminaux sont, en général, uniques pour chaque foramen.

A l'étage Thoracique

Les ligaments foraminaux ont :

- un rôle de stabilisation de la racine spinale.
- un rôle de protection dans les mouvements de la colonne vertébrale.

Ils sont composés de 2 types (21) avec des ligaments dits trans-foraminaux bien systématisés et d'autres dits intra-foraminaux plus inconstants.

➤ *Les ligaments trans-foraminaux*

- Les ligaments corporéo-pédiculaires : supérieur et inférieur avec soit une insertion sur le pédicule supérieur et un trajet antéro inférieur pour rejoindre la partie rétro-corporéale disco-annulaire, soit une insertion sur le pédicule inférieur avec un trajet antéro-supérieur pour rejoindre le même espace.

- Les ligaments trans-foraminaux à proprement parler :

- Supérieur tendu de la capsule articulaire zygapophysaire avec un trajet postéro-supérieur au-dessus du pédicule supérieur.
- Moyen : même insertion avec un trajet antérieur vers l'annulus
- Inférieur : insertion au niveau de l'articulaire supérieure et terminaison au niveau de la jonction entre l'annulus et le corps vertébral.

➤ *Les ligaments intra-foraminaux*

Ce sont des fibres de tissu conjonctif qui assurent le maintien de la racine nerveuse avec le périoste du FIV, les ligaments trans-foraminaux et la graisse du foramen.

L'insertion se fait sur l'enveloppe méningée. Ces ligaments sont présents à tous les étages, étalés dans le FIV avec une systématisation beaucoup moins marquée.

➤ *Les ligaments extra-foraminaux*

Bien étudiés et décrits par Kraan (22), ces ligaments servent d'amarrage à la racine nerveuse lors de son émergence du FIV (Figure 13).

Il existe une partie supérieure ou ligament costo-transversaire qui s'insère sur la capsule de l'articulation costo-vertébrale supérieure et le processus transverse supérieur, croisant la racine sur sa face ventrale. De T2 à T9 il existe une partie inférieure qui s'insère sur l'articulation costo-vertébrale inférieure, sur le bord inférieur du processus transverse et qui amarre la racine sur sa face dorsale.

Il existe des variations anatomiques notamment de la partie supérieure de ce ligament qui peut présenter plusieurs fibres avec des niveaux d'attaches radiculaires variables.



Figure 13 Schéma des ligaments extra-foraminaux (ELA) à l'étage thoracique haut (T4) d'après KRAAN (ESJ 2009)

A l'étage Lombaire

Comme au niveau thoracique, il existe de nombreux ligaments qui cloisonnent cet espace pour les différents éléments : racine spinale, artère et veine radulaire, nerf récurrent méningé, graisse. On distingue plusieurs types de ligaments en fonction de leurs localisations par rapport au FIV, points d'attaches, et insertions terminales (8).

➤ *Les ligaments trans-foraminaux*

Au nombre de 3 on distingue :

- Le ligament intra-foraminal antérieur dont l'insertion se fait sur le bord inférieur du pédicule sus-jacent avec un trajet oblique, quasiment vertical, pour se terminer sur le corps vertébral supérieur au dessus du disque intervertébral. Il délimite un espace antérieur pour le nerf méningé récurrent issu de la face antérieure de la racine spinale.
- Le ligament intra-foraminal antéro-supérieur qui cloisonne le FIV par son trajet oblique antérieur, tendu de la face postéro-inférieure du pédicule supérieur au bord inférieur du corps vertébral supérieur, au-dessus du disque intervertébral. Dans cet espace, se trouvent souvent les artères segmentaires (cf. partie vascularisation).
- Le ligament intra-foraminal moyen transverse qui forme le lit de la racine nerveuse, est tendu de l'articulation zygapophysaire (facette articulaire supérieure) au bord postéro-latéral du corps vertébral du dessus avec une continuité du ligament corporo-transverse extra-foraminal inférieur.

➤ *Les ligaments extra-foraminaux*

Au nombre de 3, ils assurent la protection de la racine spinale lors des mouvements du rachis lombaire.

- Le ligament corporéo-transverse supérieur qui s'insère sur la face postéro-latérale du corps vertébral lombaire et sur le bord supérieur du disque intervertébral. Il se termine sur la base du processus transverse et sur la capsule articulaire.

- Le ligament corporéo-transverse inférieur qui s'insère un peu plus bas, sur la face postéro-latérale du corps vertébral et sous le disque intervertébral, avec une terminaison dans la capsule articulaire zygapophysaire ou sur la base du processus transverse.

Ce ligament sous-croise le faisceau supérieur.

- Le ligament corporéo-transverse médian est parfois décrit.

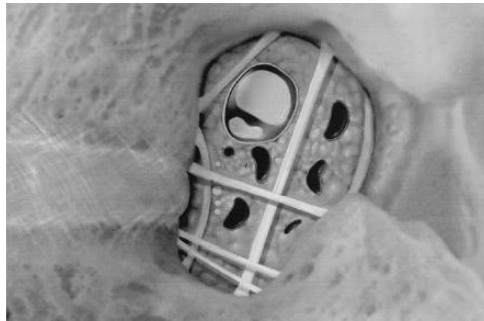


Figure 14. Cloisonnement ligamentaire du FIV lombaire d'après G. Cramer and al. « Evaluation of transforaminal ligaments by Magnetic Resonance Imaging » - *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics* May 2002 - (23)

Ainsi la région apparaît comme cloisonnée (24) avec un espace large supéro-médial qui comporte la branche ventrale de la racine spinale lombaire et le nerf méningé récurrent accompagné des artères et veines segmentaires.

En partie postéro-supérieure on retrouve les branches médiale et latérale de la racine dorsale avec les artères et veines lombaires.

Le petit compartiment inféro-latéral contient les veines segmentaires.

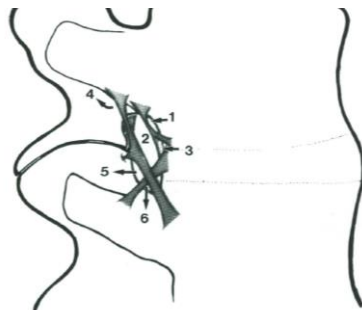


Fig. 6 (ii). Schematic diagram showing the attachments of the ligaments of the external aspect, and their contribution towards the partitioning of the foramen. 1, compartment for the spinal artery; 2, compartment for the ventral ramus of the spinal nerve; 3, compartment for the recurrent meningeal nerve - this compartment also transmits a small branch of the segmental artery; 4 and 5, tunnels transmitting the medial and lateral divisions of the dorsal primary ramus respectively, and accompanying vessels; 6, compartment for veins.

Figure 15. Situation ligamentaire Extra foraminale selon Amonoo - Kuofī and al. « Ligaments associated with lumbar intervertebral foramina L1 to L4 » *J. Anat.* (1988), 156, pp. 177-183 (25)

➤ Le ligament jaune (LJ)

Il est composé d'une couche superficielle et d'une couche profonde.

Il s'insère sur le bord inférieur de la lame sus-jacente et se termine sur le bord supérieur de la lame sous-jacente sans « gap interosseux » (26).

La couche profonde s'étend vers le FIV et suit le bord inter-lamaire qui va aller renforcer la

capsule articulaire en partie postérieure du FIV. Trois classes (A, B et C) sont parfois distinguées en fonction de la participation du LJ à la limite postérieure du FIV.

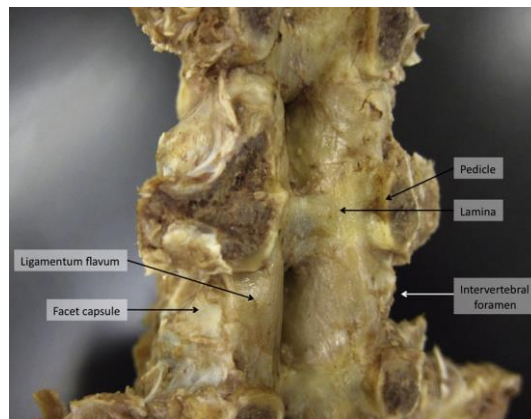


Figure 16. Situation Anatomique de participation du ligament jaune à la limite postérieure du FIV selon Anthony M.T. Chau, MBBS (Hons) and al. « Lateral extent and ventral laminar attachments of the lumbar ligamentum flavum: cadaveric study » - The Spine Journal 14 (2014) 2467–2471 – (26)

3 Rapports Vasculo-Nerveux

A l'étage Cervical

- *Le Système artériel*
 - *Les branches foraminales*

Les artères radiculo-médullaires et radiculaires :

Elles ont pour rôle la suppléance vasculaire des racines, de la moelle épinière, ainsi que des enveloppes méningées. Leur diamètre est d'environ 1mm.

Leur dénomination va dépendre de leur participation à la vascularisation médullaire.

Elles naissent :

- ❖ soit de **l'artère cervicale ascendante**, branche intermédiaire de division du tronc thyro-cervical avec un trajet pré-tuberculaire ascendant le long de la face médiale du nerf phrénique, le plus souvent au niveau du foramen C3-C4 (voire C4-C5) où l'artère pénètre la portion latérale du foramen dans sa partie supérieure avec un trajet postéro-inférieur par rapport à la racine C4. Elle se termine avec une branche dorsale pour l'artère spinale dorsale homolatérale, une branche radiculaire pour les rameaux ventraux de C4 ainsi qu'une branche médullaire qui rejoint l'artère spinale ventrale.
- ❖ soit de **l'artère cervicale profonde**, branche de division du tronc costo-cervical avec un trajet plus postérieur. Celle-ci donne une branche qui pénètre la partie postérieure du FIV à l'étage C5-C6 ou C6-C7 le plus souvent.
- ❖ soit de **l'artère vertébrale** dans sa portion V2 transversaire.

Elles pénètrent la dure-mère puis l'espace sous-arachnoïdien au niveau du ganglion spinal en partie postéro-inférieure pour se diviser :

- en artère radiculaire pure, qui vascularise la racine nerveuse et son enveloppe durale à son émergence du foramen.
 - en artère radiculo-médullaire ventrale, avec un rameau pour la racine nerveuse ainsi qu'un rameau ventral contribuant à la suppléance de l'artère spinale ventrale sur la ligne médiane, se divisant en une branche ascendante et une branche descendante.
 - en artère radiculo-médullaire dorsale, avec un rameau pour la racine nerveuse, son enveloppe et un rameau pour l'artère spinale dorsale.
- *Système veineux*

Il est classique de décrire 2 types de réseaux veineux en fonction de leur localisation.

- *Système veineux intradural*

Il est composé de 3 veines ventrales dont l'une accompagne l'artère spinale ventrale dans le sillon commissural ventral (artère sulco-commissurale).

Le drainage se fait via les veines radiculaires ventrales et dorsales en suivant la racine au niveau du foramen intervertébral dans sa partie supérieure.

Ce système communique avec le système veineux péri-rachidien.

- *Système veineux péri-rachidien*

Le drainage des plexus veineux épiduraux va se faire par 2 veines foraminales fines qui accompagnent la racine nerveuse dans son trajet foraminal en partie supérieure, entourées de graisse à ce niveau. Elles rejoignent la veine vertébrale qui suit l'artère vertébrale dans le foramen transversaire jusqu'en C6 puis chemine seule jusqu'en C7.

A l'étage Thoracique

- *Système artériel*

Il est en partie calqué sur le système veineux, le système artériel naît des branches dorsales des artères intercostales, naissant elles-mêmes de la face dorsale de l'aorte thoracique et thoraco-abdominale.

Ces artères cheminent sous les veines intercostales et au-dessus des nerfs intercostaux le long du bord supérieur de la côte inférieure. La branche dorsale suit la face antéro-latérale du corps vertébral pour rejoindre le canal vertébral via le FIV.

En fonction de leurs destinées on distingue :

- une branche dorsale qui va vasculariser l'espace épidural dorsal, les lames, les massifs articulaires et les tissus musculo-aponévrotiques dorsaux,

- une branche ventrale qui se divise en :
 - ❖ une branche ventrale rétro-corporéale pour les corps vertébraux via des rameaux perforants,
 - ❖ une branche segmentaire qui va donner les artères radiculaires qui vascularisent essentiellement les racines nerveuses ventrales et dorsales.

Les artères radiculo-médullaires ventrales : accompagnent la racine motrice sur sa face antérieures dans le FIV ; elles sont à destinée radiculaire et spinale ventrale (seulement 1 à 4 au niveau thoracique).

La plus importante, l'artère radiculo-médullaire magna ou artère d'Adamkiewicz (artère du renflement lombaire), principale source vasculaire de la spinale ventrale au niveau thoracique, traverse le FIV entre T9 et L2 dans 80% des cas et dans le foramen gauche (27,28)).

Les artères radiculo-médullaires dorsales : accompagnent la racine dorsale, à destinée des artères spinales dorsales (4 à 9), après perforation de la dure-mère spinale.

- *Système veineux*

- *Extra-rachidien*

L'organisation est proche de l'étage cervical.

Ces plexus communiquent avec le plexus veineux vertébral interne de l'espace épidual au sein de la graisse épidual via le foramen intervertébral en avant et le ligament jaune en arrière.

- *Intra-rachidien extra-dural*

Les plexus veineux internes sont en réalité composés de 4 systèmes interconnectés (2 antérieurs et 2 postérieurs) dans le plan axial. Ils recouvrent la face externe de la dure-mère avec une extension à la partie antérieure de la racine ventrale.

Ils appartiennent au système décrit par Lasjaunias comme système veineux extrinsèque composé du réseau veineux sous-pial, des veines radiculo-médullaires (drainage radiculaire et médullaire) et des veines radiculaires (drainage uniquement radiculaire).

- *Intra-dural*

Les veines de drainage médullaires sont nombreuses et de moins bonne systématisation :

- Les veines radiculaires

En tout, 8-20 ventrales pour 5-10 dorsales (Thron et Rosenberg, Satillan), elles ont un trajet proche des artères radiculo-médullaires.

Elles drainent les veines médianes dorsale et ventrale.

La grande veine radiculo-médullaire a un trajet plus oblique que l'artère du même nom, le plus souvent entre T11 et L3, accompagnant la racine ventrale ou dorsale. Cette dernière doit être distinguée de l'artère d'Adamkiewicz qui en général n'est jamais présente au même niveau et qui a un angle de raccordement médullaire plus aigu en forme « d'épingle à cheveux » (Lasjaunias 1990).

Ces veines accompagnent le plus souvent les racines nerveuses ventrale et dorsale à leurs émergences dures (parfois de manière séparée).

Elles quittent l'espace dural au niveau du FIV, en se collectant dans les veines superficielles et dans les plexus rachidiens. Elles sont souvent situées de part et d'autre de la racine (au-dessus et au-dessous de la racine)

Au niveau ganglionnaire, les veines radiculaires dorsales vont recevoir la vascularisation du ganglion dorsal via le plexus péri-ganglionnaire

A l'étage Lombaire

- *Système Artériel*

Les artères radiculo-médullaires naissent des artères lombaires de L1 à L4.

Elles sont au nombre de 4 (parfois 5) paires naissant de la face postéro-latérale de l'aorte abdominale.

Chaque branche spinale va se diviser en 3 branches (de manière identique aux niveaux cervical et thoracique) avec : un ramus pour le corps vertébral (branche antérieure), un ramus pour les éléments osseux postérieurs et les muscles érecteurs du rachis, un ramus nerveux qui accompagne les racines spinales ventrales et dorsales sous la forme d'artères radiculaires dans le FIV. Ces artères vont pénétrer les enveloppes méningées à proximité du ganglion (29). Chaque racine est accompagnée par des artères radiculaires (Crock, 1986) qui peuvent avoir une participation médullaire (artères radiculo-médullaires), avec l'artère spinale ventrale pour la branche ventrale, ou les artères spinales dorsales pour les branches dorsales.

La branche dorsale des artères segmentaires croise le ganglion spinal par dessus ou dessous en distalité ou au niveau du tronc commun et va suivre la racine postérieure donnant naissance à des rameaux ganglionnaires (Beckske and Nelson 2009, Bergmann and Alexander 1941). Biglioli décrit un réseau ganglionnaire artériel avec des artères communicantes qui vont perforer les enveloppes méningées soit au niveau du pôle soit au niveau de la périphérie du ganglion dans le FIV .

A l'étage sacré, l'artère sacrée médiane, branche de l'aorte abdominale distale, est à l'origine de rameaux ventraux et dorsaux pour les racines nerveuses sacrées et une artère lombaire pour L5. Elle ne donne pas de branche a destinée médullaire.

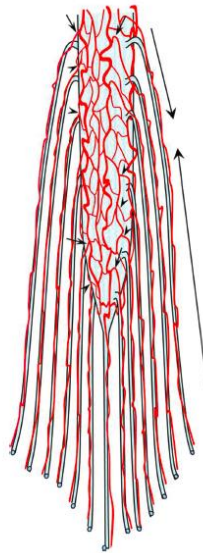


Figure 17. Schéma de la vascularisation des racines de la queue de cheval d'après « *Vascular Anatomy of the Cauda Equina and Its Implication on the Vascular Lesions in the Caudal Spinal Structure* » Namba (2016), (29). Sur le côté droit sont représentées les artères des racines antérieures alors que du côté gauche sont représentées les artères des racines postérieures. Les flèches représentent les anastomoses multiples entre les artères spinales et radiculaires ou les vasa corona (têtes de flèches). Les longues flèches montrent la partie proximale des racines (1/3) qui est vascularisée par les artères radiculaires des plexus artériels médullaires alors que la partie distale (2/3) est vascularisée par les artères segmentaires radiculaires (branches lombaires et sacrée médiane)

- *Système veineux*

- *Les plexus veineux*

A l'étage lombaire le système veineux avalvulaire est en continuité avec le système précédemment décrit (31) :

Les plexus veineux externes extra-duraux : antérieur au niveau du LCA ou dans l'espace postéro-latéral et récessus latéral avec les plexus dorsaux.

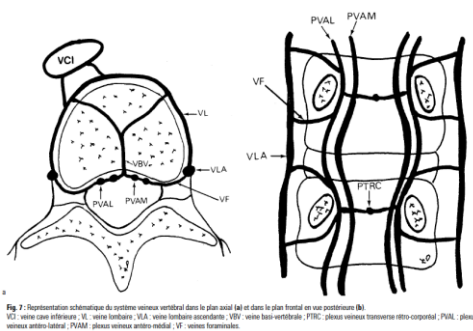


Figure 18. Schématisation du réseau veineux péri médullaire avec à gauche une coupe axiale et à droite une coupe coronale ; tiré de « *Radiographic anatomy of the intervertebral cervical and lumbar foramina (vessels and variants)* » Demondion.X and al (32)

Les systèmes internes extra-duraux vont communiquer avec le système externe de drainage via, plus latéralement, les **veines foraminales** qui se placent à la partie supérieure du FIV et se drainent dans les veines lombaires ascendantes droite et gauche. Ces dernières rejoignent le système cave supérieur via le système azygos à droite, par anastomose avec la 12^{ème} veine intercostale, et hémi-azygos à gauche, par anastomose avec la veine sous-costale gauche.

- *Les veines foraminales*

Ce sont les veines radiculo-médullaires.

Connectées au réseau extrinsèque péri-rachidien, elles assurent le drainage veineux des veines postéro-latérales ou ventrales médullaires, et accompagnent la racine nerveuse au niveau du FIV, avec une branche ventrale et dorsale calquées sur le système artériel. Le drainage veineux des racines spinales se fait via les veines radiculaires superficielles.

Leur nombre varie de 5-10 à 8-20 (33,34) avec une variabilité plus importante que pour les artères radiculo-médullaires.

Elles se situent en partie haute du foramen intervertébral et font communiquer le système veineux intrinsèque intra-dural et le système extrinsèque.

4 Les plans musculaires

A l'étage Cervical

La musculature antéro-latérale protège la racine nerveuse à la sortie du FIV.

- Le scalène antérieur s'insère sur le tubercule antérieur du processus transverse de C3, C4, C5 et C6. Le trajet est oblique, en bas et en dehors, pour se terminer sur la face antéro-médiale de la clavicule, en arrière du passage de la veine sub-clavière.
- Le scalène moyen s'insère sur les tubercules postérieurs de C2 à C7 pour se terminer sur la face supéro-médiale de la 1^{ère} côte, selon le même trajet.

- Le scalène postérieur s'insère également sur les tubercules postérieurs de C4 à C7 pour se terminer sur la face externe de la 2^{ème} côte.

Le triangle scalénique, composé du muscle scalène antérieur en avant, moyen en arrière, et le bord supérieur de la 1^{ère} côte dans sa partie inférieure, est important car il livre passage aux racines spinales dans leur trajet extra-foraminal, ainsi qu'à l'artère sous-clavière (Figure 19).

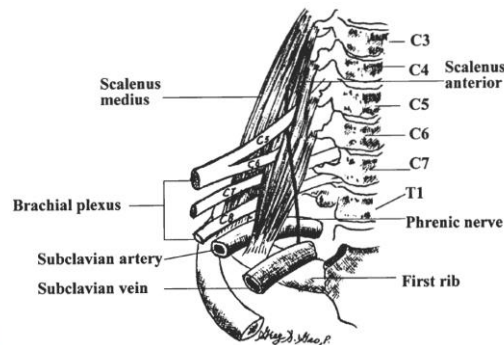


Figure 19. Rapports entre la partie extra-foraminale des racines spinales et les parties molles. Le triangle scalénique (muscles scalènes antérieur, moyen et postérieur) assure la protection des racines à leur sortie du FIV. D'après « Anatomical variations of the scalene triangle : Dissection of 10 cadavers » S. Rusnak-Smith and al. JOSPT – 2001 (35)

A l'étage Thoracique

A ce niveau, les rapports du nerf spinal se font essentiellement avec les muscles intercostaux.

Il en existe 3 types :

- Externes : l'insertion se fait sur les tubercules costaux et les articulations chondro-costales. L'orientation des fibres est oblique, en bas et en avant, tendue du bord inférieur de la côte sus-jacente à la côte sous-jacente. Ce feuillet est en continuité avec le muscle oblique externe latéralement.
- Internes : l'insertion se fait à la face profonde du précédent. L'orientation est en bas et en arrière. La continuité se fait latéralement avec l'oblique interne.
- Intimes : Partie profonde des précédents. Les intercostaux internes et intimes délimitent l'espace de passage pour les éléments vasculo-nerveux, à l'émergence des FIV, sous la gouttière costale.

Le muscle oblique externe, recouvert de son fascia musculaire, assure le lit de la racine spinale à son émergence du FIV. Cette dernière chemine ensuite entre les muscles obliques interne et intimes. La terminaison se fait par :

- une branche cutanée latérale, qui traverse les muscles obliques interne, externe, et serratus antérieur pour se distribuer aux téguments
- une branche cutanée antérieure, pour les muscles de la paroi médiane (abdominis rectus)

A la sortie du FIV, une branche postérieure traverse les insertions musculaires obliques pour se distribuer aux muscles erector spinae par une branche médiale, et aux téguments par une branche latérale (Figure 20).

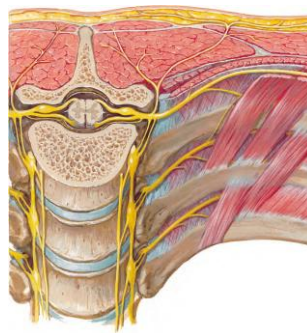


Figure 20. Relations anatomiques entre les racines spinales et la paroi musculaire thoracique. Selon Netter.F « Atlas of Human anatomy - sixth edition » Copyright © 2014 by Saunders, an imprint of Elsevier Inc.

A l'étage Lombar

A l'émergence du FIV, chaque racine porte le numéro du pédicule de la vertèbre sus-jacente (la racine L1 sort via le FIV L1-L2, soit sous le pédicule de L1).

A l'instar du plexus brachial en cervical, des communications entre les branches ventrales des nerfs spinaux lombaires vont former les plexus lombaire et sacré.

Le plexus lombaire donnera naissance aux différents troncs nerveux : nerf crural (réunion de L2, L3 et L4), nerf sciatique (L5, S1), etc.

Les branches dorsales, plus petites, vont se diviser rapidement pour donner une branche latérale innervant les muscles lombaires (erector spinae) et assurant la sensibilité cutanée correspondante, une branche médiale qui va innerver les processus articulaires supérieurs et

inférieurs en passant dans la gouttière mamillo-accessoire, sous le ligament du même nom qui est parfois ossifié (Maigne), se terminant en regard du ligament inter-épineux pour innerver le multifidus.

Le nerf méningé récurrent (ou nerf sinu-vertébral) naît de la branche ventrale à la sortie du foramen, anastomosée avec le rameau communicant gris du plexus sympathique pré-vertébral et présente un trajet récurrent foraminaux pour innerver les différents éléments du foramen (LJ, dure mère, annulus postérieur...). Cette branche nerveuse se situe en partie antéro-supérieure dans le foramen vertébral par rapport à la racine nerveuse, pour se terminer dans le LLP.

Les rapports du nerf spinal se font essentiellement avec le muscle **psaos** vers l'avant à la sortie du FIV.

Il s'insère sur la face antéro-latérale du rachis de T12 à L5.

Ses insertions se font selon 2 chefs :

- Profond, accessoire, qui s'insère sur les processus costiformes de L1 à L4 et le processus transverse de T12.
- Superficiel, principal, qui s'insère au niveau du disque T12-L1 et sur les rebords supérieurs et inférieurs de L1 à L4 ainsi que sur le disque L4-L5. L'insertion se fait selon des arcades fibreuses limitées en dedans par le corps vertébral ; ce sont des voies de passage pour les nerfs lombaires, les artères lombaires et veines lombaires. L'espace cellulo-graisseux entre les 2 chefs délimite un espace de passage pour le plexus lombaire.

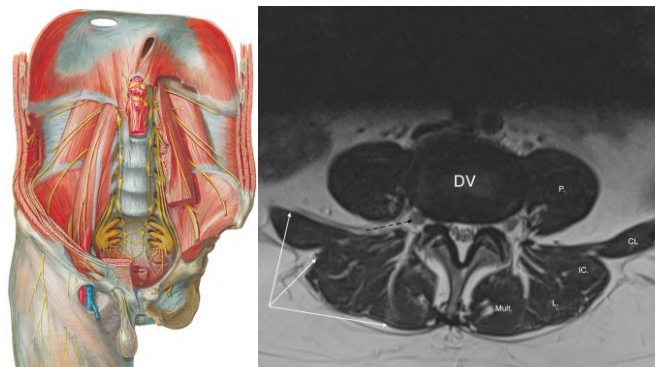


Figure 21. Rapports anatomiques entre les nerfs spinaux lombaires et la paroi musculaire lombaire. . A gauche, Selon Netter.F « Atlas of Human anatomy - sixth edition » Copyright © 2014 by Saunders, an imprint of Elsevier Inc. A droite coupe axiale T2 IRM au niveau du disque L3-L4 avec P : psoas, CL : carré des lombes, L : longissimus, Mult : Multifidus. Les flèches blanches représentent les 3 feuillets de l'aponévrose thoraco lombaire. La racine sortante marquée par flèche noire discontinue.

5 Les Nerfs spinaux

Trente et une paires de nerfs spinaux sont formées par la réunion de la racine ventrale motrice et dorsale sensitive. La racine spinale comporte donc plusieurs fibres : afférentes ou sensibles (fibres A β , A δ , C) et fibres efférentes issues de la corne ventrale (A α et A γ). Une branche récurrente (nerf méningé récurrent ou nerf sinu-vertébral ou nerf récurrent de Luschka) qui naît directement après la formation du nerf spinal.

Ce nerf passe au travers du FIV, dans sa partie antérieure, avec un trajet oblique, vers le haut, et fait suite à la réunion de 2 ou parfois 3 branches :

- ventrale, qui innerve le LLP et l'annulus fibrosus,
- dorsale pour les massifs articulaires et en thoracique,
- une intermédiaire qui innerve les muscles éleveurs des côtes et inter-transversaires. Ce nerf possède une branche de communication avec le plexus sympathique pré-vertébral (Figure 22) et serait à l'origine des douleurs rachidiennes lors des déchirements traumatiques de l'annulus postérieur.

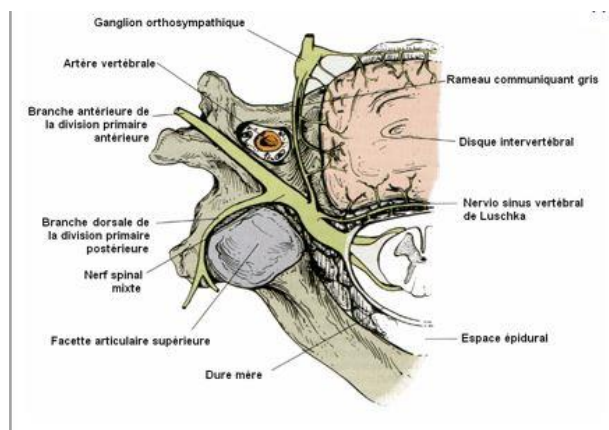


Figure 22. Coupe axiale d'une hémivertèbre droite cervicale. On observe l'origine du nerf sinu vertébral, son trajet récurrent et sa communication avec le système orthosympathique pré vertébral.

Progressivement, la pachyméninge spinale va se prolonger par l'épinèvre (ou couche fibreuse résistante). Cet épinèvre entoure les faisceaux nerveux, qui sont eux même entourés de périnèvre, relais de la leptoméninge. Enfin, l'endonèvre entoure chaque axone composant les fascicules (Figure 23). Pour les fibres myélinisées, la gaine de myéline parfait la protection axonale et permet une accélération de la conduction nerveuse.

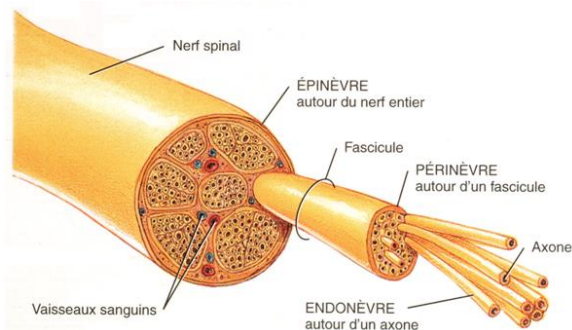


Figure 23. Anatomie du nerf spinal post ganglionnaire. Les axones sont entourés d'endonèvre et regroupés sous forme de fascicules eux-mêmes entourés de périnèvre. Enfin l'épinèvre assure la gaine la plus périphérique faisant suite à la DM spinale.

La variation des racines nerveuses intra-thécales a été beaucoup étudiée, avec des résultats inhomogènes.

Leur connaissance permet une meilleure compréhension des constatations cliniques en pathologie traumatique, dégénérative ou tumorale.

Classiquement on décrit une augmentation de taille des racines spinales de L1 à L5 (0,80 à 3,42mm pour *Arslan (36) et YongTao Liu (37)*).

Ceci est en rapport avec un nombre de radicelles qui augmente de L1 à L5 : 1.80 ± 0.76 à 8.05 ± 0.82 pour les racines dorsales et 1.45 ± 0.51 à 5.75 ± 0.78 pour les racines ventrales.

Leur nombre est variable selon les auteurs (jusqu'à 11 pour *Mingrino et D'Avella (38)*).

Il existe par ailleurs des communications entre ces radicelles, elles sont plus communes à l'étage cervical et thoracique haut mais pas exceptionnelles en thoracique bas et lombaire.

Les racines lombaires

Ce sont surtout les rapports méningés avec les racines lombaires qui ont été étudiés.

Les racines lombaires prennent naissance au niveau du renflement lombaire de la moelle épinière qui se situe au-dessus de l'aisselle de la racine T11 et du premier tiers de la vertèbre T11 dans 93,8% des cas (39), la moelle se terminant en regard du disque L1-L2 dans 93,8% des cas. A ce niveau, 3 à 6 radicelles ventrales et dorsales vont se rejoindre pour former les racines lombaires qui sortent du cul-de-sac lombaire, environ 1 niveau au dessus du FIV qui leur correspond, formant ainsi la racine dite « passante » par rapport à la racine dite « sortante ».

La racine nerveuse a un trajet oblique, latéralement, par rapport au sac dural pour rejoindre la partie haute du FIV, sous le pédicule de la vertèbre correspondante (ex : L4 sous le pédicule de

la vertèbre L4, L5 sous le pédicule de L5, etc.).

- *Rapports avec le disque intervertébral*

Il est intéressant d'étudier la position de l'émergence de la racine spinale par rapport au disque intervertébral pour mieux comprendre la physiopathologie du conflit disco-radulaire par hernie discale.

Suh (40) décrit une position toujours inférieure au disque lombaire correspondant pour les racines de L1 à L4. Pour L5 l'origine sera soit inférieure au disque L4-L5 soit au même niveau. Enfin pour S1 c'est l'inverse avec une origine en général au-dessus du disque L5-S1 mais parfois au même niveau (41).

Bien que sous-jacente, l'origine proche avec le disque correspondant (15mm de distance de L1 à L3, 8mm pour L4) explique les compressions radiculaires possibles lors de l'extrusion discale postéro-latérale et les tableaux de compression de cette racine passante.

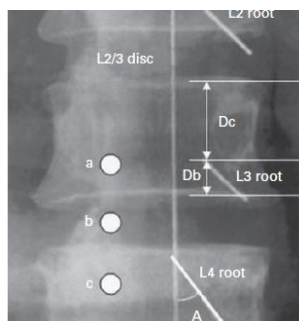


Table IV. Mean (mm) values of the distance between the origin of the root sleeve from the corresponding disc (Dc) and from the disc below (Db)

Origin of the root sleeve for	Distance (mm) from corresponding disc (Dc)		Distance (mm) from disc below (Db)	
	Formalin-preserved	Fresh-frozen	Formalin-preserved	Fresh-frozen
L1	16	16	12	11
L2	15	14	14	14
L3	13	14	18	17
L4	7	9	24	22

Figure 24. Situation anatomique entre l'émergence dural des racines lombaires et le disque inter vertébral correspondant d'après Suh (2005). Distance entre émergence spinale et disque correspondant (Dc) ; distance entre émergence spinale et disque sous jacent (Db)

- *Rapports avec le ganglion spinal*

A chaque étage, les racines ventrales motrices et dorsales sensibles font éruption au travers du FIV passant sous l'aisselle du pédicule de la vertèbre sus-jacente.

Le ganglion spinal correspond au renflement formé par la racine postérieure contenant les corps cellulaires des neurones sensitifs (neurones en « T »). Il est le plus souvent unique mais on décrit des racines bi- ou tri-ganglionnaires (42).

La position du ganglion spinal est foraminale le plus souvent avec quelques variations : intra-spinale (surtout L5 dans 5,7%) et extra-foraminale (surtout pour L3 dans 2,2%) pour Shen (42) après étude sur IRM. Pour Vialle (43), le ganglion spinal « flirte » avec le « triangle de la « safety zone » ». Ce triangle rectangle se compose : d'une hauteur (la dure-mère du sac dural), d'une base (la partie haute du plateau de la vertèbre sous-jacente) ainsi que d'une hypoténuse (l'aisselle de la racine dorsale).

Cette zone, bien connue des médecins pratiquant des infiltrations foraminales lombaires, est finalement bordée par le ganglion spinal avec pour risque une lésion ganglionnaire dans les gestes d'infiltration ou de mise en place d'implants discaux en chirurgie, lors des arthrodèses lombaires (TLIF).

- *Angles de raccordements méningés*

L'analyse des angles de raccordement radiculaire montre des résultats variables selon les auteurs : 37-41° (moyenne de 40°) pour Cohen (44), une augmentation de l'angle de 33,7° à 39,2° de L1 à L5 (angle le plus petit pour L2 et L5) pour Ebraheim (45).

A contrario, pour d'autres (Suh (40), Bose et Balasubramaniam (17)), il existe une diminution de cet angle de 43 à 27° (variation en fonction du mode de préservation des cadavres) ; idem pour Wu ((T11 (52.4° +/- 3.13°) à L5 (25.8° +/- 3.10°)).

La racine ventrale sortante est directement en regard de l'espace discal alors que la racine dorsale est toujours située au-dessus de cet espace et a un trajet plus proche du pédicule.

6 Les méninges spinales

Les méninges sont une structure de protection du SNC mais elles jouent aussi un rôle important dans le développement, le fonctionnement et l'homéostasie du SNC (6). En effet, ces enveloppes comportent 3 couches avec de la superficie (partie osseuse) vers la profondeur (SNC) : la pachyméninge ou dure-mère (feuille dense) qui sépare l'espace péri-dural graisseux au niveau du rachis de l'espace sous-dural, les leptoméninges (feuilles mous) avec l'arachnoïde qui sépare ce dernier de l'espace sous-arachnoïdien contenant le LCS et les vaisseaux à destinée radiculaire et médullaire, et enfin la pie-mère directement accolée au SNC (figure 16).

Le LCS est produit par les plexus choroïdes ($\approx 500\text{cc}/24\text{h}$) mais de plus en plus il est admis une sécrétion extra-plexuelle du fait de constatations ontogénétiques avec une production qui

précède le développement même des méninges (OSAKA) et peut-être une production épendymaire par les capillaires parenchymateux. Cette circulation se met en place au 41^{ème} jour intra utérin.

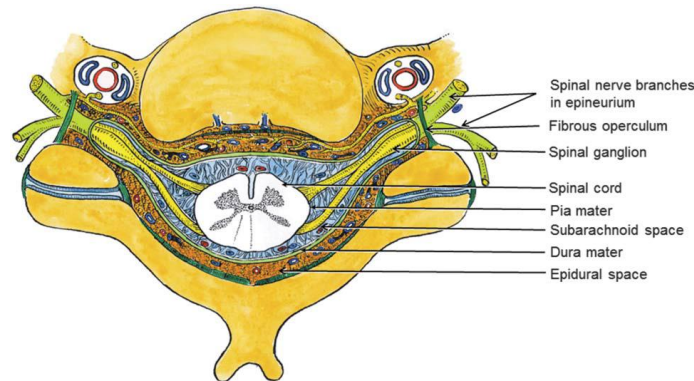


Figure 25 : Schéma représentant l'anatomie des méninges spinales. On retrouve de l'extérieur vers l'intérieur : la dure-mère (vert), l'arachnoïde (bleue) et la pie-mère (noire) qui se prolonge avec l'émergence des racines antérieures et postérieures.

La pachyméninge

La dure-mère représente la couche la plus externe, fibreuse et inextensible ; elle poursuit la méninge encéphalique au travers du foramen de la base du crâne pour se terminer par une structure fibreuse tendue de S1 à S2.

Au niveau spinal, il existe un véritable espace péri-dural graisseux, vestige du tissu péri-méningé primitif. Ce dernier est extrêmement riche en plexus veineux qui participent au drainage des veines intra-durales et osseuses.

Certains auteurs (46,47) retrouvent des points d'attache de cette DM au canal osseux en cervical sous la forme de véritables ligaments méningo-vertébraux présents en C1-C2 et C4-C5. De la même manière, en lombaire et plus rarement en thoracique l'existence de ces ligaments a été démontrée par d'autres auteurs (47,48) et explique probablement une partie des brèches durales dans la chirurgie du rachis lombaire notamment dégénératif, - alors qu'il n'y a pas de lésion directe -, par phénomènes de traction.

Latéralement, cette enveloppe va se poursuivre, accompagnant les racines nerveuses sensibles et motrices à leur émergence durale. Les racines motrices et sensibles peuvent partager ou non l'orifice d'émergence latérale (Figure 24).

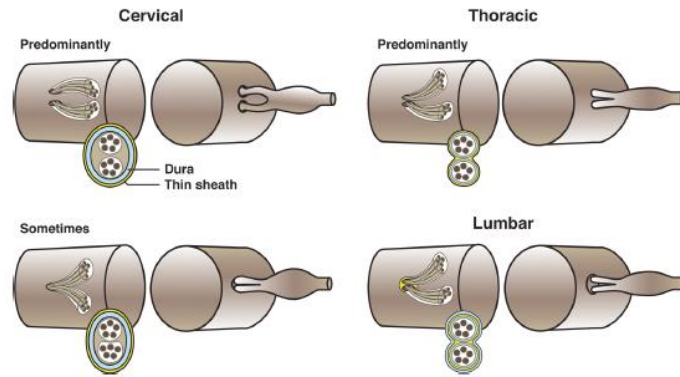


Figure 26 : Représentation Schématique possibles entre les racines dorsales et ventrales aux différents étages lors du passage au travers de la DM latéralement vers le FIV. Selon R.S.Tubbs (2015)(49).

Il est classique de retrouver un continuum entre la DM et l'épinèvre qui correspond à la couche la plus externe des racines spinales, mais la transition n'est pas toujours très claire : pour Sunderland en 1974 (50), la DM se termine par une membrane fibreuse au niveau du ganglion spinal pour la racine dorsale avec relais par l'épinèvre, tandis qu'elle se termine au même niveau sur la racine ventrale mais avec un tissu moins épais (Figure 27).

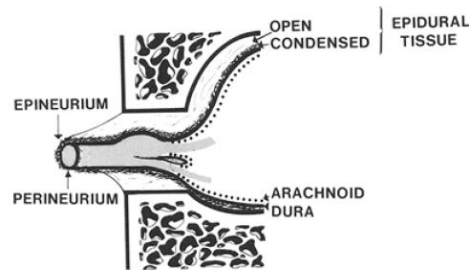


Figure 27 : Schéma résumant la terminaison des différentes enveloppes dans le FIV selon Sunderland (1974)

Pour d'autres (Brierley (51)), la DM se poursuit au-delà du ganglion spinal le recouvrant totalement pour ensuite former l'épinèvre. Tubbs (49) décrit des différences dans la terminaison de ces enveloppes : pour lui, la DM se termine classiquement au niveau du ganglion spinal mais plus on descend de niveau et plus cette transition est latérale, et la transition dorsale est souvent plus latérale que la transition ventrale. Les racines cervicales ont une transition intra-spinale alors que les lombaires sont extra-spinales (position plus latérale du ganglion spinal).

Les leptoméninges

➤ L'arachnoïde

Couche intermédiaire, fine, elle sépare l'espace sous-dural de l'espace sous-arachnoïdien et contient les vaisseaux et le LCS. Elle fait suite à l'arachnoïde encéphalique au travers du foramen magnum. Elle entoure la moelle épinière et accompagne les racines ventrales et dorsales lors de leur sortie à chaque étage via l'ostium de DM décrit supra. La limite périphérique n'est pas toujours très claire. Pour Tubss la terminaison serait plutôt au niveau du pôle proximal du ganglion spinal et plus latéralement sur la racine dorsale que sur la racine ventrale. Sunderland et Brierley font les mêmes constatations en décrivant un cul-de-sac arachnoïdien entre la racine ventrale et la racine dorsale et une terminaison au niveau du pôle proximal (Figure 28). Ils ne décrivent pas d'espace sous-arachnoïdien au delà du ganglion spinal.

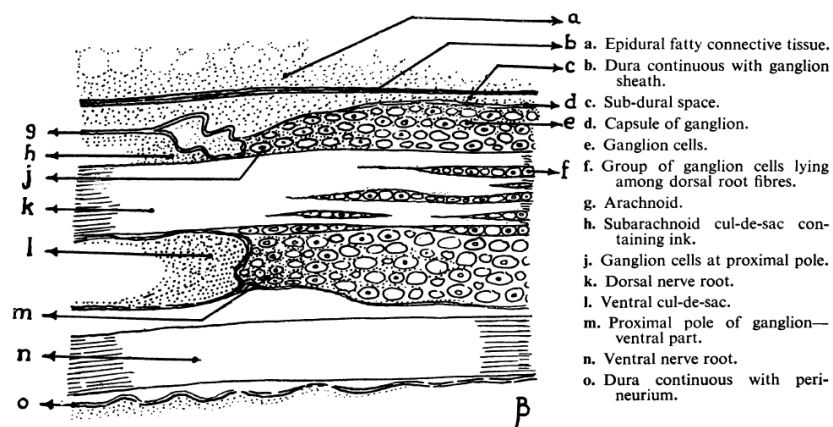


Figure 28 : Schéma d'une coupe longitudinale passant par le pôle proximal du ganglion spinal (a gauche côté moelle épinière, à droite côté ganglion). On observe une terminaison de l'espace sous arachnoïdien sous la forme d'un cul de sac entre les 2 racines accolé au pôle proximal du ganglion rachidien.

➤ La pie-mère

Couche la plus profonde, elle adhère intimement à la surface de tout l'axe nerveux craniospinal.

La pie-mère spinale est en continuité avec la pie-mère de l'étage encéphalique au travers du foramen magnum.

Elle protège la moelle épinière et les racines ventrales et dorsales et forme un système d'amarrage latéral : les ligaments dentelés (Huber, (52)) sous forme de 20 à 21 paires qui séparent les racines ventrales des dorsales (Adeeb, (53)). Ces ligaments ont un rôle de stabilisation de la ME dans les mouvements de traction (Epstein BS, (54)). Vers le bas elle recouvre le filum terminal dans sa portion intra-durale rejointe par la portion extra-durale ou ligament coccygien. Le filum amarre le cône terminal à la face dorsale de S2 avec une taille moyenne de 15 cm chez l'adulte vs 4.2cm chez le nouveau né (Tarlov, 1932) pour la portion intra-durale. Ce filum se compose en partie de cellules gliales et épendymaires dans sa portion initiale sous le cône médullaire (Harmer JW, 1933) avec quelques axones et cellules ganglionnaires.

En association, Kershner (55) décrit 8 à 27 ligaments directement intra-thécaux d'amarrage des racines sensibles de la queue de cheval entre elles, à la DM latéralement, comme les ligaments dentelés, et parfois entre les racines motrices et sensibles.

Pour Tubbs, la pie-mère se poursuit jusqu'au pôle supérieur du ganglion spinal avec l'arachnoïde sans jamais le dépasser.

Pour Sakka, il existe une fusion entre l'arachnoïde et la pie-mère à mi-chemin entre la terminaison latérale de la DM et le ganglion spinal. Cette fusion serait à l'origine du périnèvre.

ETUDE ANATOMIQUE CADAVERIQUE DES NERFS SPINAUX

Nous avons vu que la littérature n'était pas toujours unanime sur les modalités de terminaison des enveloppes méningées au niveau des racines spinales. La connaissance de cette anatomie nous paraît importante dans la chirurgie des schwannomes situés ou développés dans cette région, les problèmes chirurgicaux posés étant l'étanchéité à la fermeture avec comme corollaire les problèmes posés par les fuites de LCS.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'anatomie des méninges spinales dans leur portion intra et extra-foraminale et leurs rapports avec les nerfs spinaux.

1 Matériel et Méthodes

Matériel

1- Etude Anatomique

Cette étude a été réalisée sur cadavres formolés (solution de formol 10%), obtenus au laboratoire d'anatomie de l'Université de Bordeaux 2 dans le cadre du don du corps.

Six colonnes vertébrales ont été prélevées chez 3 hommes et 3 femmes (âge > 70ans).

La dissection s'est faite sous microscope opératoire (ZEISS® OPMI 3) et une colonne d'endoscopie (WOLF®) qui ont permis la réalisation de photographies.

Nous avons utilisé les instruments de dissection chirurgicaux classiques.

2- Etude radio-anatomique

Nous avons pu analyser les examens radiologiques de patients du CHU de Bordeaux (service de Neuroradiologie) en sélectionnant des images de myélo-scanner ou myélo-IRM.

Les images ont été retravaillées sur le logiciel du CHU de Bordeaux (DxWin) et le logiciel Osirix, Pixmeo ©, Suisse.

Pour les myélo-scanners, nous avons pu analyser les dossiers radiologiques de 14 patients : 5 Hommes et 9 Femmes, avec une moyenne d'âge de 59.7 ans (38ans à 77ans).

Pour les myélo-IRM, nous avons pu analyser les dossiers radiologiques de 5 patients : 3 femmes et 2 Hommes, avec une moyenne d'âge de 63 ans (45ans à 69ans).

La zone d'étude n'était pas pathologique : nous avons exclu les canaux lombaires étroits, les hernies discales, etc.

3- Etude Histologique

L'étude histologique a été réalisée directement après processus de fixation des cadavres. Au total, 6 ganglions rachidiens ont été prélevés (1 cervical, 1 thoracique et 1 lombaire) sur 2 spécimens différents aux mêmes étages : C5, T6, L4.

Méthodes

1- Etude anatomique

Les corps sont placés en décubitus ventral, 2 incisions para spinales, à 8 cm de la ligne médiane, étendues de la région cervicale aux épines iliaques postéro-supérieures permettent de dégager les parties molles musculo-aponévrotiques latéralement et la cage thoracique.

Les côtes sont sectionnées libérant la colonne thoracique de ses attaches osseuses.

Les gros vaisseaux et les voies aéro-digestives ont été soigneusement décollés de la face antérieure de la colonne pour permettre un prélèvement monobloc.

Après avoir réséqué les parties molles para-vertébrales, une laminectomie étendue cervico-thoraco-lombaire est réalisée.

La flavectomie a été réalisée soigneusement pour éviter les lésions des enveloppes méningées.

Latéralement, la dissection est poursuivie par une arthrectomie large pour ouvrir l'ensemble des FIV.

Les racines spinales ont été disséquées dans le FIV pour les libérer de leurs attaches ligamentaires.

Certains spécimens ont été disséqués par voie double :

- latérale endo-thoracique à l'étage thoracique surtout,
- antérieure, en cervical

Les espaces sous-dural et sous-arachnoïdien sont individualisés. A la partie caudale du prélèvement, la dure-mère sectionnée est suturée de façon étanche. A la partie crâniale, une solution de latex néoprène colorée est instillée, dans chacun des espaces, de façon douce et le sac dure-mérien crânial est aussi suturé. La colonne est ensuite immergée dans la solution de formol 10% au moins 24h avant le début de la dissection.

L'objectif était d'aborder la racine spinale par voie intra et extra foraminale.

Le reste de la dissection a été faite sous microscope.

Sous microscope, on poursuit la dissection de la racine, on individualise les moyens d'union ainsi que le périoste osseux.

Le ganglion spinal est libéré complètement.

La DM est ouverte, à chaque niveau spinal, par une incision en « T ». L'incision de la DM est verticale dans le foramen vertébral sur la ligne médiane et horizontale selon l'axe de la racine nerveuse, prolongée au niveau du ganglion et de la racine spinale aussi loin que possible, à la lame froide et aux micro-ciseaux.

Les racines sont disséquées, ensemble ou individuellement, en fonction de leur configuration d'émergence (orifice de sortie unique, individuel pour chaque racine ou unique mais cloisonné).

L'arachnoïde est repérée depuis le canal vertébral et suivie dans le FIV le long de la racine et du ganglion.

La pie-mère étant fragile, elle est individualisée en intra-dural, adhérente aux racines ; latéralement elle est suivie jusqu'au ganglion spinal.

2- *Etude Histologique*

➤ Prélèvements et coupe

Des blocs sont prélevés, comprenant le ganglion spinal ainsi que les portions nerveuses sur quelques millimètres en pré et post-ganglionnaire avec leurs méninges.

Un fil repère marque la partie proximale pré-ganglionnaire de la racine spinale.

La déshydratation se fait par bains successifs d'alcools de concentrations croissantes car la paraffine est hydrophobe : (alcool 60° puis 70° puis 80°).

Une fois ces bains terminés, les tissus sont plongés dans un bain de xylène sous hotte aspirante (toxicité) pour une durée de 20 minutes.

Les blocs sont inclus en paraffine en plaçant les prélèvements dans de la cire de bougie à sa température de fusion (45°C) + 2°C.

Après refroidissement, les blocs de paraffine sont coupés au microtome (7 µm) avec réalisation de ruban de coupes que l'on appose sur des lames chauffées brièvement.

Les lames sont placées une nuit dans l'étuve à 37°C pour séchage.

➤ Coloration des lames

Les lames portant les coupes incluses dans la paraffine sont mises dans un Copplin-Jar (support de verre) puis on réalise un déparaffinage pendant 30 minutes, puis 20 minutes dans un bain de xylène, puis 5 bains de 2 minutes d'alcools de plus en plus dilués (de 100% à 80%). On rince ensuite à l'eau du robinet.

- Lames colorées par l'Hemalun (mise en évidence des noyaux en violet) : contact pendant 2 minutes puis rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes.

- Lames colorées par l'Eosine (cytoplasme en rose Fuchsia) pendant 1 minute puis rinçage à l'eau acétifiée 5% (5/1000 acide acétique) puis lavage à l'eau du robinet par 2 bains de 2 minutes.
- Lames colorées par le Trichrome de Masson qui colore le collagène en vert avec successivement le liquide de Bouin, l'Héματοxyline de Weigert et enfin par la solution de Biebrich. Des lavages successifs ont lieu entre les différentes colorations avec une étape ultime de déshydratation et coloration au bleu d'Aniline.

➤ Montage des lames :

On réalise des bains rapides d'alcool 100% (x 3) puis 2 bains successifs de xylène sous la Sorbonne (toxicité respiratoire).

Montage des lames avec mise en place de lamelles fixées par de la colle EUKITT® (Microptic SL, Barcelone, Espagne) pour protection, conservation et lecture.

Les analyses ont été réalisées sous microscope, à différents grossissements (x16, x32).

Le service d'Anatomopathologie du CHU de Pellegrin nous a aidé à interpréter les coupes (Dr Léger).

3- Etude Radiologique

Myélo-scanner

Cette procédure se déroule en salle de radiologie en 2 temps :

- On ponctionne l'espace sous arachnoïdien avec une aiguille fine de 16G +/- sous contrôle fluoroscopique. Après vérification de la bonne place de l'aiguille (écoulement de LCS), on instille le produit de contraste iodé de type IOMERON® dans l'espace sous-arachnoïdien.
- On réalise l'examen radiologique à proprement parler : TDM du rachis complet avec possibilités de reconstructions dans les 3 plans.

Cet examen permet de visualiser l'espace sous arachnoïdien à la recherche d'une image de soustraction (tumeur, kyste, hernie discale ou autre).

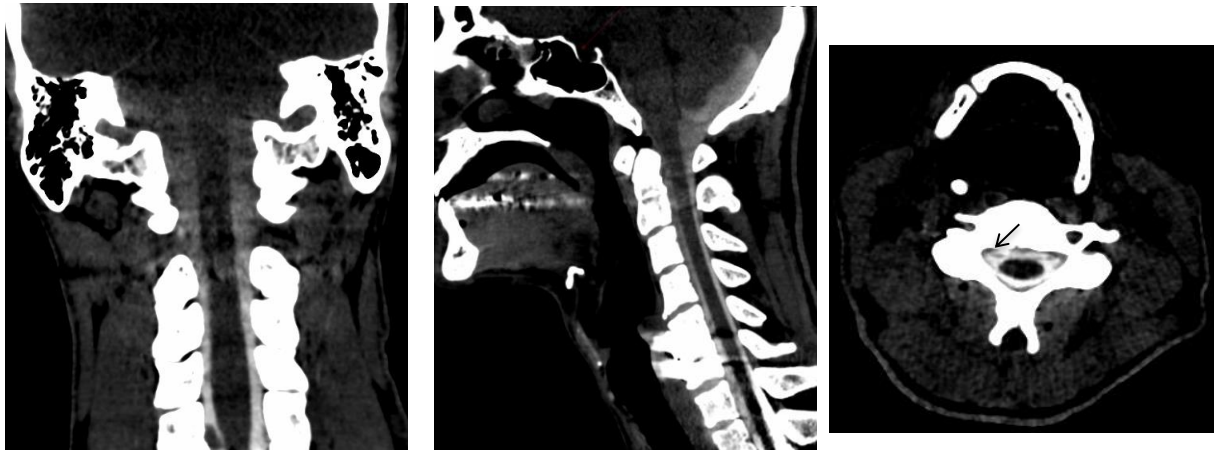


Figure 29. Exemple de Myelo-scanner : opacification de l'espace sous arachnoïdien par injection iodée et acquisition Tomodensitométrie multi-barrettes. A gauche : une coupe coronale, au milieu une coupe sagittale, à droite une coupe axiale. Le scanner multi-barrettes permet une reconstruction dans les 3 plans. A noter, à droite une très bonne visualisation des racines antérieures (flèche noire) qui sont « moulées » par le produit de contraste.

Myélo-IRM

Technique permettant la mise en évidence des espaces sous-arachnoïdiens sans injection de produit de contraste.

Ici on va utiliser des séquences T2 très fortement pondérées pour la mise en évidence des liquides. La résolution spatiale et la sensibilité de la technique sont donc moins importantes que pour le myélo-scanner, cependant il s'agit d'une technique moins invasive (pas d'injection) et non irradiante.

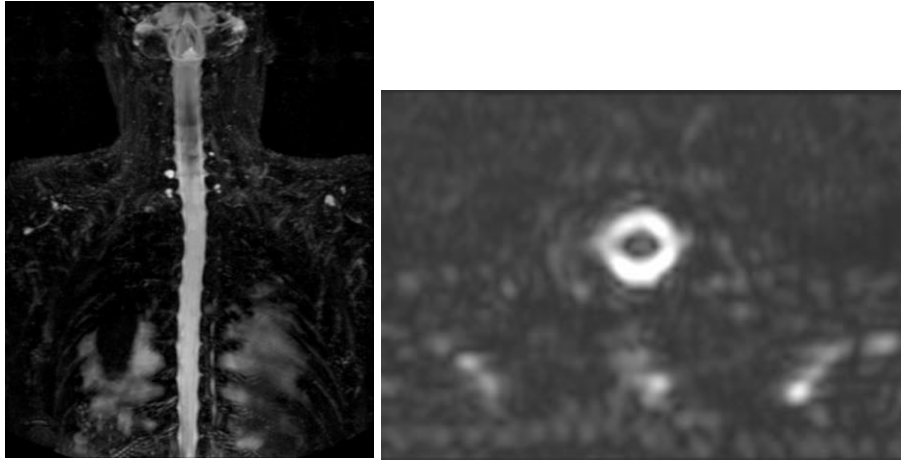


Figure 30. Exemples de myélo-IRM. Acquisition des images dans le plan coronal et reconstruction. Images très fortement pondérées en Séquence T2 avec à gauche une coupe coronale, à droite une coupe axiale au niveau thoracique. La discrimination spatiale semble moins bonne.

2 Résultats

1- Etude Anatomique

Six colonnes ont donc pu être étudiées après ouverture de l'ensemble des FIV de manière bilatérale.

Les racines spinales

A l'étage cervical

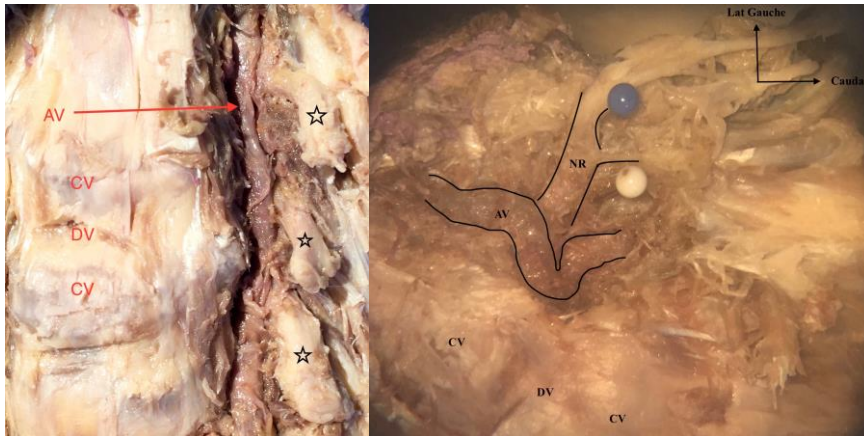
A cet étage, les racines sont horizontales à 90° dans le plan coronal car au même niveau que le métamère médullaire correspondant. Dans le plan axial, l'orientation est de 35 à 50° en direction ventrale et latérale. A la sortie du FIV, le contact se fait directement en ventral avec l'artère vertébrale dans son canal (Photographie 1).

Les racines ventrales et dorsales présentent, le plus souvent, un orifice dural distinct. Ces orifices sont séparés mais extrêmement proches et très latéralisés du fait de l'orientation des racines et de l'angle de raccordement médullaire.

Les racines sont le plus souvent enchâssées dans une enveloppe de DM commune (Photographie 2).

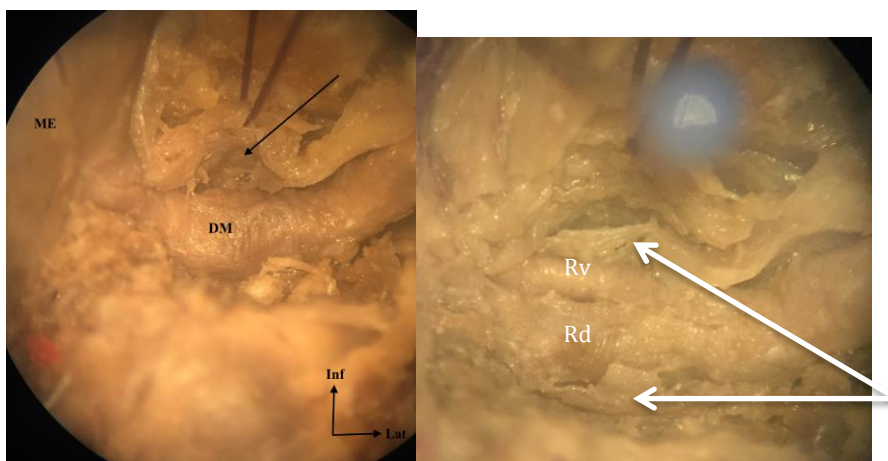
En moyenne la racine ventrale est composée de 3-4 radicules (moyenne : 3,5) et la racine dorsale de 2 à 4 radicules (moyenne : 2,3).

Le ganglion spinal a une taille moyenne de 5,6mm de longueur (5 à 7mm).



Photographie 1. Rapport avec l'artère vertébrale (AV). A gauche vue antérieure avec les corps vertébraux (CV), le disque inter vertébral (DV), l'artère vertébrale et les racines spinales (étoiles noires). L'AV est mise à nu après résection des processus transverses. A droite vue antéro latérale avec la racine spinale (NR).

La distance entre la ligne verticale passant par le bord médial des pédicules (entrée du FIV) et le ganglion spinal est de 4,4mm de moyenne (4mm à 5mm).



Photographie 2. Dissection des racines ventrale (Rv) et dorsale (Rd) C5 gauche. A gauche : avant ouverture de la DM (DM) ; à droite : après ouverture. Le périoste est parfaitement individualisable à ce niveau dans sa partie proximale (flèche noire). L'enveloppe méningée (Flèches blanches) à ce niveau est le plus souvent commune pour les 2 racines. ME=moelle épinière.

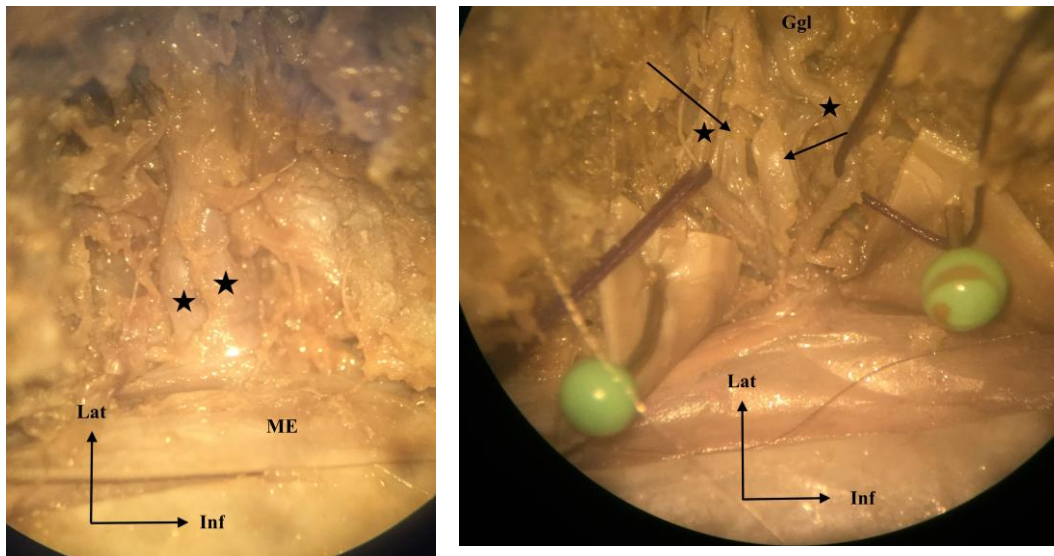
A l'Etage Thoracique

Les racines nerveuses deviennent de plus en plus obliques.

L'angle mesuré dans l'aisselle de la racine augmente progressivement de 5° à 10° en thoracique bas.

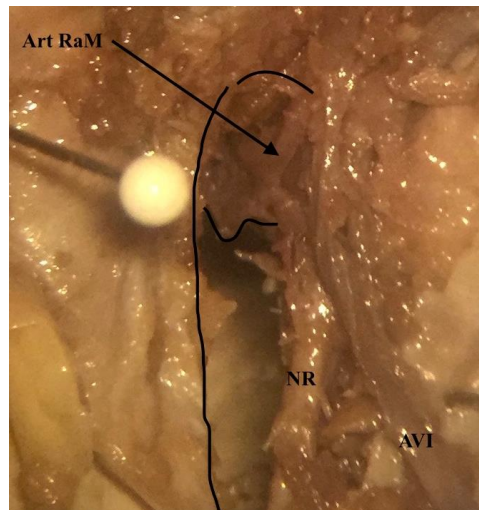
A cet étage les racines sont composées de 2 à 4 radicelles pour la racine ventrale (moyenne : 2,4) et de 2 à 5 radicelles dorsales (moyenne : 3,1), sans caractéristique de niveau. Les racines sortent de plus en plus obliques, avec plus fréquemment 2 orifices de sortie distincts.

Les enveloppes méningées sont aussi le plus souvent individuelles pour les 2 racines avec une enveloppe qui devient progressivement commune au niveau du ganglion spinal (Photographie 3).



Photographie 3. Racines thoraciques dans leur configuration la plus classique (étoiles). A gauche avant ouverture de DM; à droite: 2 racines différentes avec deux enveloppes de DM individualisées (flèches noires).

La distance entre le bord médial du pédicule et le ganglion spinal est de 3,8mm en moyenne (de 1.5mm à 8mm). La taille moyenne du ganglion spinal en longueur (distance entre le pôle proximal et distal) est de 6mm en moyenne (de 4mm à 12mm).



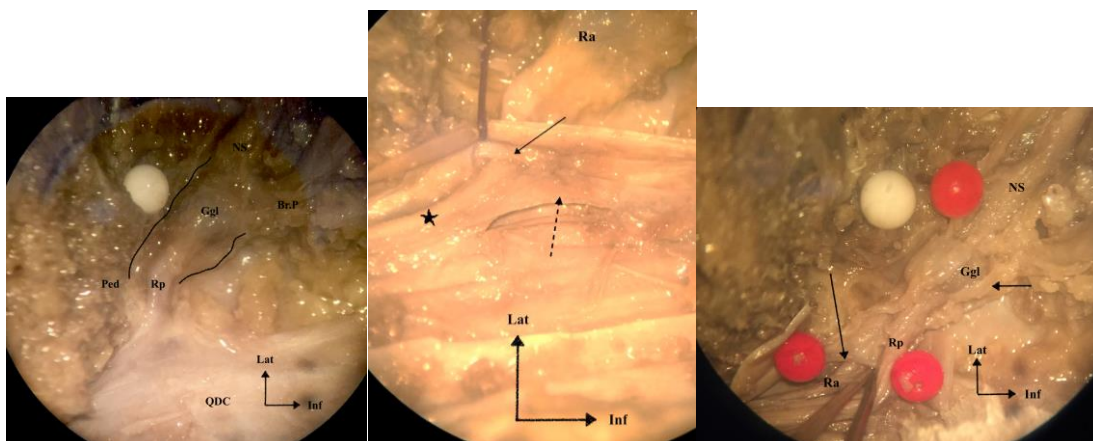
Photographie 4. Vue endo-thoracique du FIV thoracique droit. On retrouve le pédicule intercostal (AVI: artère et veine intercostales) et la racine spinale (NR). La branche dorsale de l'artère intercostale a un trajet intra-foraminal supérieur (artère radiculo-médullaire).

A l'étage Lombaire

Les racines sont obliques en bas et en dehors avec un angle de raccordement méningé qui augmente progressivement jusqu'à 45°.

Chaque racine se compose de 2 à 4 radicules dorsales (moyenne : 3,3) et ventrales (moyenne : 2,5). La configuration la plus souvent rencontrée est celle d'un orifice de sortie commun pour les 2 racines avec une enveloppe de DM commune.

Parfois on retrouvera soit 2 orifices distincts soit 2 enveloppes de DM par racine (plus rare, Photographie 5).



Photographie 5. Les racines lombaires. A gauche, visualisation de la racine dorsale avec son enveloppe durale dans le FIV. Au milieu la DM est ouverte, la racine (étoile) entourée de l'enveloppe arachnoïdienne (pointillés), l'orifice dural (flèche pleine noire) est mis en évidence. A droite, après ouverture de l'arachnoïde et dissection des racines (ventrale Ra et dorsale Rp). L'orifice de sortie est distinct entre les 2 racines (flèche noire pleine).

A cet étage, la distance moyenne entre l'entrée du FIV et le ganglion spinal est de 5,9mm (de 4mm à 7mm) et la taille moyenne du ganglion spinal est de 5mm (4mm à 7mm).

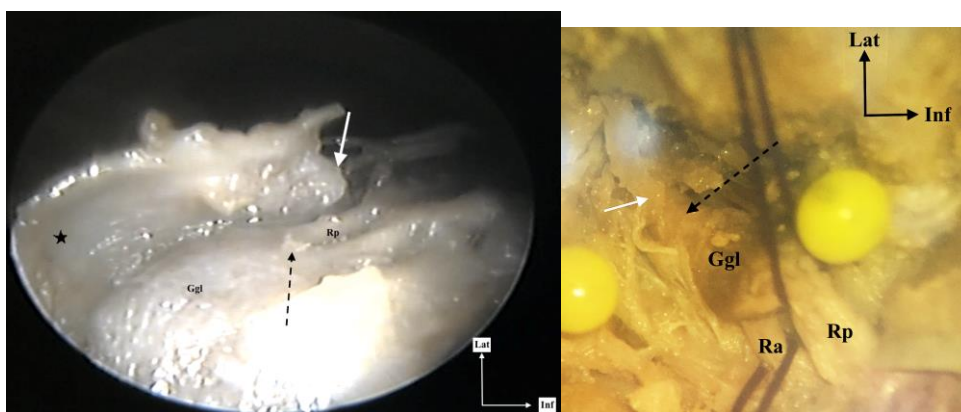
Caractéristiques des Méninges

Les dissections n'ont pas mis en évidence de différences majeures en fonction des différents étages vertébraux étudiés mais plusieurs configurations macroscopiques selon l'étage pour un même sujet.

Dure-mère

Sur l'ensemble des spécimens étudiés nous avons constaté :

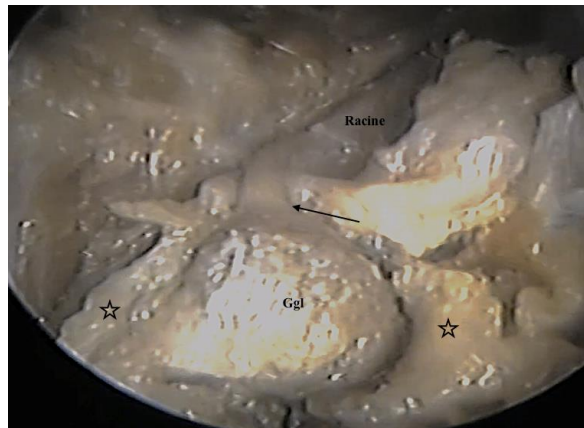
- soit une terminaison plutôt distale de la DM (Photographie 6) qui peut se poursuivre au delà du pôle distal du ganglion spinal et sur quelques millimètres. La DM engaine la racine dorsale à destinée sensitive latéralement sur quelques millimètres avant de se poursuivre par l'épinièvre. La distinction n'est pas toujours évidente macroscopiquement et seul le changement de consistance permet de différencier les 2 tissus.



Photographie 6. Terminaison (flèche blanche continue) de la DM (étoile noire) quelques millimètres après le pôle supérieur (flèche noire discontinue) du ganglion (Ggl). A gauche photo endoscopique ; à droite photo microscopique

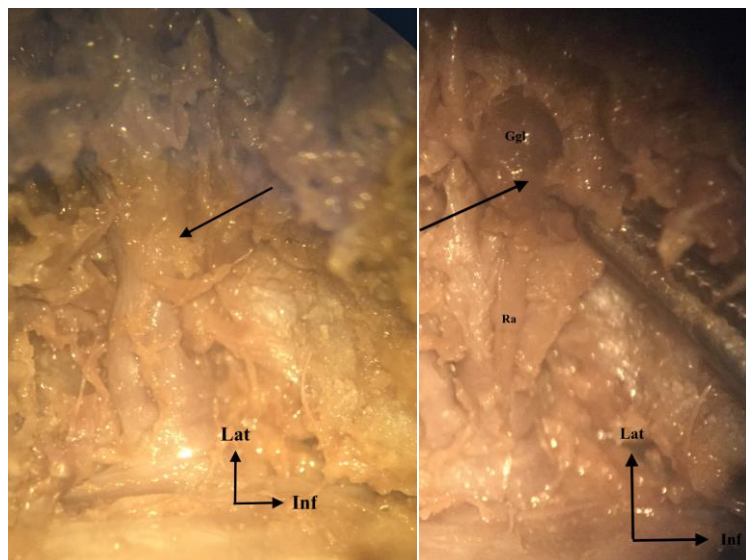
- soit une terminaison au niveau du pôle distal du ganglion lui-même (Photographie 7)

La DM se termine sur le pôle distal du ganglion réalisant une véritable capsule fibreuse difficile à disséquer car très adhérente.



Photographie 7. Vue endoscopique d'un ganglion (Ggl) dont la DM (étoile) se termine au niveau du pôle distal (flèche noire) pour se poursuivre par l'épinèvre.

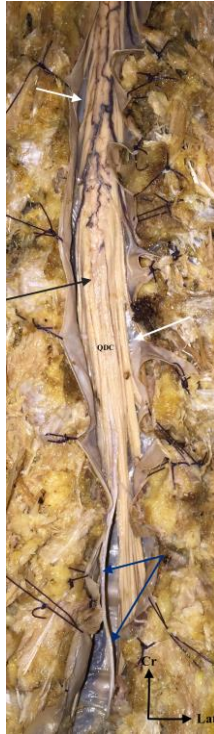
- soit, de manière plus exceptionnelle, plus précocement sur le ganglion. Dans ce cas, la DM s'affine en distalité et adhère au périoste (Photographie 8).



Photographie 8. Photographie d'une racine thoracique. A gauche avant ouverture de la DM. A droite après ouverture de DM, le périoste recouvre le pôle distal du ganglion spinal de manière étroite (flèche noire)

L'arachnoïde

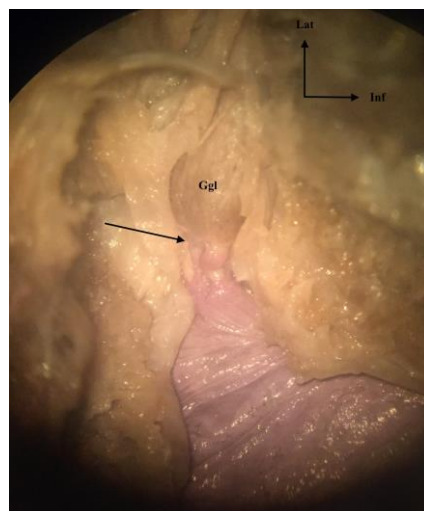
Du fait de la fragilité de l'arachnoïde et des espaces sous-arachnoïdiens cloisonnés, une injection au latex coloré a été faite avant ouverture durale.



Photographie 9. La moelle épinière basse, le cône terminal (flèche noire) et les racines de la queue de cheval (QDC). Les flèches blanches représentent la toile arachnoïdienne. Le filum terminal, expansion de la pie-mère (flèches bleues) s'étend du cône terminal à la face postérieure du coccyx pour se poursuivre par le ligament sacro-coccygien.

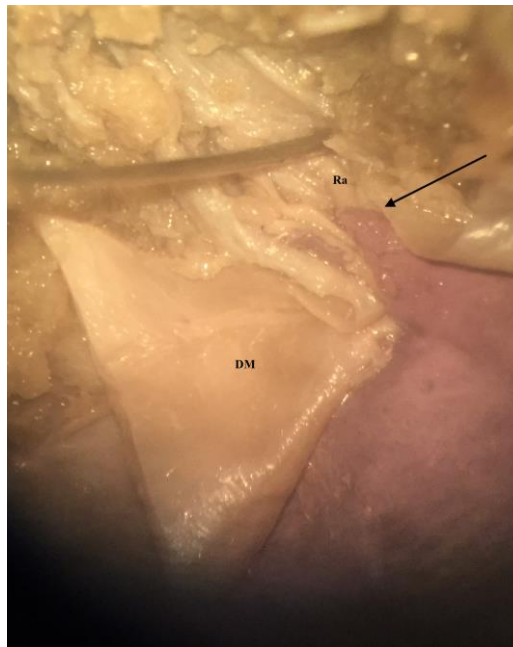
L'arachnoïde accompagne les racines dorsales et ventrales dans leur traversée durale le plus souvent individuellement (surtout lorsque les racines ont 2 enveloppes dures distinctes), sinon fortement accolée et dont il est difficile de préciser le caractère unique.

La terminaison de l'arachnoïde semble être le plus souvent le pôle proximal du ganglion spinal sous forme d'un réseau réticulaire, zone où on ne peut plus la disséquer (Photographie 10).



Photographie 10. Racine cervicale après ouverture de DM. On observe la diffusion du latex coloré en mauve jusqu'au pôle proximal du ganglion spinal sans fuite et sans diffusion au delà du ganglion.

Parfois cette extrusion ne semblait pas se terminer au niveau du ganglion (Photographie 11) mais quelques millimètres après l'orifice de sortie dural.

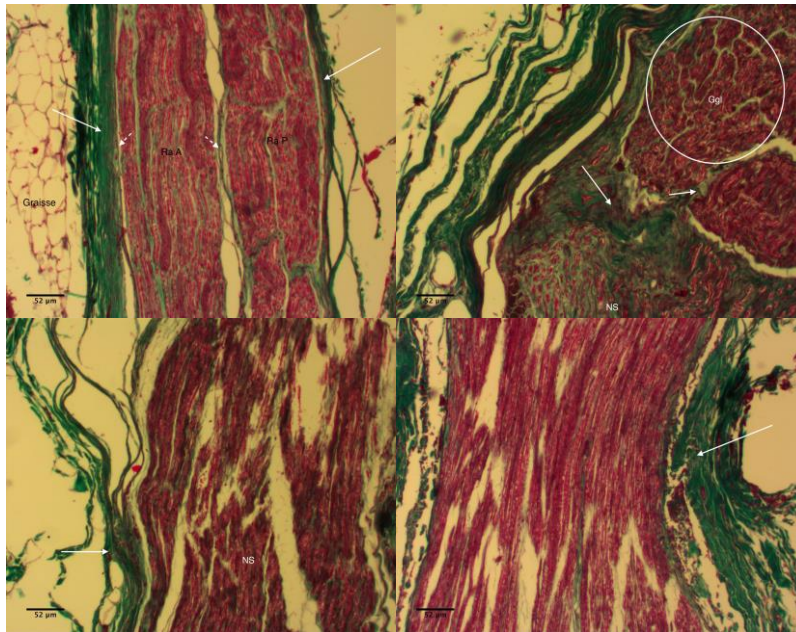


Photographie 11. Racine thoracique après ouverture durale. La diffusion du latex coloré s'arrête plus précocement sans atteindre le ganglion spinal.

2- Etude histologique

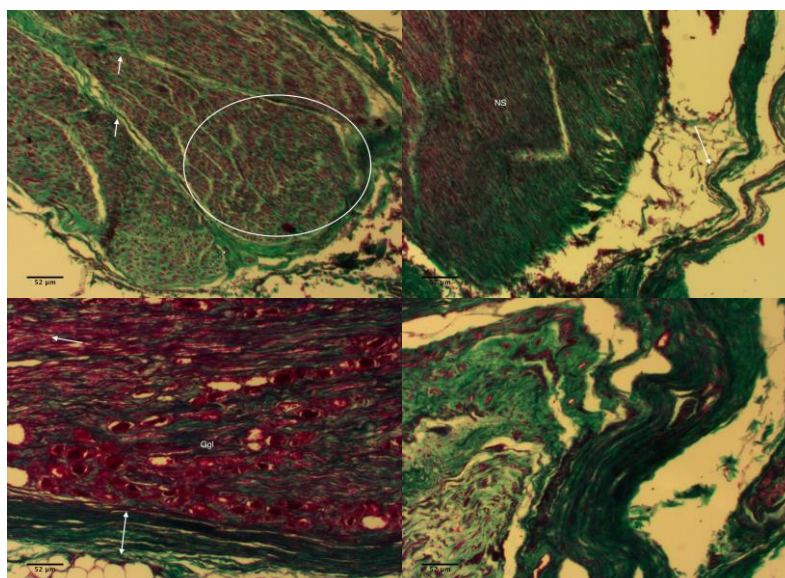
L'examen histologique se heurte à plusieurs obstacles :

- la conservation formolée des sujets dégrade les tissus ce qui rend l'analyse plus compliquée du fait d'artefacts de conservation.
- l'orientation des pièces a été difficile, malgré les précautions prises.
- l'absence de marquage spécifique des cellules méningo-épithéliales (olig-2) ou fibroblastiques.



Coupe 1. Analyse d'une pièce lombaire au trichrome de Masson (x16 et x32). En haut à gauche, les 2 racines entourées d'une épaisse couche fibreuse de collagène (coloration verte) (flèches blanche) périphérique avec une couche plus fine interne, où sont visualisées des cellules d'allure méningothéliale (flèches pointillées). Ces racines (Ra) se rassemblent au niveau du ganglion (Ggl) en haut à droite et se poursuivent par le nerf spinal en bas à gauche. La photographie en bas à droite correspond à la jonction racine – ganglion spinal.

Les fibres de collagènes épaisses entourant les racines ventrales et dorsales semblent cohésives et se terminer au niveau du pôle distal du ganglion où de nombreux septa sont visualisés avec un cloisonnement complexe des cellules ganglionnaires. Cette couche semble se terminer à ce niveau dans cet échantillon. Le tissu nerveux périphérique est entouré d'une couche fibreuse moins épaisse mais en continuité parfaite avec la précédente.

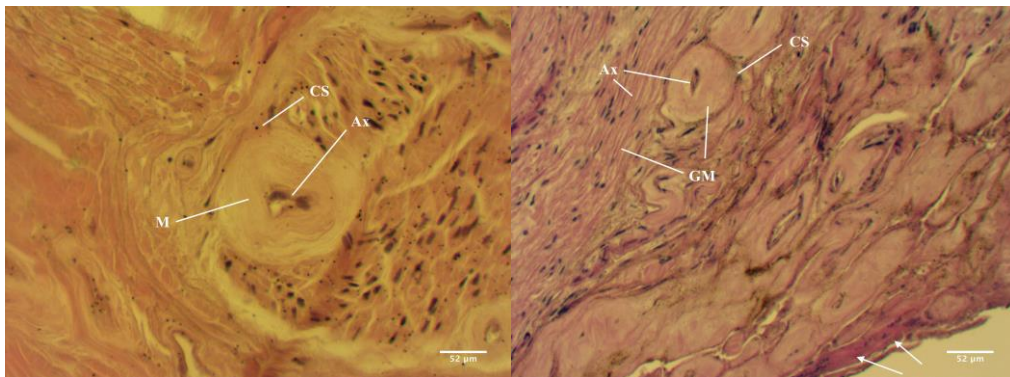


Coupe 2. Echantillon cervical coloré au Trichrome de Masson (x16, x32). On retrouve le ganglion spinal (en haut à gauche) avec ses cellules arrondies typiques. La photo en bas à gauche est un zoom sur cette région (x32). On notera l'épaisseur de la capsule avec les travées importantes (flèches pleines blanches) où les vaisseaux sont présents (flèche blanche pointillée). A droite, la zone de jonction Ganglion spinal – racines spinale.

Après analyse d'un autre échantillon cervical (Coupe 2) on retrouve :

- le ganglion spinal (Ggl) avec ses cellules arrondies entourées de travées fibreuses collagéniques d'origine capsulaire,
- les vaisseaux ganglionnaires dans les travées,
- les fibres nerveuses du nerf spinal sous forme de cellules allongées,
- d'épaisses couches de collagène marquées en vert par le trichrome de Masson qui s'étendent des racines antérieures et postérieures au ganglion spinal

Dans cet échantillon, nous n'observerons pas de limite franche au niveau du pôle distal du ganglion. La zone de transition apparaît sans particularité.

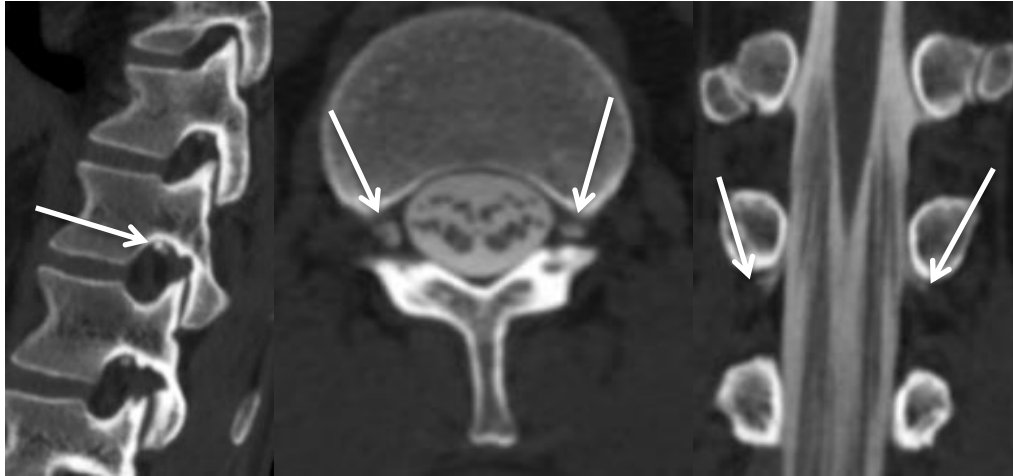


Coupe 3. Coloration HES à la jonction ganglion cervical – nerf périphérique. La coloration permet de mettre en évidence quelques rares axones dans le plan transversal (Ax), myélinisés (M) par les cellules de Schwann (CS). Les fibres axonales longitudinales sont plus nombreuses et entourées de leur gaine de myéline (GM). En bordure de la structure le tissu de soutien est continu et on observe quelques cellules bordantes (flèches blanches) de soutien.

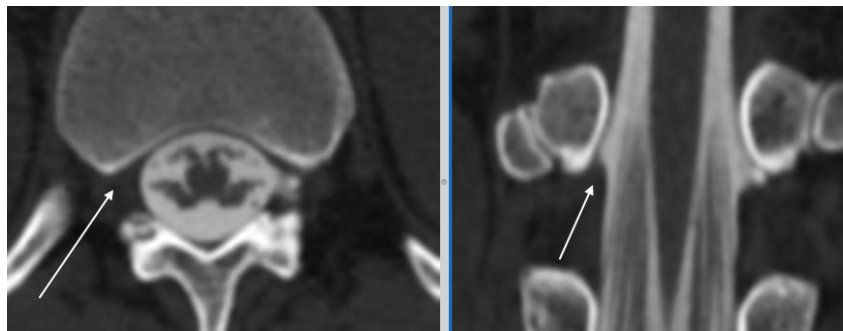
3- Radiologiques

On observe les racines avec une diffusion du produit de contraste iodé jusqu'au pôle proximal du ganglion spinal réalisant un moulage du ganglion mais aussi des racines avec une diffusion très limitée de seulement quelques millimètres après l'émergence durale (Imagerie 1).

Les constatations sont parfois asymétriques entre les racines droites et gauches (Imagerie 2) chez un même sujet.

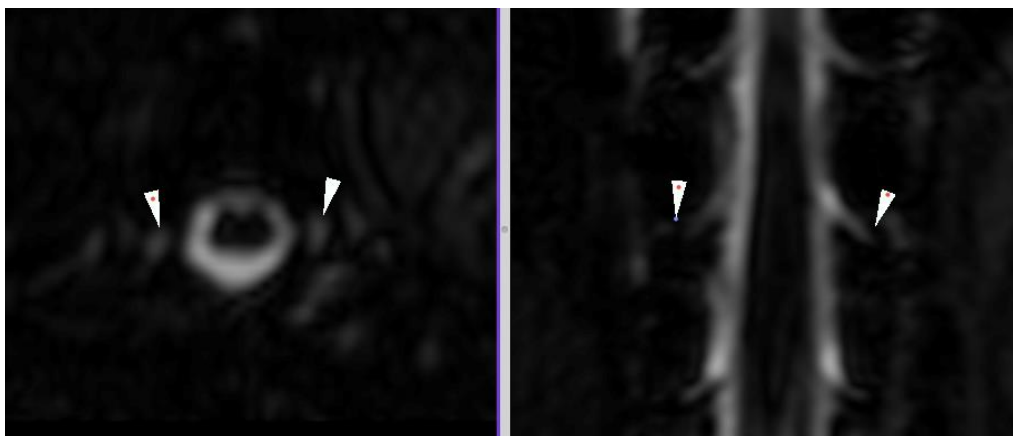


Imagerie 1. Myelo-scanner thoraco lombaire centré sur le cône terminal. On observe l'opacification des espaces sous-arachnoïdien jusqu'au ganglion spinal dans les 3 plans de l'espace (flèches blanches).



Imagerie 2. Coupe axiale (gauche) et coronale (droite) montrant une opacification asymétrique des ESA au niveau de la racine.

Les données du myélo-IRM recourent celles du myélo-scanner mais avec une moins bonne résolution spatiale (Imagerie 3).



Imagerie 3. Myélo IRM Thoracique. A gauche coupe axiale, à droite coupe coronale. On observe un hypersignal liquidien jusqu'au FIV sans pouvoir parfaitement distinguer le point de terminaison des ESA.

DISCUSSION

Les tumeurs des nerfs spinaux, à extension foraminale et/ou extra-foraminale, sont dans la grande majorité des cas des schwannomes (ou neurinomes). Ils représentent 30% des tumeurs intra-rachidiennes primitives. Ce sont des tumeurs sporadiques dans 90% des cas avec un pic d'incidence de la 4^e à la 6^e décade. Dans 5% des cas, ils surviennent dans le cadre des neurofibromatoses et ils sont d'emblée de localisations multiples, avec une discrète prédominance cervicale. Dans 5% des cas, on retrouve des schwannomes multiples sans neurofibromatose à l'analyse génétique.

Ces tumeurs, bénignes dans la très grande majorité des cas, se manifestent par des douleurs rachidiennes et des troubles neurologiques variables selon leur localisation et leur axe de développement. Il n'y a pas de parallélisme strict entre leur taille et la symptomatologie clinique. Leur développement très lent (5.45% par an, (56)) rend le diagnostic difficile avec un retard diagnostique fréquent (délai de 1 à 72 mois, (57)). Cela explique aussi les errances diagnostiques fréquentes surtout dans les formes à développement extra-foraminal et dans les localisations thoraciques en particulier (douleurs en hémi-ceinture).

Le diagnostic est radiologique. Même si un élargissement des foramina intervertébraux, voire une extension corporeale, sur les radiographies standards, ou sur les coupes tomodensitométriques, doivent être repérés (Figure 32), l'imagerie par résonance magnétique (IRM) est l'examen de choix pour évaluer la localisation précise et le type de développement du schwannome (foramen vertébral, foramen intervertébral, extra-foraminal) pour évaluer son retentissement (cavité syringomyélique, signes de souffrance médullaire, compression des viscères dans les formes extra-foraminales étendues) (Figure 31).

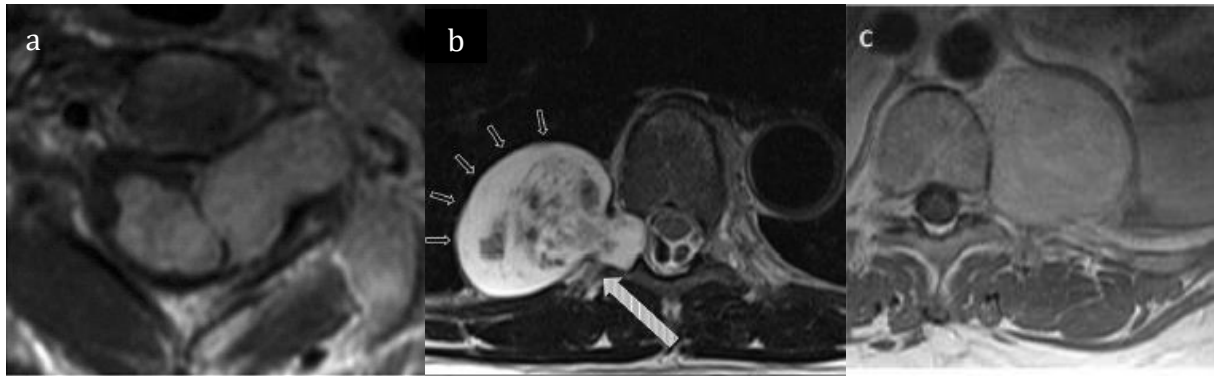


Figure 31 Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) en coupe axiale du rachis thoracique avec en (a) une tumeur intra canalaire avec extension extra-durale foraminale, en (b) une tumeur de la racine spinale dans le FIV avec extension thoracique sous-pleurale, en (c) une tumeur de la racine spinale à la sortie du FIV. Images tirées de (a) « Spinal dumbbell tumors » P. Celli et al. (57) ; « Treatment of large thoracic and lumbar paraspinial schwannoma » Krätzig et al (58).

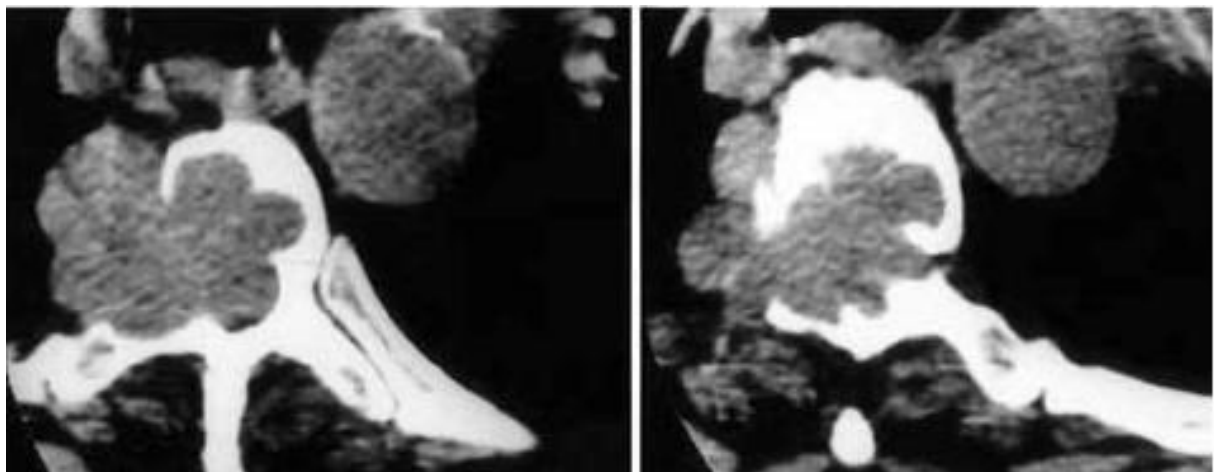


Figure 32 : TDM du rachis thoracique en coupe axiale et fenêtrage osseux. On note une importante érosion osseuse témoin de l'extension du processus tumoral au niveau : du corps vertébral, de la lame et de l'articulation costo-vertébrale droite. Cette extension se prolonge en intra-canalaire et para-vertébral antérieur. Photographies tirées de « Spinal extradural schwannoma » P. Celli et al. J Neurosurg: Spine 2:447-456, 2005 (57)

Le traitement de ces schwannomes des nerfs spinaux est essentiellement chirurgical. La planification opératoire dépend de leur localisation et de leur extension.

Le problème qui est posé dans ce travail est celui de l'étanchéité dure-mérienne pour éviter les fuites de liquide cérébro-spinal (LCS), et, en cas de fuite de LCS post-opératoire, quelles solutions privilégier pour y remédier. Ces fuites post-opératoires sont rapportées dans toutes les séries de la littérature, jusqu'à 14% des interventions.

Cette complication augmente significativement le temps d'hospitalisation, expose à des risques infectieux (méningite) et/ou aux complications de décubitus et à des problèmes de cicatrisation.

En post-opératoire, 3 tableaux cliniques, en cas de fuite de LCS, sont rencontrés :

- La fuite de LCS est visible, par écoulement au niveau de la cicatrice, le diagnostic est aisé.

- La fuite de LCS crée une méningocèle visible en sous-cutané, ou quelques cas de fistule pleurale dans les localisations thoraciques, de diagnostic plus difficile.
- La fuite n'est pas visible à l'observation, le tableau clinique est l'équivalent du « nude nerve root syndrom » (59)

Dans tous les cas, le tableau est celui d'une hypotension intracrânienne avec de façon constante des céphalées orthostatiques, instantanément résolutive en décubitus. En orthostatisme les nausées, vomissements et sensations vertigineuses sont fréquents. Dans 40% des cas, on peut constater des troubles oculomoteurs (atteintes du VI, III, et plus rarement du IV).

Plus rarement, ce qui est à l'origine de retard diagnostique de fuite de LCS, on observe des radiculopathies, un ralentissement idéomoteur, voire des troubles psychiatriques, faisant suspecter au début une méningite post-opératoire.

De façon plus rare, et en général en post-opératoire immédiat, des complications hémorragiques sont observées au niveau intra-crânien (hématome sous-dural aigu, hématome de fosse postérieure), l'hypotension intracrânienne entraînant une traction et donc éventuellement un arrachement des veines en pont au niveau intra-crânien.

Ces tumeurs des nerfs spinaux se développent généralement aux dépens de la racine sensitive du nerf spinal. Elles peuvent se développer exclusivement dans le foramen vertébral (compression médullaire lente, ou syndrome de la queue de cheval), elles peuvent s'étendre ou se situer exclusivement dans le foramen intervertébral et s'étendre en extra-foraminal et/ou dans les espaces paravertébraux.

Le schwannome peut être exclusivement développé en intra-dural, ou en intra et extra-dural, ou en exclusivement en extra-dural.

Les tumeurs se développant en foraminal et extra-foraminal sont dites « en sablier ». Parmi les schwannomes, les tumeurs en sablier représentent selon les séries 6% (38) à 15% (39) de ces tumeurs. Il n'y a pas de facteur prédisposant, et en particulier pas de prépondérance selon le sexe (38, 40, 41).

Dans une série de 118 tumeurs médullaires, Ozawa (60) rapporte 18% de tumeurs en sablier, dont 69% de schwannomes, et en propose une classification (Figure 33).

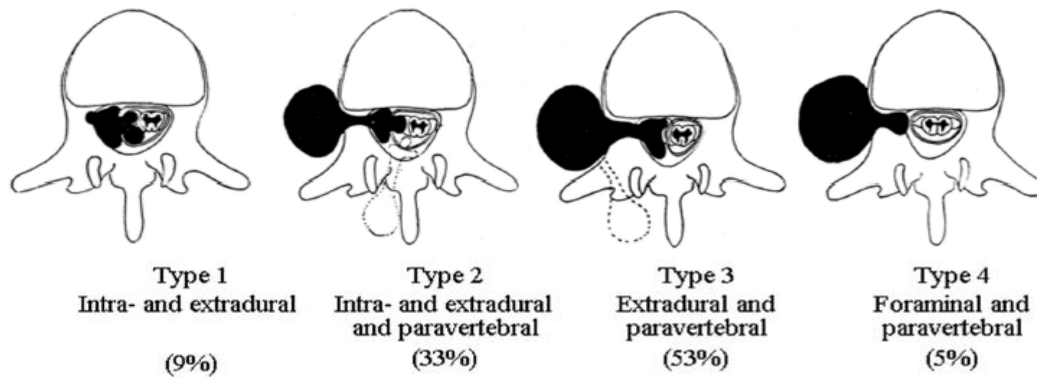


Figure 33 : Répartition des tumeurs en sablier sur 118 cas selon la classification de Eden. Tiré de « Spinal dumbbell tumors: an analysis of a series of 118 cases » HIROSHI OZAWA et al. *J Neurosurg Spine* 7:587–593, 2007 (60). Le type 3 est le plus fréquent avec un double contingent : paravertébral et extra-dural

Notre étude anatomique, histologique et radiologique avait pour but d'étudier au niveau du foramen intervertébral la terminaison des enveloppes méningées, dure-mère et arachnoïde, et leurs rapports avec les nerfs spinaux dans cette région, pour comprendre les modalités de développement des tumeurs en sablier, et essayer de parfaire la planification opératoire, et l'étanchéité méningée per-opératoire.

On observe en effet que la distance entre le bord médial des pédicules vertébraux, donc l'entrée du foramen intervertébral et le pôle proximal du ganglion spinal, est en moyenne de 4,4 mm en cervical, 3,8 mm en thoracique et 5,9 mm en lombaire. Donc une incision dure-mérienne dans l'axe de la racine, une fois ouvert le foramen intervertébral, laisse peu de place - surtout en thoracique - pour une suture étanche même si le fourreau dural est très élargi lors du développement de la tumeur, la méninge y est aussi très amincie.

Par ailleurs on note qu'en cervical et lombaire, l'enveloppe dure-mérienne est commune aux racines ventrale et dorsale du nerf spinal, alors qu'en thoracique, elle est le plus souvent distincte.

Lors des dissections anatomiques, on note que la terminaison de la dure-mère se fait selon 3 modalités :

- soit elle se termine au-delà du pôle distal du ganglion spinal pour se poursuivre avec l'épinèvre,
- soit elle se termine sur le ganglion spinal avec, dans ces cas, un épaississement fibreux important,
- soit elle se termine en pré-ganglionnaire, et contracte des adhérences avec le périoste du foramen intervertébral.

L'étude histologique ne permet pas d'observer de transition franche ou de limite concernant la dure-mère, mais l'étude histologique a été réalisée sur des tissus formolés bien que la dégradation par le formol ne concerne que les tissus les plus fragiles, ce qui n'est pas le cas de la dure-mère. Par ailleurs il est difficile de correctement orienter les coupes dans la région péri-ganglionnaire ; enfin, il n'y a pas de marquage spécifique pour les cellules méningo-épithéliales ou fibroblastiques.

Concernant l'arachnoïde, il s'agit d'une méninge très fragile à la dissection, avec un cloisonnement très variable des espaces sous-arachnoïdiens selon les individus, ce que l'on retrouve d'ailleurs en intracrânien concernant les citernes de la base. Aussi, avant de commencer toute dissection ou manipulation de la région, nous avons décidé de remplir l'espace sous-arachnoïdien de latex néoprène coloré sous faible pression, pour pouvoir mener à bien la dissection sans effet de tiraillement sur les feuillets ou les espaces arachnoïdiens.

On observe au niveau des racines dorsale et ventrale des nerfs spinaux deux feuillets arachnoïdiens distincts mais fortement accolés. Leur terminaison se fait en cul-de-sac, juste en amont du pôle proximal du ganglion spinal, ce cul-de-sac ayant la morphologie d'un réseau réticulaire, mais il n'y a pas de fuite du latex au-delà.

Il est noté quelques rares cas d'extrusion sur quelques millimètres au travers de la dure-mère, mais sans diffusion du produit de contraste.

Deux remarques :

- L'extrusion de l'arachnoïde au travers de la dure-mère sur quelques millimètres représente probablement l'emplacement des villosités arachnoïdiennes spinales, lieu de résorption du LCS vers le système veineux péri-dural ; ce qui explique que le latex, bien trop épais, ne diffuse pas à ce niveau.
- La terminaison de l'arachnoïde juste en amont du pôle proximal du ganglion spinal s'explique par le développement de l'arachnoïde dans tout l'axe crânio-spinal, avec au niveau des foramina intracrâniens ou intervertébraux, un manchon d'arachnoïde qui accompagne les structures vasculo-nerveuses. En chirurgie de la base du crâne, on observe dans les schwannomes vestibulaires, au niveau du méat acoustique interne, une différence dans la dissection de la tumeur par rapport au nerf facial. Si le

développement de la tumeur vestibulaire se fait en extra-arachnoïdien, la dissection est plus aisée, le cul-de-sac s'arrêtant bien avant le fond du méat. Alors que si le développement de la tumeur se fait en intra-arachnoïdien (le cul-de-sac arachnoïdien s'étendant jusqu'au fond du méat), la dissection est plus difficile car l'arachnoïde ne forme plus un plan de dissection entre la tumeur et le nerf facial. On peut d'ailleurs observer dans les petites tumeurs spinales foraminales, si on arrive à repérer et ne pas ouvrir le feuillet arachnoïdien, qu'il n'y a pas ou peu de fuite de LCS en per-opératoire.

Il serait intéressant en pré-opératoire de pouvoir analyser les espaces sous-arachnoïdiens et leur rapport avec la tumeur. Les myélo-scanners de très bonne qualité montrent bien que le système sous-arachnoïdien s'étend de façon variable latéralement dans les foramina intervertébraux, et parfois de façon différente à droite et à gauche chez un même individu.

Mais le myélo-scanner est un examen agressif, réalisé actuellement dans les seules contre-indications de l'IRM, et ne rend pas compte aussi bien que l'IRM de l'extension, du retentissement et des rapports de la tumeur.

L'IRM, avec les séquences T2, ne permet pas toujours de conclure dans les grosses tumeurs. On observe bien la dure-mère, mais très mal les limites arachnoïdiennes. Peut-être que les progrès en myélo-IRM, ou l'amélioration des séquences de flux de LCS, permettront de mieux appréhender les rapports du système sous-arachnoïdien avec la tumeur.

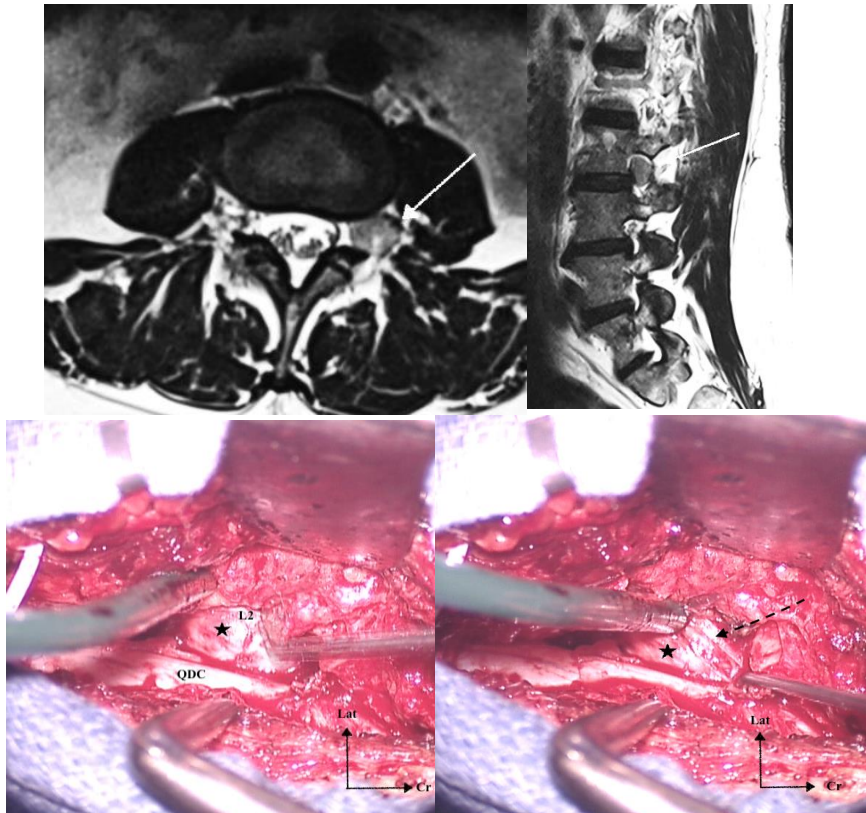
La zone de transition entre dure-mère et épinèvre est difficile à définir en pré et per-opératoire. De même il est le plus souvent difficile de définir en pré-opératoire si la tumeur est développée sur une radicelle sensitive en pré ou post-ganglionnaire. Or, si la tumeur est à développement post-ganglionnaire, le risque de fuite est beaucoup moins important et l'approche de la tumeur peut s'envisager par voie extra-foraminale sans exposition de l'ensemble du foramen intervertébral par arthrectomie.

Si la tumeur est à développement pré-ganglionnaire ou au contact du ganglion, le risque de fuite est beaucoup plus important, d'autant que la dure-mère est difficile à suturer car elle est amincie par la croissance tumorale, et le champ opératoire est étroit. L'approche postérieure classique est à privilégier car elle permet de mieux contrôler l'étanchéité.

Enfin, les nombreuses attaches ligamentaires que nous avons rappelées, entre la dure-mère et le périoste au sein du foramen intervertébral, mais aussi au niveau du foramen vertébral (surtout à

la partie ventrale du fourreau dural), expliquent que certaines déchirures peuvent survenir du fait de tractions lors de la dissection, et que la fuite de LCS n'est pas d'emblée visible en peropératoire. Ceci est bien connu en chirurgie des pathologies dégénératives du rachis lombaire.

Dans l'abord postérieur des tumeurs des nerfs spinaux, l'incision de la dure-mère est, pour les tumeurs en sablier, le plus souvent en T (Imagerie 4).



Imagerie 4. Exemple d'une patiente de 46 ans prise en charge dans le service pour un neurinome foraminaux L2/L3 gauche. L'IRM montre la localisation précise de la lésion et la dilatation du FIV. Les photographies peropératoires montrent la lésion radiculaire et l'ouverture durale (flèche pointillée noire) le long de l'axe de la racine L2 pour exposer la tumeur dans le FIV (étoile noire). Remerciements au Pr Liguoro pour ces photographies peropératoires.

Certains auteurs ont suggéré des incisions séparées ((61)) pour limiter les problèmes d'étanchéité, estimant que dans les incisions en T il existait un point de faiblesse au niveau du point central.

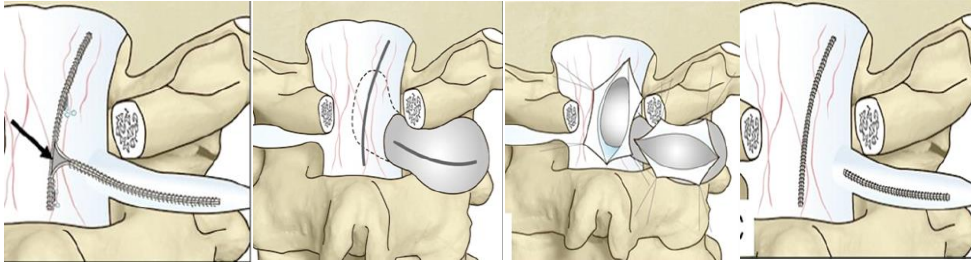


Figure 34. Schématisation des incisions possibles. A gauche une seule incision avec point de faiblesse à la confluence. A droite schéma avec 2 incisions séparées qui permettent l'exérèse des 2 portions puis la réalisation de 2 fermetures disjointes. D'après ITO (2016)

Une fois la suture dure-mérienne réalisée, s'il n'y a pas de défaut, une hyperventilation peut être demandée au médecin anesthésiste, ce qui augmente la pression veineuse et donc la pression du LCS, et permet de vérifier l'étanchéité de la suture. La plupart des chirurgiens complètent par une apposition de colle.

En cas de défaut dure-mérien, plusieurs substituts sont utilisés :

- Fragments de muscles ou de fascia prélevés sur la voie d'abord. C'est un tissu autologue mais localement précieux.
- Des substituts type patches, résorbables ou non résorbables. De nombreuses spécialités voient le jour, avec couche collagénique ou non.

Nous utilisons de la graisse maintenue par de la colle biologique. La graisse est prélevée sur l'abord opératoire car c'est un tissu abondant, hydrophobe, autologue et facilement manipulable. De plus en plus, la littérature s'accorde pour mettre la graisse au premier plan dans la réalisation de l'étanchéité en chirurgie crânienne (fosse postérieure, hypophysaire) et spinale (62).

En post-opératoire, le décubitus dorsal pendant 48h avec un lever progressif ensuite, nous semble préférable afin d'éviter de mettre les sutures en tension d'emblée.

Certains auteurs ont proposé une décharge de l'espace sous-arachnoïdien afin de permettre la cicatrisation des enveloppes méningées en post-opératoire immédiat :

- La ponction lombaire soustractive post-opératoire immédiate qui crée une brèche volontaire au niveau du sac dural, le LCS continuant pendant quelques heures à s'écouler, ce qui décharge la suture et facilite le début de la cicatrisation.
- La pose d'un drain lombaire externe : il existe un risque infectieux supplémentaire, et en cas de surveillance insuffisante ou de positionnement incorrect, un gros risque d'hypotension intracrânienne subaiguë et des risques hémorragiques intracrâniens.

- La pose d'une DVE. Elle ne doit pas être systématique, mais elle peut être utile dans certaines tumeurs du rachis cervical haut ;

En cas de fuite post-opératoire :

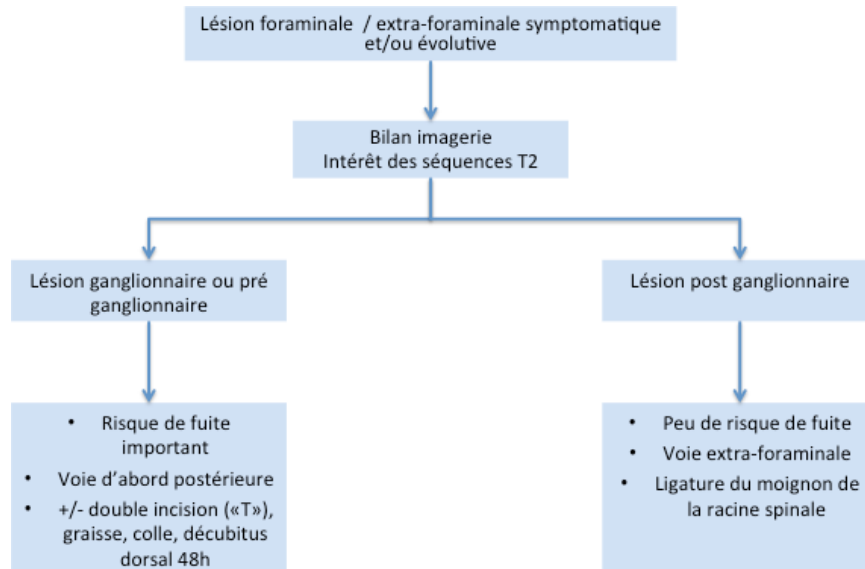
- La fuite est visible, avec écoulement par la cicatrice. Le patient doit être maintenu à plat strict. Plusieurs solutions de première intention, plus ou moins associées sont :
 - des ponctions lombaires soustractives itératives, en fonction du site opératoire
 - du glycérol en sirop ou de l'Acétazolamide (en l'absence de contre-indication et en surveillant la kaliémie) pour diminuer la sécrétion et le volume de LCS

En cas d'inefficacité, la reprise chirurgicale est incontournable.

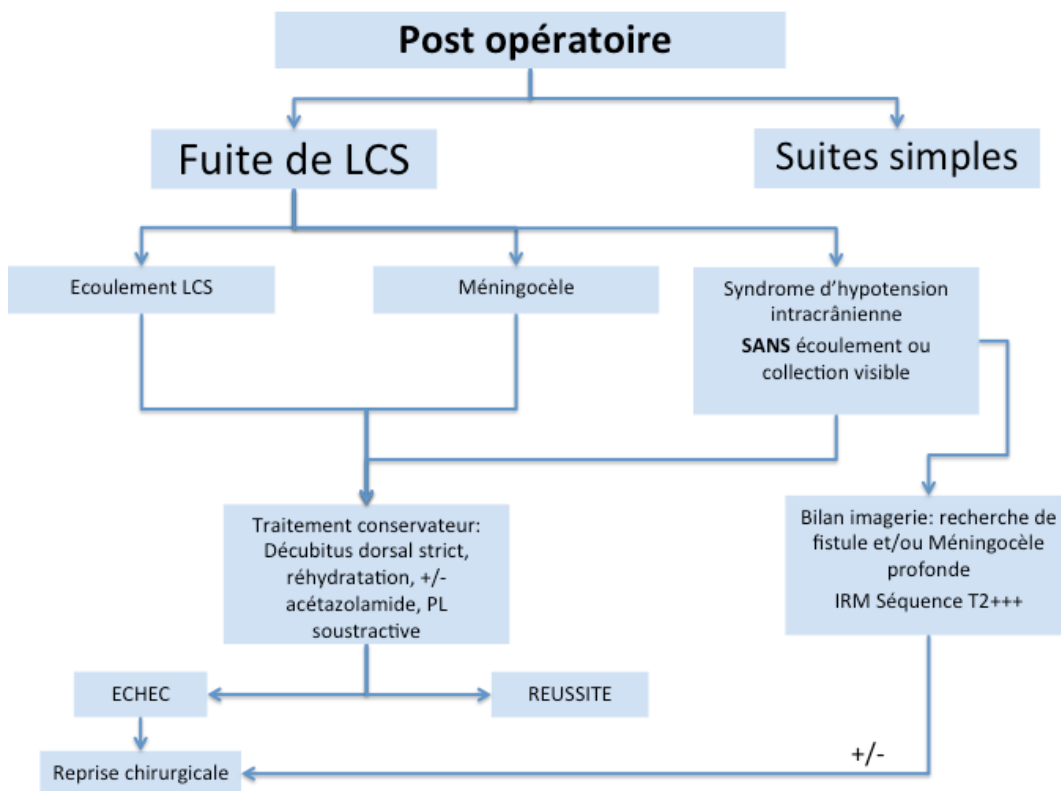
Le drainage lombaire ou la dérivation ventriculaire externe ne sont indiqués que dans les défauts méningés complexes ou la localisation de brèches difficiles d'accès.

- Méningocèle sous-cutané : la prise en charge est identique.
- Syndrome d'hypotension intracrânienne, sans fuite clinique, à part dans le cas des fistules pleurales lors d'abord de la colonne thoracique. Il faut rechercher le lieu précis de la fuite, le tableau est celui décrit comme le « nude nerve root syndrom » (59) avec myélo-scanner, myélo-IRM, et le traitement est généralement chirurgical.

- Proposition d'un algorithme de prise en charge des tumeurs des nerfs spinaux



- Proposition d'un algorithme de prise en charge des fuites de LCS post opératoires



CONCLUSION

Notre travail anatomique et la revue de la littérature anatomique ont permis de préciser les rapports méningés des nerfs spinaux dans les foramina intervertébraux.

Ce travail avait pour but d'optimiser la prise en charge chirurgicale des tumeurs des nerfs spinaux concernant l'abord opératoire et la prévention de la complication principale que sont les fuites de LCS. Ces fuites de LCS augmentent la durée d'hospitalisation, exposent aux risques infectieux et aux risques liés au décubitus prolongé.

La classification des tumeurs en sablier (intradurales, intra et extradurales, extradurales), en fonction de la formation du schwannome aux dépens des radicules de la racine dorsale sensitive, en amont, au niveau, ou en aval du ganglion spinal, permet une planification opératoire différente : abord postérieur classique ou abord extraforaminal.

La terminaison de la dure-mère au niveau du foramen intervertébral se fait selon 3 configurations : pré-ganglionnaire et la dure-mère contracte des adhérences avec le périoste, ganglionnaire avec un épaissement fibreux localisé et péri-ganglionnaire, post-ganglionnaire où la dure-mère est en continuité avec l'épinèvre.

Nous avons montré que le « cul-de-sac » arachnoïdien se termine plus ou moins latéralement dans le foramen intervertébral, permettant de distinguer des schwannomes des nerfs spinaux intra et extra-arachnoïdiens, ce qui modifie la dissection et les risques de fuite post-opératoire.

Le meilleur moyen en per-opératoire d'obtenir une bonne étanchéité dure-mérienne, et surtout en cas de perte de substance, semble être l'utilisation conjointe de graisse et de colle biologique.

Lorsque la fuite de LCS est présente (extériorisée par la cicatrice, méningocèle ou hypotension intra-crânienne), différents moyens sont utilisés pour éviter la reprise chirurgicale, ces moyens sont assez différents selon les équipes.

Nous proposons donc de poursuivre ce travail dans 2 directions :

- 1- un travail conjoint avec les neuroradiologues pour
 - évaluer l'apport de la myélo-IRM en pré-opératoire pour optimiser le choix de la voie d'abord ; en particulier il serait intéressant de savoir avant l'incision dure-mérienne per-opératoire, si la tumeur est intra ou extra-arachnoïdienne.
 - localiser précisément la fuite de LCS post-opératoire dans les cas de méningocèle ou d'hypotension intracrânienne notamment.

- 2- En cas de fuite de LCS post-opératoire, certains facteurs favorisants ne sont qu'exceptionnellement consignés dans la littérature, tels l'obésité, les efforts (toux, dyspnée, constipation), facteurs pourtant bien connus en chirurgie de la base du crâne.

Une étude prospective des patients opérés de tumeurs en sablier, avec fuite de LCS post-opératoire, permettrait d'évaluer précisément, en fonction de la localisation cervicale, thoracique ou lombaire, de la taille et du développement de la tumeur, l'efficacité des moyens mis en œuvre, les délais de résolution et le pourcentage de reprises chirurgicales.

BIBLIOGRAPHIE

1. Saga Y, Takeda H. The making of the somite: molecular events in vertebrate segmentation. *Nat Rev Genet.* 2001 Nov;2(11):835–45.
2. Corallo D, Trapani V, Bonaldo P. The notochord: structure and functions. *Cell Mol Life Sci.* 2015 Aug;72(16):2989–3008.
3. Kaplan KM, Spivak JM, Bendo JA. Embryology of the spine and associated congenital abnormalities. *Spine J.* 2005 Sep;5(5):564–76.
4. Van Schoor A-N, Bosman MC, Bosenberg AT. Descriptive study of the differences in the level of the conus medullaris in four different age groups: Level of Spinal Cord Termination. *Clin Anat.* 2015 Jul;28(5):638–44.
5. Sakka L, Gabrillargues J, Coll G. *Anatomy of the Spinal Meninges: Neurosurgery.* 2015 Oct;1.
6. Sakka L, Chazal J. Les méninges vues par l’anatomiste. *Morphologie.* 2005;89(284):35–42.
7. O’Rahilly R, Müller F. The meninges in human development. *J Neuropathol Exp Neurol.* 1986 Sep;45(5):588–608.
8. Sensenig EC. The early development of the human vertebral column. *Contrib Embryol.* 1949 Feb;33(213-221):21–42.
9. Parkinson D. Human spinal arachnoid septa, trabeculae, and “rogue strands.” *Am J Anat.* 1991 Dec;192(4):498–509.
10. Vandenabeele F, Creemers J, Lambrichts I. Ultrastructure of the human spinal arachnoid mater and dura mater. *J Anat.* 1996;189(Pt 2):417.
11. Patelska-Banaszewska M, Woźniak W. The development of the epidural space in human embryos. *Folia Morphol.* 2004 Aug;63(3):273–9.
12. Kido DK, Gomez DG, Pavese Jr AM, Potts DG. Human spinal arachnoid villi and granulations. *Neuroradiology.* 1976;11(5):221–8.
13. Sakka L, Coll G, Chazal J. Anatomy and physiology of cerebrospinal fluid. *Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis.* 2011 Dec;128(6):309–16.
14. Sioutas G, Kapetanakis S. Clinical anatomy and clinical significance of the cervical intervertebral foramen: a review. *Folia Morphol.* 2016 Jun 6;75(2):143–8.
15. Kitagawa T, Fujiwara A, Kobayashi N, Saiki K, Tamai K, Saotome K. Morphologic changes in the cervical neural foramen due to flexion and extension: in vivo imaging study. *Spine.* 2004 Dec 15;29(24):2821–5.

16. Rühli FJ, Müntener M, Henneberg M. Human osseous intervertebral foramen width. *Am J Phys Anthropol.* 2006 Feb;129(2):177–88.
17. Bose K, Balasubramaniam P. Nerve root canals of the lumbar spine. *Spine.* 1984 Feb;9(1):16–8.
18. Cramer GD, Cantu JA, Dorsett RD, Greenstein JS, McGregor M, Howe JE, et al. Dimensions of the lumbar intervertebral foramina as determined from the sagittal plane magnetic resonance imaging scans of 95 normal subjects. *J Manipulative Physiol Ther.* 2003 Apr;26(3):160–70.
19. Fujiwara A, An HS, Lim TH, Haughton VM. Morphologic changes in the lumbar intervertebral foramen due to flexion-extension, lateral bending, and axial rotation: an in vitro anatomic and biomechanical study. *Spine.* 2001 Apr 15;26(8):876–82.
20. Revel M, Mayoux-Benhamou MA, Aaron C, Amor B. [Morphological variations of the lumbar foramina during flexion-extension and disk collapse]. *Rev Rhum Mal Osteoartic.* 1988 Apr 1;55(5):361–6.
21. Akdemir G. Thoracic and lumbar intraforaminal ligaments: Laboratory investigation. *J Neurosurg Spine.* 2010;13(3):351–5.
22. Kraan GA, Hoogland PVJM, Wuisman PIJM. Extraforaminal ligament attachments of the thoracic spinal nerves in humans. *Eur Spine J.* 2009 Apr;18(4):490–8.
23. Cramer GD, Skogsbergh DR, Bakkum BW, Winterstein JF, Yu S, Tuck NR. Evaluation of transforaminal ligaments by magnetic resonance imaging. *J Manipulative Physiol Ther.* 2002 May;25(4):199–208.
24. Marić DL, Krstonošić B, Erić M, Marić DM, Stanković M, Milošević NT. An anatomical study of the lumbar external foraminal ligaments: appearance at MR imaging. *Surg Radiol Anat.* 2015 Jan;37(1):87–91.
25. Amonoo-Kuofi HS, el-Badawi MG, Fatani JA. Ligaments associated with lumbar intervertebral foramina. 1. L1 to L4. *J Anat.* 1988;156:177.
26. Chau AMT, Pelzer NR, Hampton J, Smith A, Seex KA, Stewart F, et al. Lateral extent and ventral laminar attachments of the lumbar ligamentum flavum: cadaveric study. *Spine J.* 2014 Oct;14(10):2467–71.
27. N'da HA, Chenin L, Capel C, Havet E, Le Gars D, Peltier J. Microsurgical anatomy of the Adamkiewicz artery - anterior spinal artery junction. *Surg Radiol Anat.* 2016 Jul;38(5):563–7.
28. Bolton B. The blood supply of the human spinal cord. *J Neurol Psychiatry.* 1939;2(2):137.
29. Namba K. Vascular Anatomy of the Cauda Equina and Its Implication on the Vascular Lesions in the Caudal Spinal Structure. *Neurol Med Chir (Tokyo).* 2016;56(6):310–6.
30. Biglioli P, Roberto M, Cannata A, Parolari A, Fumero A, Grillo F, et al. Upper and lower

spinal cord blood supply: the continuity of the anterior spinal artery and the relevance of the lumbar arteries. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2004 Apr;127(4):1188–92.

31. Yuan C, Zhu H, Song D, Wei W, Zhu R, Mei X, et al. Impact and clinical significance of pedicle length on spinal canal and intervertebral foramen area. *Int J Clin Exp Med.* 2014;7(1):163–9.

32. Demondion X, Lefebvre G, Fisch O, Vandenbussche L, Cepparo J, Balbi V. Radiographic anatomy of the intervertebral cervical and lumbar foramina (vessels and variants). *Diagn Interv Imaging.* 2012 Sep;93(9):690–7.

33. Lasjaunias PL, Berenstein A, Raybaud C. *Surgical neuroangiography.* Berlin ; New York: Springer-Verlag; 1987. 1 p.

34. Santillan A, Nacarino V, Greenberg E, Riina HA, Gobin YP, Patsalides A. Vascular anatomy of the spinal cord. *J Neurointerventional Surg.* 2012 Jan 1;4(1):67–74.

35. Rusnak-Smith S, Moffat M, Rosen E. Anatomical variations of the scalene triangle: dissection of 10 cadavers. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001;31(2):70–80.

36. Arslan M, Cömert A, Açar Hİ, Özdemir M, Elhan A, Tekdemir İ, et al. Lumbosacral intrathecal nerve roots: an anatomical study. *Acta Neurochir (Wien).* 2011 Jul;153(7):1435–42.

37. Liu Y, Zhou X, Ma J, Ge Y, Cao X. The diameters and number of nerve fibers in spinal nerve roots. *J Spinal Cord Med.* 2015 Jul;38(4):532–7.

38. d'Avella D, Mingrino S. Microsurgical anatomy of lumbosacral spinal roots. *J Neurosurg.* 1979 Dec;51(6):819–23.

39. Canbay S, Gürer B, Bozkurt M, Comert A, Izci Y, Başkaya MK. Anatomical relationship and positions of the lumbar and sacral segments of the spinal cord according to the vertebral bodies and the spinal roots: Anatomical Relations of the Lumbosacral Spine. *Clin Anat.* 2014 Mar;27(2):227–33.

40. Suh S-W, Shingade VU, Lee SH, Bae JH, Park CE, Song JY. Origin of lumbar spinal roots and their relationship to intervertebral discs. *Bone Jt J.* 2005;87(4):518–22.

41. Suh SW. Origin of lumbar spinal roots and their relationship to intervertebral discs: A CADAVER AND RADIOLOGICAL STUDY. *J Bone Jt Surg - Br Vol.* 2005 Apr 1;87-B(4):518–22.

42. Shen J, Wang H-Y, Chen J-Y, Liang B-L. Morphologic analysis of normal human lumbar dorsal root ganglion by 3D MR imaging. *Am J Neuroradiol.* 2006;27(10):2098–103.

43. Vialle E, Vialle LR, Contreras W, Jacob C. Anatomical study on the relationship between the dorsal root ganglion and the intervertebral disc in the lumbar spine. *Rev Bras Ortop Engl Ed.* 2015 Jul;50(4):450–4.

44. Cohen MS, Wall EJ, Brown RA, Rydevik B, Garfin SR. 1990 AcroMed Award in basic

science. Cauda equina anatomy. II: Extrathecal nerve roots and dorsal root ganglia. *Spine*. 1990 Dec;15(12):1248–51.

45. Ebraheim NA, Jabaly G, Xu R, Yeasting RA. Anatomic relations of the thoracic pedicle to the adjacent neural structures. *Spine*. 1997 Jul 15;22(14):1553–6; discussion 1557.

46. Scali F, Pontell ME, Nash LG, Enix DE. Investigation of meningomyovertebral structures within the upper cervical epidural space: a sheet plastination study with clinical implications. *Spine J Off J North Am Spine Soc*. 2015 Nov 1;15(11):2417–24.

47. Shi B, Zheng X, Min S, Zhou Z, Ding Z, Jin A. The morphology and clinical significance of the dorsal meningovertebra ligaments in the cervical epidural space. *Spine J*. 2014 Nov;14(11):2733–9.

48. Chen R, Shi B, Zheng X, Zhou Z, Jin A, Ding Z, et al. Anatomic study and clinical significance of the dorsal meningovertebral ligaments of the thoracic dura mater. *Spine*. 2015 May 15;40(10):692–8.

49. Tubbs RS, Lobashevsky A, Oakes P, D'Antoni AV, Hattab E, Topp K, et al. Meningeal relationships to the spinal nerves and rootlets: a gross, histological, and radiological study with application to intradural extramedullary spinal tumors. *Childs Nerv Syst*. 2015 May;31(5):675–81.

50. Sunderland S. Meningeal-neural relations in the intervertebral foramen. *J Neurosurg*. 1974;40(6):756–63.

51. Brierley JB. The penetration of particulate matter from the cerebrospinal fluid into the spinal ganglia, peripheral nerves, and perivascular spaces of the central nervous system. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 1950;13(3):203–15.

52. Rengachary SS, Pelle D, Guthikonda M. Contributions of Johann jacob Huber to the surface anatomy of the spinal cord and meninges. *Neurosurgery*. 2008 Jun;62(6):1370–3; discussion 1373–4.

53. Adeeb N, Mortazavi MM, Deep A, Griessenauer CJ, Watanabe K, Shoja MM, et al. The pia mater: a comprehensive review of literature. *Childs Nerv Syst ChNS Off J Int Soc Pediatr Neurosurg*. 2013 Oct;29(10):1803–10.

54. Epstein BS. An anatomic, myelographic and cinemyelographic study of the dentate ligaments. *Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med*. 1966 Nov;98(3):704–12.

55. Kershner DE, Binhammer RT. Lumbar intrathecal ligaments. *Clin Anat N Y N*. 2002 Mar;15(2):82–7.

56. Lee C-H, Chung CK, Hyun S-J, Kim CH, Kim K-J, Jahng T-A. A longitudinal study to assess the volumetric growth rate of spinal intradural extramedullary tumour diagnosed with schwannoma by magnetic resonance imaging. *Eur Spine J*. 2015 Oct;24(10):2126–32.

57. Celli P, Trillò G, Ferrante L. Spinal extradural schwannoma. *J Neurosurg Spine*. 2005 Apr

1;2(4):447–56.

58. Krätzig T, Dreimann M, Klingenhöfer M, Floeth FW, Krajewski K, Eicker SO. Treatment of large thoracic and lumbar paraspinal schwannoma. *Acta Neurochir (Wien)*. 2015 Mar;157(3):531–8.

59. Schievink WI, Jacques L. Recurrent Spontaneous Spinal Cerebrospinal Fluid Leak Associated with “Nude Nerve Root” Syndrome: Case Report. *Neurosurgery*. 2003 Nov;53(5):1216–9.

60. Ozawa H, Kokubun S, Aizawa T, Hoshikawa T, Kawahara C. Spinal dumbbell tumors: an analysis of a series of 118 cases. 2007 [cited 2016 Sep 21]; Available from: <http://thejns.org/doi/full/10.3171/SPI-07/12/587>

61. Ito K, Aoyama T, Nakamura T, Hanaoka Y, Horiuchi T, Hongo K. Novel dural incision and closure procedure for preventing postoperative cerebrospinal fluid leakage during the surgical removal of dumbbell-shaped spinal tumors: technical note. *J Neurosurg Spine*. 2016 Jun 10;1–6.

62. Di Vitantonio H, De Paulis D, Del Maestro M, Ricci A, Dechordi SR, Marzi S, et al. Dural repair using autologous fat: Our experience and review of the literature. *Surg Neurol Int*. 2016;7(Suppl 16):S463–8.

Serment d'Hippocrate

Au moment d'être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les parents des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.

Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis(e) dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés.

Reçu(e) à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque.

Hippocrate – IV^{ème} siècle av JC.

Résumé

Introduction : Les tumeurs des nerfs spinaux à extension foraminale et/ou extra-foraminale sont dans la majorité des cas des schwannomes (ou neurinomes) et représentent environ 30% des tumeurs primitives intra-rachidiennes. Il est rapporté dans la littérature jusqu'à 14% de fuite du liquide cérébro-spinal (LCS) en post opératoire. Cette complication augmente la morbidité péri-opératoire. Le but de ce travail est de préciser les rapports des nerfs spinaux avec les structures et espaces méningés au niveau des foramina intervertébraux des trois étages cervical, thoracique et lombaire de la colonne vertébrale, sur la base d'une étude anatomique réalisée sur cadavres afin de proposer des solutions possibles pour prévenir ces fuites de LCS ou les prendre en charge en post-opératoire.

Matériel et Méthodes : L'étude anatomique a été réalisée sur cadavres formolés (solution de formol 10%), obtenus au laboratoire d'anatomie de l'Université de Bordeaux 2 dans le cadre du don du corps. Nous avons étudié les examens radiologiques de patients du CHU de Bordeaux (service de Neuroradiologie) en sélectionnant les images de Myélo-scanners ou Myélo-IRM pour analyser radiologiquement ces rapports. Nous avons réalisé des coupes histologiques de la région d'intérêt foraminale pour compléter les résultats macroscopiques.

Résultats : La continuité anatomique et microscopique des enveloppes est parfaite. La transition dure mérienne se fait selon 3 possibilités : au pôle proximal ganglionnaire avec participation périostée, sur le ganglion avec adhésion à la capsule fibreuse et post ganglionnaire en continuité parfaite avec l'épinèvre. L'arachnoïde se termine le plus souvent par un réseau réticulaire en pré ganglionnaire. La distance entre l'entrée du FIV et le ganglion spinal est en moyenne de 4,4mm en cervical, 3,8mm en thoracique et 5,9mm en lombaire. L'étude radiologique confirme les variations intra et inter individuelles de la terminaison des espaces sous arachnoïdiens. L'étude histologique se heurte aux artefacts de conservations.

Conclusion : Notre travail anatomique ainsi qu'une revue de la littérature ont permis de préciser les rapports méningés des nerfs spinaux dans les foramina intervertébraux. La classification des tumeurs en sablier (intra-durales, intra et extradurales, extradurales), en fonction de la formation du schwannome aux dépens des radicules de la racine dorsale sensitive, en amont, au niveau, ou en aval du ganglion spinal, permet une planification opératoire différente : abord postérieur classique, abord extra-foraminal, abord antérieur. Le risque de fuite peut être anticipé en fonction de ces données anatomiques et des données radiologiques de la lésion.

Background : Foraminal and extra foraminal spinal nerve sheath tumors are mainly schwannoma and represent about 30% of intraspinal primary tumors. The literature reports until 14% of CSF leakage in the postoperative course. This complication increased morbidity in the perioperative period.

Objective : The aim of this study is to define the anatomical relationships between the spinal nerves and the meningeal sheaths in the intervertebral foramen at the cervical, thoracic and lumbar spinal levels thanks to a cadaveric anatomical study, to propose solutions to reduce and prevent the CSF leakage and to manage them in postoperative course.

Material and Methods : The anatomical study was conducted on cadaveric bodies placed in a 10% formaldehyde solution obtained in the anatomy lab of the university of Bordeaux from the

cadaveric donation. We reviewed the radiological exams of patient from the university hospital of Bordeaux (Neuro radiological department). Some dicoms data of Myelo MRI and CT were selected. We conducted an histological examination of the foraminal region of interest to complement the data.

Results : The meninges was found to be strictly continuous with the nerve sheath. They are 3 possibilities for the dural limit layer : at the proximal part of the spinal ganglion with fibrous periosteal involvement, on the spinal ganglion itself with fibrous adhesion and after the spinal ganglion in continuity with the epineurium. The arachnoid sheath most often terminates by a pre ganglionic reticular recess. The mean distance between the entry of the FIV and the dorsal root ganglia is respectively 4,4mm, 3,8mm and 5,9mm at the cervical, thoracic and lumbar levels. Inter and intra individuals anatomic variations of the subarachnoid space are confirmed by the radiological finding. The histologic examination was biased by artefacts of bodies preservation.

Conclusion : This anatomical study in addition to a literature review have clarified the meningeal sheath relationships of the spinal nerves into the intervertebral foramen. The exact anatomical considerations of the tumor location : before, at the level or after the spinal ganglia allows us to consider the post operative risk of CSF leakage and the best surgical approach (posterior or extra foraminal approach). The postoperative risk of CSF leakage must be defined according to the anatomical and radiological characteristics find at the diagnostic.