

UNIVERSITE DE NANTES

FACULTE DE MEDECINE

**MASTER I SCIENCES BIOLOGIQUES ET MEDICALES
UNITE D'ENSEIGNEMENT OPTIONNEL**

**MEMOIRE REALISE dans le cadre du CERTIFICAT d'ANATOMIE,
d'IMAGERIE et de MORPHOGENESE**

2007-2008

UNIVERSITE DE NANTES

INSERTIONS DE LA DURE-MERE SUR LE RACHIS
Une anatomie redécouverte

Par

Hafida IZELFANANE

LABORATOIRE D'ANATOMIE DE LA FACULTE DE MEDECINE DE NANTES

Président du jury : Pr. R. ROBERT

Vice-Président : Pr. J.M. ROGEZ

Enseignants :

- Pr. O. ARMSTRONG
- Dr. O. BARON
- Pr. G. BERRUT
- Pr. C. BEAUVILLAIN
- Pr. D. CROCHET
- Dr. H. DESAL
- Pr. B. DUPAS
- Dr E. FRAMPAS
- Dr A. HAMEL
- Dr O. HAMEL
- Pr. Y. HELOURY
- Pr A. KERSAINT-GILLY
- Pr. J. LE BORGNE
- Dr M.D. LECLAIR
- Pr. P.A. LEHUR
- Pr. O. RODAT

Laboratoire :

S. LAGIER et Y. BLIN - Collaboration Technique

UNIVERSITE DE NANTES

FACULTE DE MEDECINE

**MASTER I SCIENCES BIOLOGIQUES ET MEDICALES
UNITE D'ENSEIGNEMENT OPTIONNEL**

**MEMOIRE REALISE dans le cadre du CERTIFICAT d'ANATOMIE,
d'IMAGERIE et de MORPHOGENESE**

2007-2008

UNIVERSITE DE NANTES

INSERTIONS DE LA DURE-MERE SUR LE RACHIS
Une anatomie redécouverte

Par

Hafida IZELFANANE

LABORATOIRE D'ANATOMIE DE LA FACULTE DE MEDECINE DE NANTES

Président du jury : Pr. R. ROBERT

Vice-Président : Pr. J.M. ROGEZ

Enseignants :

- Pr. O. ARMSTRONG
- Dr. O. BARON
- Pr. G. BERRUT
- Pr. C. BEAUVILLAIN
- Pr. D. CROCHET
- Dr. H. DESAL
- Pr. B. DUPAS
- Dr E. FRAMPAS
- Dr A. HAMEL
- Dr O. HAMEL
- Pr. Y. HELOURY
- Pr A. KERSAINT-GILLY
- Pr. J. LE BORGNE
- Dr M.D. LECLAIR
- Pr. P.A. LEHUR
- Pr. O. RODAT

Laboratoire :

S. LAGIER et Y. BLIN - Collaboration Technique

REMERCIEMENTS

Au Professeur Jean-Michel Rogez de m'avoir donné la chance de pouvoir faire ce master. Je lui exprime toute ma reconnaissance.

Au Professeur Roger Robert de m'avoir soutenue et aidée dans ma recherche.

À Max Girardin, un homme remarquable. Merci pour son aide très précieuse, pour sa présence dans les bons moments comme dans les moments de doute. Toute ma reconnaissance, mon respect et mon amitié.

À Patrick Van Dun, pour sa disponibilité, et pour m'avoir communiqué une partie de son travail.

À Jean-Paul Höppner et Max Girardin, pour m'avoir permis d'observer des dissections à l'université d'Heidelberg.

À l'équipe du laboratoire d'histologie pour leurs conseils, leur aide et leur disponibilité :

Au Docteur Dominique Heymann

À Céline Charrier, merci pour sa patience et son dévouement

À Anne Rier, pour son aide dans l'interprétation des résultats histologiques.

Au Docteur Stéphane Ploteau pour sa gentillesse et son aide.

À Stéphane Lagier et Yvan Blin pour leur disponibilité, leurs conseils et leur humour.

À tous mes camarades de master I pour leur aide et leur bonne humeur.

À ma famille, tout particulièrement à ma sœur pour sa présence et son aide.

À tous mes amis pour leur soutien.

À tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin à la réalisation de cette étude.

Hafida IZELFANANE

Table des Matières

I.	Introduction.....	1
II.	Rappels.....	1
a.	Histoire.....	1
b.	Anatomie.....	1
	La pie-mère spinale.....	1
	L'arachnoïde.....	2
	Le ligament longitudinal postérieur.....	2
	La dure-mère.....	2
	Ligaments de Hofmann.....	5
	Opercules de Forestier.....	5
	Filum Terminale.....	7
c.	Embryologie.....	7
d.	Histologie.....	8
e.	Vascularisation.....	8
f.	Innervation.....	9
III.	Matériels et méthodes.....	10
a.	Matériels.....	10
	i. Sujets.....	10
	ii. Instruments.....	10
b.	Méthodes.....	10
	i. Voie d'abord.....	10
	ii. Etude histologique.....	11
IV.	Résultats.....	12
a.	Ligament de Trolard.....	12
b.	Ligaments de Hofmann.....	15
c.	Opercules de Forestier.....	18
d.	Filum terminale.....	20
e.	Attaches cervicales.....	21
f.	Attaches postérieures.....	23
g.	Histologie.....	25
V.	Discussion.....	27
a.	Les limites de l'étude.....	27
b.	Systématisation.....	27
c.	Ligament de Trolard.....	28
d.	Ligament de Hofmann.....	28
e.	Opercule de Forestier.....	29

f.	Cas particulier des attaches dure-mériennes au niveau cervical.....	29
VI.	Conclusion.....	30
VII.	Bibliographie.....	31
a.	Ouvrages anatomiques et embryologiques.....	31
b.	Thèses.....	32
c.	Articles.....	33

I) Introduction

La dure-mère est une couche fibreuse, épaisse, résistante et d'aspect nacré, qui est directement accolée à la table interne des os du crâne, mais qui est séparée de l'os au niveau rachidien par un espace péri-méningé, l'espace épidual. (ROUVIERE H. et al., 2002)

De manière générale, les ouvrages anatomiques classiques décrivent cette membrane comme étant une structure libre dans le canal vertébral c'est-à-dire dépourvue d'attaches. En effet, hormis ses adhérences sur le pourtour du foramen magnum et le filum terminale qui relie l'extrémité inférieure de la dure-mère au coccyx, très peu d'insertions sur le rachis ont été répertoriées.

L'objectif de cette recherche est donc de recenser les descriptions faites dans la littérature et de les confronter à une étude expérimentale.

II) Rappels

a. Histoire

Du grec *meninx* signifiant membrane, le terme méninge a été utilisé la première fois par l'anatomiste Erasistrate (310-250 av J.-C.), par lequel il décrit l'enveloppe non osseuse du système nerveux central.

Au II^{ème} siècle après J.-C., Galien identifia deux membranes. Il en décrivit une épaisse *pacheia*, et une moins résistante *lepte*, dont la traduction par Stephen d'Antioche a donné la dure-mère et la pie-mère.

L'arachnoïde fut individualisée au XVII^{ème} siècle. Elle constitue avec la pie-mère les leptoméninges.

b. Anatomie

La pie-mère spinale

Elle tapisse toute la surface de la moelle et lui adhère intimement, et envoie un repli qui recouvre les parois de la fissure médiane antérieure. Elle se prolonge au-dessous de la moelle, sur le filum terminale, jusqu'au fond du cul-de-sac dure-mérien.

De chaque côté de la moelle, il existe une lame fibreuse, verticale et transversale, tendue sur toute la hauteur de la moelle. On lui donne le nom de ligament dentelé. Il est placé entre les racines ventrales et dorsales des nerfs spinaux. Son bord interne est uni à la pie-mère. Son bord externe est festonné et s'attache à la face interne de la dure-mère.

La digitation supérieure du ligament dentelé s'attache à la face interne de la masse latérale de l'occiput, au-dessous et en arrière de l'orifice interne du canal condylien antérieur,

au-dessus et en arrière de l'orifice dure-mérien traversé par l'artère vertébrale et le 1^{er} nerf spinal. (ROUVIERE H. et al, 2002)

L'arachnoïde

Elle est composée de 3 couches :

- Une couche discontinue de cellules en contact avec le liquide céphalo-rachidien (LCR). Cette couche cellulaire est ancrée par des desmosomes à la dure-mère et par des trabécules qui, après avoir traversé le LCR, se collent à la pie-mère.
- Au niveau médian, se situe une lame basale continue.
- La couche externe est en contact avec la face interne de la dure-mère. Elle est constituée d'une couche cellulaire continue présentant de très nombreuses jonctions serrées et sans espace extracellulaire significatif. (ESTEBE J-P., 2003)

Le ligament longitudinal postérieur

Globalement, il présente une forme triangulaire et est constitué de 2 couches :

- La couche antérieure peut être en continuité avec le ligament longitudinal antérieur situé en avant des corps vertébraux.
- Le feuillet postérieur pourrait, pour certains auteurs, fusionner avec l'enveloppe des nerfs.

A sa face antérieure, ses adhérences se terminent sur le périoste des corps vertébraux et surtout sur le disque (annulus fibrosus).

A sa face postérieure, au niveau intervertébral, il émet des adhérences qui le rattachent au fourreau dural. Ces adhérences peuvent devenir de véritables ligaments méningo-vertébraux, mais ne constituent pas un obstacle à la diffusion des produits administrés en épidual. (ESTEBE J-P., 2003)

La dure-mère

La dure-mère spinale est un manchon fibreux qui contient la moelle spinale et les racines des nerfs rachidiens.

Extrémité supérieure

Elle se continue par la dure-mère encéphalique au niveau du foramen magnum, et est traversée au niveau de l'articulation occipito-atloïdienne, par les artères vertébrales. (ROUVIERE H. et al., 2002)

Elle adhère intimement à la surface du trou occipital, mais dès la 3^{ème} vertèbre cervicale, elle se dédouble en deux feuillets. Un feuillet externe ou périosté, mince, qui se moule sur toutes les saillies ou dépressions du canal rachidien, et un feuillet interne, plus épais, la dure-mère proprement dite, qui correspond à la couche interne de la méninge crânienne qui se modèle sur la forme de la moelle. (POIRIER P. et al., 1921)

Extrémité inférieure

Elle descend en dessous du cône terminal de la moelle pour envelopper les racines de la queue de cheval et le filum terminal. Elle s'insère sur la 2^{ème} pièce sacrée, mais ne se

termine pas à ce cul-de-sac dural. En effet, elle se prolonge jusqu'à la base du coccyx où elle prend le nom de ligament coccygien de la moelle et où elle s'y fixe par des filaments en éventail. (ROUVIERE H. et al., 2002)

Le fait que le cul de sac dural ne corresponde pas topographiquement à la terminaison du cône terminal de la moelle, s'explique embryologiquement du fait que l'ascension de la dure-mère ait été moindre que celle de la moelle durant la période fœtale. (POIRIER P. et al., 1921)

Surface interne

Lisse, elle présente de chaque côté, les orifices d'entrée des racines des nerfs spinaux dans leurs gaines dures. Elle est reliée à la pie-mère par quelques tractus conjonctifs et par les ligaments dentelés. (ROUVIERE H. et al., 2002)

Surface externe

Elle adhère à la paroi antérieure du canal vertébral sur la hauteur des deux premières vertèbres cervicales. Partout ailleurs, elle est séparée de ces parois par un espace épidual, très étroit en avant où la dure-mère est unie au ligament vertébral commun par quelques brides fibreuses. Cet espace est au contraire large sur les côtés et en arrière en regard des lames. L'espace épidual est occupé par une graisse fluide et les plexus veineux intravertébraux. (ROUVIERE H. et al., 2002)

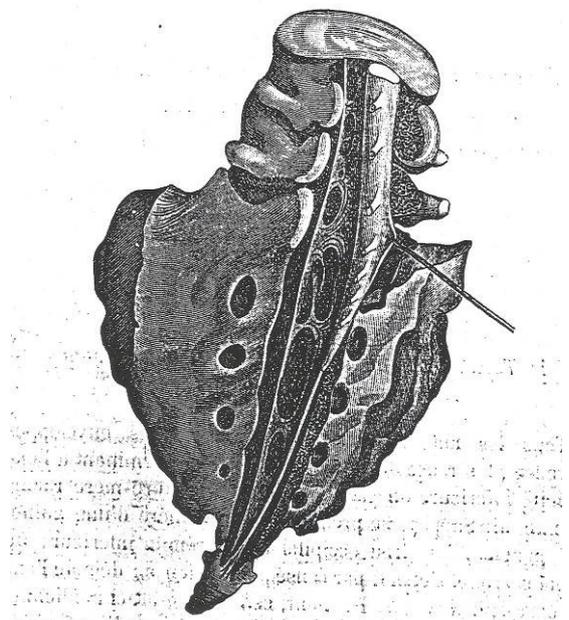
Insertions dures sur le canal vertébral

De nombreux ouvrages ou articles scientifiques décrivent des attaches dure-mériennes sur le ligament longitudinal postérieur, comme étant de véritables ligaments méningo-vertébraux.

Lors de ma recherche bibliographique, j'ai pu recenser cinq types d'insertions dures.

Ligament de Trolard

En 1888, P. Trolard décrit la dure-mère comme étant une structure qui envoie le long du rachis, des prolongements filiformes en plus ou moins grand nombre vers le ligament commun vertébral postérieur. A partir de la dernière ou de l'avant-dernière vertèbre lombaire, il existe une sorte de condensation de ces filaments : c'est un véritable ligament très fort, placé de champ entre la partie moyenne de la dure-mère et le ligament vertébral commun postérieur. C'est quelquefois une **cloison complète** ; mais le plus souvent, elle est **incomplète, fenêtrée**, formée par des **fibres arciformes** qui vont d'une vertèbre à l'autre. Ce ligament va en s'effilant au fur et à mesure qu'il s'approche du cul-de-sac duro-arachnoïdien. Arrivé



à ce niveau, il se termine en pointe pour aller s'attacher aux dernières vertèbres sacrées, en se plaçant au-dessous du faisceau moyen du filum terminale, auquel il adhère le plus souvent au moment où celui-ci traverse le cul-de-sac.

D'après Trolard

C'est en réalité l'extrémité inférieure de ce ligament, qu'on peut appeler « sacré antérieur de la dure-mère », qui fixe aux parois solides du canal sacré le cul-de-sac dural et arachnoïdien. (TROLARD P., 1888). Il sera appelé plus tard le ligament sacré antérieur de la dure-mère de Trolard, ou ligament sacro-dural.

Le ligament de Trolard est une structure qui est retrouvée décrite dans de nombreux ouvrages :

- Testut L., 1900

Dans toute la hauteur du cul-de-sac dural, les prolongements fibreux, [...] entre la face antérieure de la dure-mère et le ligament vertébral commun postérieur, deviennent à la fois plus nombreux et plus épais. Ils forment [...] une sorte de cloison médiane, toujours incomplète et plus ou moins fenestrée : c'est le ligament sacro-dural (ligament antérieur de la dure-mère de Trolard) ».

D'après Testut

- Poirier P. et Charpy, 1921 :

Des lames assez denses qui, de la ligne médiane antérieure du sac dural, se portent obliquement de chaque côté en bas et en avant, et se fixent au ligament vertébral postérieur. Courts et serrés à la région cervicale, à peine reconnaissables à la région thoracique, ils reparaissent plus longs et espacés à la région lombaire. A partir de la 4^{ème} lombaire, ils commencent à se condenser et forment une cloison médiane, forte, fenestrée, qui descend jusqu'aux dernières vertèbres sacrées, et fixe à la fois le cul-de-sac dural et le filum terminal.

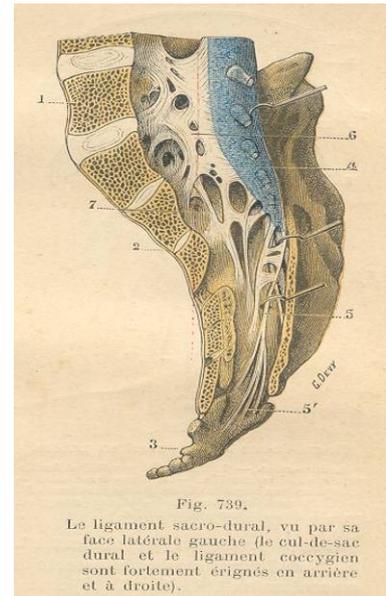
- Bourret P. et Louis R., 1974 :

Ce sac dural est fixé en avant au ligament commun vertébral postérieur par le ligament antérieur de la dure-mère qui en bas devient le ligament sacro-dural de Trolard.

- Bouchet A. et Cuilleret J., 1983 :

« La face antérieure de l'étui dural contracte quelques adhérences avec le ligament vertébral commun postérieur, adhérences qui s'épaississent en bas au niveau du canal sacré en formant une cloison médiane »

- Williams et Warwick, Gray's anatomy, 1984 :



La dure-mère spinale est attachée à la circonférence du foramen magnum, et à la face postérieure des corps des deuxième et troisième vertèbres cervicales ; elle est aussi connectée par des fibres au ligament longitudinal postérieur ; particulièrement au niveau de l'extrémité inférieure du canal vertébral.

Ligaments de Hofmann

Alors que Poirier et Charpy ont décrit en 1921 des « *ligaments dorso-latéraux*, propres à la région sacrée, qui, naissent de chaque côté de la dure-mère près du cône terminal et qui vont se fixer à la partie postérieure du canal osseux » ; l'étude de Wadhvani S. et al. en 2003 montre que ces ligaments sont « présents sur plusieurs niveaux entre C7 et L5 et bien que la plupart de ces ligaments soient limités à un seul segment vertébral, certains ont été observés s'étalant sur plusieurs segments vertébraux ».

Ces ligaments vont de la dure-mère au ligament longitudinal postérieur. Leurs orientations changent tout au long de la colonne, pour passer d'une **direction caudo-craniale** au niveau thoracique supérieur, à une direction **transverse** à hauteur des vertèbres T8-T9, et à une direction **cranio-caudale** au niveau des thoraciques basses et des lombaires. Leur longueur varie de 0,5 à 28,8 mm et est corrélée avec le niveau vertébral. (WADHWANI S. et al., 2003).

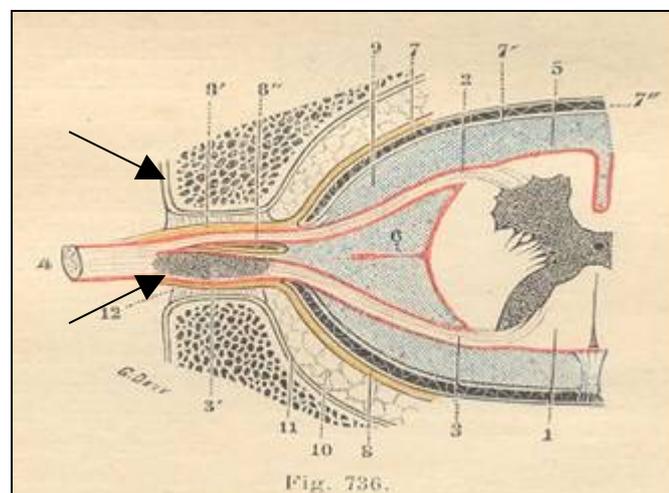
Opercules de Forestier

Poirier et Charpy avaient déjà décrit en 1921 des attaches au niveau du trou de conjugaison.

« Les gaines dures des nerfs constituent, un système de fixation transversale. Tout nerf rachidien se compose, de deux racines, une antérieure et une postérieure pourvue d'un ganglion. Chaque racine traverse la dure-mère par un trou indépendant, et reçoit à sa sortie de cette méninge une gaine fibreuse propre qui l'enveloppe jusqu'au-delà du ganglion, où elle se confond avec le névrilème du nerf mixte. Au niveau du trou de conjugaison, chacune de ses gaines est intimement unie au périoste par des tractus fibreux. » (POIRIER P. et al., 1921)

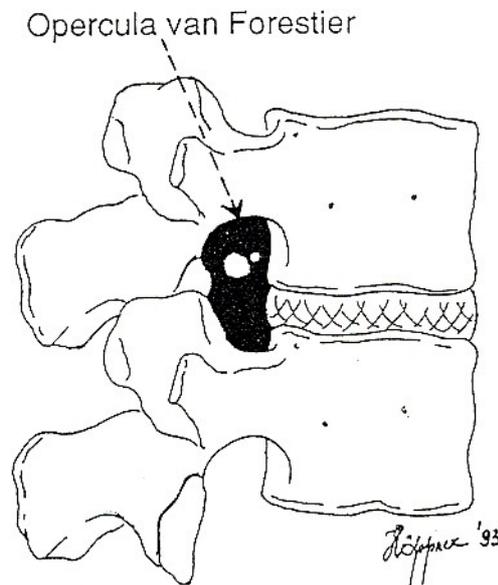
Bien avant, en 1900, des formations similaires sont visibles sur des schémas de Testut et ont été annotées comme étant des « tractus conjonctifs allant de la gaine dure au périoste ».

- « Au cours de leur trajet, les gaines dures des racines rachidiennes jettent des tractus conjonctifs, plus ou moins nombreux, et plus ou moins résistants, sur le périoste qui tapisse le trou de conjugaison » (TESTUT L., 1900)



D'après Testut

C'est en 1922, à l'occasion d'un gros travail sur le trou de conjugaison que J. Forestier a décrit son orifice externe comme étant fermé par un « opercule fibreux, tendu sur le pourtour à la manière d'une peau de tambour sur son cadre... A la région dorsale, il forme un plan continu où s'isolent des faisceaux de renforcement des articulations costo-vertébrales. En avant, en haut et en bas, ce sont les fibres des ligaments rayonnés des articulations sus et sous-jacentes. En arrière, c'est le ligament cervico-transversaire intercostal, avec ses deux faisceaux antérieur et postérieur qui unit le col de côte à l'apophyse transverse sous-jacente. Il s'en détache même un petit faisceau qui, né au point où l'opercule fibreux recouvre la tête de la côte, pénètre par le trou de conjugaison dans le canal rachidien pour se fixer, près de la ligne médiane, à la face postérieure du disque intervertébral. Sur cet opercule fibreux est encore jeté à la région dorsale la lame continue du fascia endothoracique appliqué à la face interne des côtes, si bien qu'après avoir traversé l'opercule, les organes du trou de conjugaison se trouvent dans l'espace intercostal »



D'après J-P. Höppner

Cet opercule est percé de nombreux orifices : « au centre, celui du funicule et de l'artère spinale ; tout autour, ceux des plexus veineux rachidiens. Quand les organes du trou de conjugaison ont traversé cet opercule fibreux, ils sont désormais entourés d'une mince gaine celluleuse, qui ne ressemble en aucune façon à leurs enveloppes intra-rachidiennes ; si bien que l'on peut dire que l'enveloppe dure-mérienne du funicule se termine sur cet opercule fibreux, en mélangeant ses propres fibres avec celui-ci » (FORESTIER J., 1922)

Le trou de conjugaison présente donc selon Forestier, trois compartiments nettement séparés :

- « au centre, un département nerveux et artériel, le funicule et l'artère spinale dans une gaine duremérienne cylindrique »
- Un espace annulaire, lymphatique, entourant les formations précédentes et situé entre la dure-mère et la lame épidurale ;
- Un deuxième espace annulaire, entourant les deux autres, c'est le département veineux entre la lame épidurale et le périoste du canal rachidien »

Filum Terminale

Le filum terminale, décrit pendant longtemps comme une simple dépendance de la pie-mère, est maintenant considéré comme un prolongement de la moelle. Le canal central de celle-ci se prolongerait « dans toute son étendue avec les éléments qui le composent, et entouré d'une couche de substance grise, dans l'épaisseur de laquelle on observerait des tubes nerveux très fins ». (SAPPEY, 1869)

Des dissections de P. Trolard, il résulte que la partie du filum, située au-dessous du cul-de-sac, est manifestement composée de trois cordons : deux latéraux, qui ne sont autres que les sixièmes nerfs sacrés ; et un médian, souvent beaucoup plus petit que les latéraux, qui adhère à la dure-mère au moment où il traverse cette membrane, se place ensuite en arrière du prolongement terminale du ligament sacré antérieur, et va s'attacher à la partie moyenne de la première pièce du coccyx par un ou plusieurs filaments.

Il n'est pas rare de voir aussi cette partie du filum fournir les deux cinquièmes sacrés ; d'autres fois, la sixième seulement d'un côté, la cinquième et la sixième de l'autre côté. Dans ces cas, les deux cinquièmes – l'une d'elles, s'il n'y en a qu'une provenant du filum – s'accolent à ce filum, au-dessus de la terminaison du cul-de-sac, dans une étendue de quelques millimètres, traversent avec lui la dure-mère et s'en séparent à une hauteur variable.

Enfin, dans certains cas, le filum s'épuise complètement au-dessus du cul-de-sac, après avoir fourni les deux dernières paires sacrées ; et c'est le prolongement du ligament de la dure-mère qui, seul, fait office de lien entre l'extrémité inférieure de la dure-mère et le coccyx. (TROLARD P., 1888)

Lors de son travail en 1992, Max Girardin a pu retrouver une description du filum terminale en français ancien de 1546 par Estienne Ch. dans son ouvrage *La dissection des parties du corps humain* :

« Qu'ainsi soit/ sa substance est plus dure que n'est celle du nerf / E sa couleur est semblable a celle de la dure membrane qui enveloppe par dedans la moelle du dors : c'est a scavoir aulcunement rouge/ E non du tout ou exactement blanche... »

Il décrirait aussi ce qui semble être le ligament dural antérieur :

« Parquoy a esté faicte une premiere membrane fort puissante E nerveuse adherete p... dedés aux os de l'espine/garnie E enduyte par tout d'une humeur visqueux /ainsi qu'exterieure qu'auosdisct au premier liure/liier E envelopper lesdictz spondyles. »

Embryologie

Les adhérences entre l'arachnoïde et la dure-mère sont des reliquats embryonnaires qui seront donc plus importants chez un sujet jeune, pouvant constituer, dans près de 30% des cas, un véritable septum au niveau lombaire. Cependant, ces adhérences se rompent facilement, permettant la constitution d'un espace sous-dural de diffusion. Cet espace sous-dural est plus important au niveau cervical qu'au niveau lombaire. Il peut facilement se disséquer dans sa partie postérieure et ensuite s'élargir dans les régions latérales. (ESTEBE J-P., 2003)

La dure-mère adhère à la face postérieure du ligament longitudinal postérieur de façon plus étroite pour le nouveau-né et plus lâche pour l'adulte. Ces adhérences, véritables ligaments méningo-vertébraux, s'épaississent vers la région lombo-sacrale. (ESTEBE J-P., 2003)

Sur un rachis d'un fœtus de 11 semaines, des ligaments méningo-vertébraux ont été découverts, bien qu'ils soient plus fins que ceux de l'adulte. Ils sont entourés par de nombreuses cellules mésenchymateuses dans l'espace épidual. Ces cellules sont absentes et remplacées par de la graisse épидurale sur des fœtus plus âgés. (GEERS C., et al., 2000)

c. Histologie

La dure-mère est constituée de 3 feuillets :

- Le feuillet externe : constitué d'un tissu fibro-adipeux richement vascularisé.
- La couche médiane : également vascularisée, est constituée de fibres de collagène à orientation fortement longitudinale qui donnent à la dure-mère une certaine élasticité dans ce sens. Cette couche est donc plus épaisse en postérieur pour faire face à une plus grande sollicitation lors des mouvements de flexion.
- Le feuillet interne est formé d'une couche cellulaire qui se caractérise par de larges espaces intercellulaires. (ESTEBE J-P., 2003)

Des études histologiques sur des rachis de fœtus et d'adultes ont montré que les ligaments méningo-vertébraux sont principalement constitués d'un tissu conjonctif dense et de fibres d'élastine entourées de lobules adipeux. Le composant majeur a été identifié par immuno-histo-chimie comme étant le collagène de type I.

Ces ligaments sont en continuité avec la couche la plus externe de la dure-mère et avec la paroi ostéo-fibreuse du canal rachidien. Latéralement, ils sont liés à l'épinerium des nerfs spinaux. (GEERS C., et al. 2000)

d. Vascularisation

Les artères

Les artères proviennent des rameaux spinaux que donnent, au niveau des forams intervertébraux, les artères vertébrales, intercostales, lombales et sacrales latérales. Les artères spinales sont fournies pour la huitième cervicale par la cervicale ascendante. (FORESTIER J., 1922)

Ainsi, dès son entrée dans le trou de conjugaison, l'artère spinale contracte des rapports étroits avec le nerf rachidien. Elle perfore la dure-mère, et chemine au contact des troncs nerveux, sous la mince gaine sous-arachnoïdo-pie-mérienne qui les accompagne dans leur trajet intra-méningé.

L'ancienne conception des anatomistes, Sappey, Cruveilhier, Farabeuf, considérait ces branches comme étant des voies de renforcement à la circulation intra-rachidienne, essentiellement assurée par les artères spinales antérieure et postérieure.

A la suite des travaux de Charpy et d'Adamckiewicz, les artères médullaires soient considérées comme des artères segmentaires qui pénètrent par un trou de conjugaison et se distribuent à un métamère. Dans l'ensemble du rachis mobile, il n'y aurait en moyenne qu'une artère spinale sur quatre de développée, soit environ 12 à 13 en tout.

Suivant Tanon, il existerait donc, du fait que ces branches intra-médullaires soient terminales, une topographie vasculaire des lésions de la moelle par oblitération d'un des gros trous principaux, par embolie, thrombose ou par compression. (TANON, 1908)

La vascularisation de la dure-mère est différente sur sa face antérieure et sur sa face postérieure. La face antérieure est peu vascularisée. Il existe un courant artériel médian – ou très près de la ligne médiane-, disposition qui rappelle celle de la voie artérielle spinale antérieure. La face postérieure est plus richement vascularisée. Sauf pour les 2/3 supérieurs de la région cervicale où la vascularisation se concentre en deux courants artériels latéraux. Ces différents courants artériels s'anastomosent sur la surface externe de la dure-mère en donnant une disposition d'arcades. (LAZORTHES G. et al., 1973)

Les veines

Les veines et plexus veineux font communiquer le réseau intra-rachidien et le réseau extra-rachidien. Ces plexus sont très développés, et possèdent des valvules ouvertes vers l'extérieur. Il existe dans le canal rachidien de chaque côté de la ligne médiane, deux voies verticales, les plexus longitudinaux antérieur et postérieur, et des voies horizontales au niveau de chaque vertèbre, ce sont les plexus transverses antérieurs et postérieurs, unissant les plexus longitudinaux du même nom. (FORESTIER J., 1922)

Le rôle des plexus est des plus importants. Ils convoient tout le sang intra-rachidien, osseux et médullaire. Ils permettent, en se vidant, l'expansion systolique de la moelle et le déplacement du liquide céphalo-rachidien. Leur congestion exerce vraisemblablement une influence sur le ganglion et le nerf rachidiens qu'ils enveloppent étroitement.

Les lymphatiques

Les descriptions du système lymphatique sont pauvres. L'espace épidual contiendrait un certain nombre de ramifications lymphatiques qui se divisent dans des manchons vasculaires autour des artères spinales. Ces réseaux lymphatiques viennent ensuite se jeter dans les ganglions para-vertébraux.

e. Innervation

Les méninges sont innervées par les rameaux méningés des nerfs spinaux. Chaque rameau méningé est formé de deux rameaux :

- l'un se détache du ganglion correspondant du tronc sympathique ou du rameau communicant gris
- l'autre, du nerf spinal (c'est le petit nerf sinus-vertébral de Luschka)

Les rameaux méningés pénètrent dans le canal vertébral par le foramen intervertébral correspondant, où ils sont placés en avant des racines des nerfs spinaux. (ROUVIERE H. et al., 2002)

Le ligament longitudinal postérieur a une fonction sensitive grâce à des terminaisons nerveuses qui siègent de façon prédominante en regard de l'étage discal (segment intervertébral). Ces fibres sensibles proviennent du sinus nerveux vertébral qui pénètre par les trous de conjugaison dans le canal rachidien.

III) Matériels et méthodes

a. Matériels

i. *Sujets*

1. Nombre de sujets : 5
2. Sujet féminin de 78 ans formolé
 - Rachis de C7-D1 au coccyx
3. Sujet masculin de 93 ans frais
 - Prélèvement du rachis de C2 au coccyx
 - Congélation pour étude histologique
4. Sujet féminin de 81 ans frais (rachis entier)
5. Sujet féminin de 99 ans frais (rachis entier)
6. Fœtus estimé à 28 SA formolé

ii. *Instruments*

1. Porte-lame n°4 et lames 23
2. Pincés à disséquer
3. Pincés à clamper
4. Ciseaux
5. Marteau
6. Rachitome tranchant ou burin
7. Pince pour laminectomie
8. Pince de Kerisson
9. Curettes
10. Rugines
11. Matériel de microchirurgie

b. Méthodes

i. *Voie d'abord*

1. Sujet en procubitus.
2. On réalise deux incisions cutanées paramédianes, latéralement aux processus épineux tout au long de la colonne.
3. Les muscles de la paroi postérieure sont réséqués en ruginant afin de bien dégager les arcs postérieurs des vertèbres.
4. La fenêtre de travail doit être assez large car plus on descend vers l'étage sacré et plus la hauteur des tissus musculaires et graisseux est importante.
5. Une laminectomie est ensuite réalisée. Elle peut être réalisée en faisant usage soit :
 - a. du rachitome tranchant, sorte de lame quadrilatère à dos concave se prolongeant sous forme de manche, et assez épais pour supporter le choc d'un marteau ordinaire ;
 - b. soit, d'un rachitome à scie ;

c. soit enfin, à défaut de cet instrument, d'une scie anatomique ou d'une scie à amputation.

De ces trois procédés, le premier, quoique long et laborieux, est le plus sûr et sera donc employé.

6. Pour conserver les *opercules de Forestier*, l'angle de section des lames est différent en fonction des étages vertébraux. Il sera plus facile de les conserver à l'étage lombaire que thoracique.
7. En retirant les lames vertébrales nous pouvons noter la présence des *fibres de Soulié*, attaches conjonctives fragiles, ressemblant à de l'arachnoïde et qui sont impossibles à conserver intactes à tous niveaux.
8. Le canal rachidien étant ouvert, la graisse diffuse et les veines qui recouvrent la dure-mère sont enlevées.
9. En soulevant doucement la dure-mère nous pouvons observer sous les racines nerveuses, les *ligaments d'Hofmann* dont on notera l'orientation.
10. Ensuite on sectionne une à une les racines nerveuses des deux côtés, ce qui nous permet de soulever un peu plus la dure-mère, afin de mettre en évidence les *ligaments de Trolard*.
11. Nous noterons également la composition et structure du *filum terminale* jusqu'au coccyx.
12. Après avoir libéré tous les étages, la moelle et son emballage dure-mérien sont extraits de la colonne et disséqués à part.

ii. Etude histologique

1. Prélèvement et congélation d'un rachis
2. Prélèvement de 4 échantillons rachidiens (en C4, T2, T8 et L2)
3. Fixation dans du formol neutre 10% tamponné
4. Décalcification
5. Rinçage
6. Déshydratation des échantillons
 - a. Alcool 70° : 2 bains de 30 minutes
 - b. Alcool 80° : 2 bains de 30 minutes
7. Les échantillons passent ensuite dans l'histokinette pendant 24h
 - a. 3 bains d'alcool 95°
 - i. Bain n°1 : 1 heure
 - ii. Bain n°2 : 1 heure 30
 - iii. Bain n°3 : 1 heure 30
 - b. 3 bains d'alcool 100°
 - i. Bain n°1 : 1 heure 15
 - ii. Bain n°2 : 1 heure 30
 - iii. Bain n°3 : 2 heures
 - c. 3 bains de butanol
 - i. Bain n°1 : 2 heures
 - ii. Bain n°2 : 2 heures 30
 - iii. Bain n°3 : 2 heures 30
8. Inclusion en paraffine

9. Coupes au microtome (5 micromètres)

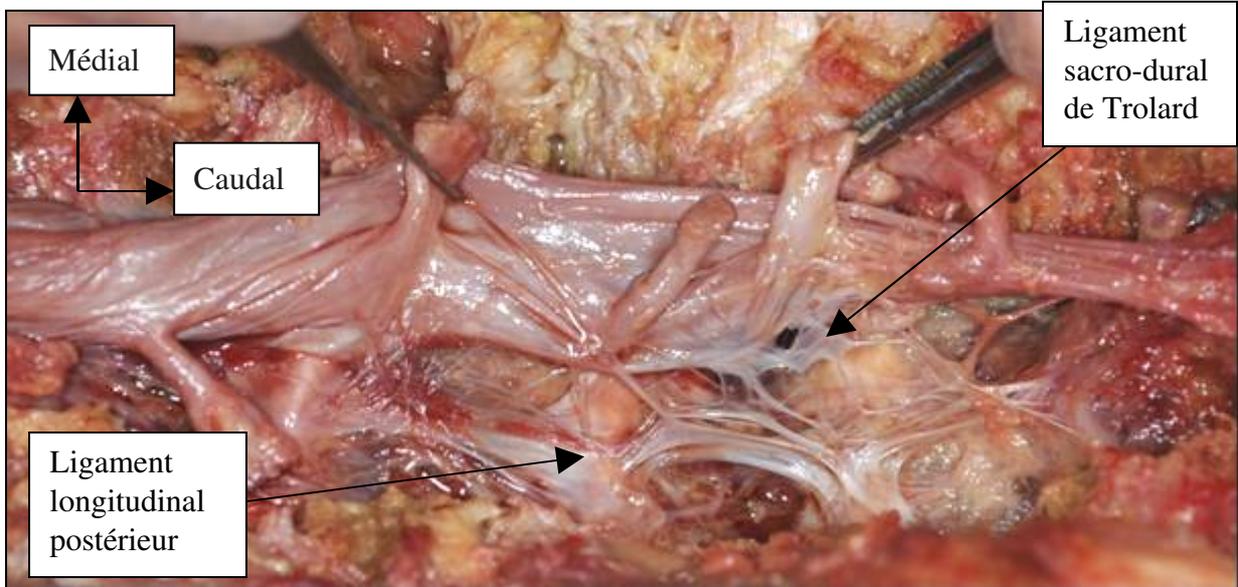
10. Colorations

- Hématoxyline-éosine
- Van Gieson
- Luxol Fast Blue

IV) Résultats

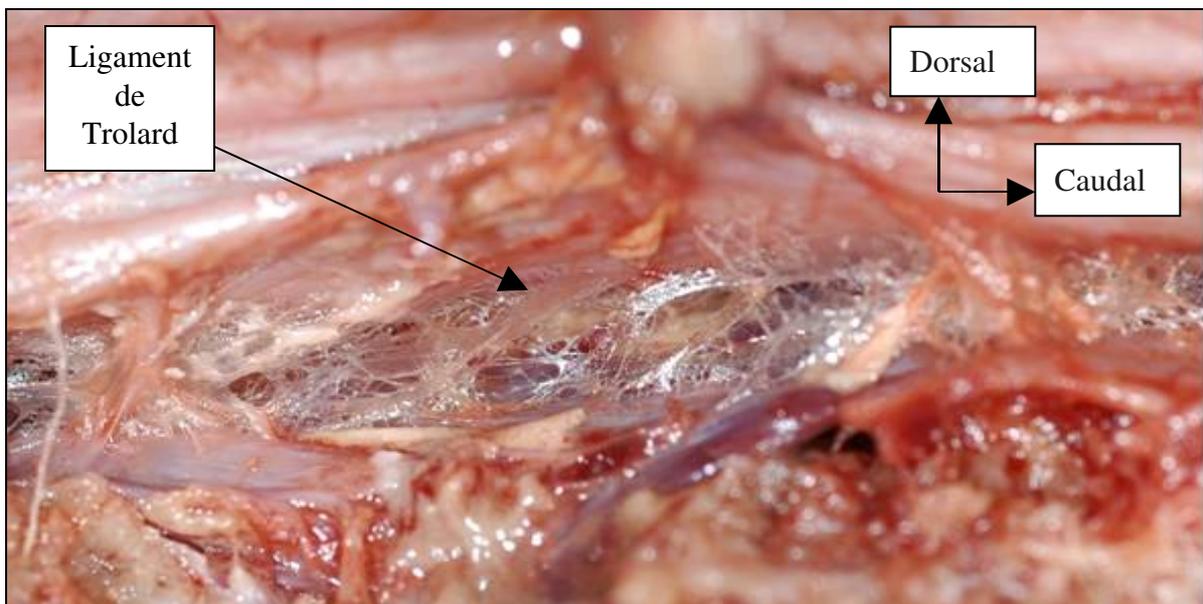
a. Ligament de Trolard

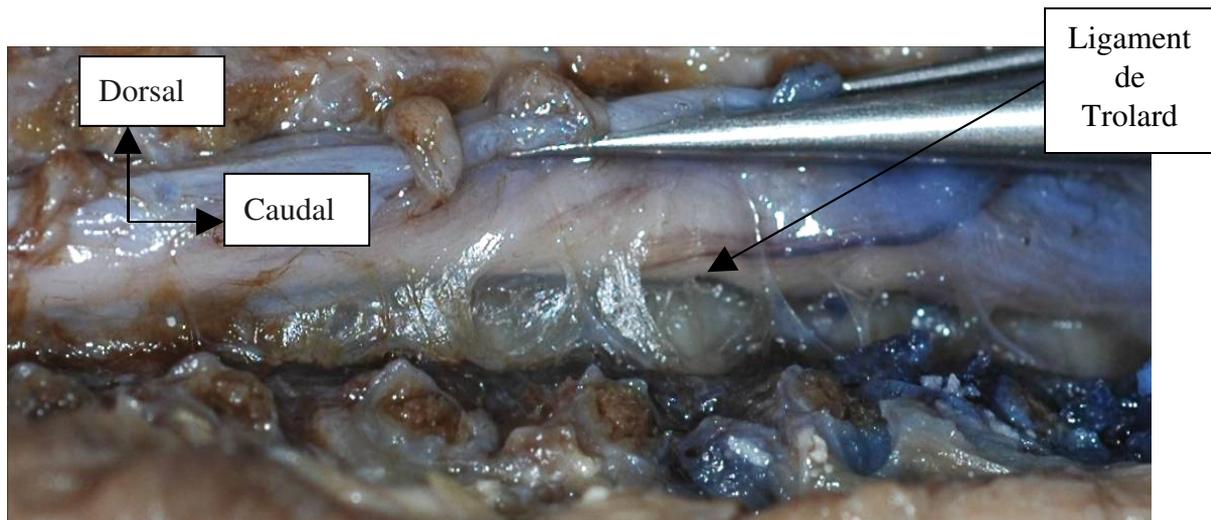
Comme l'a décrit Trolard en 1888, j'ai pu observer dans la région lombo-sacrée, entre la dure-mère et le ligament longitudinal postérieur, une cloison médiane festonnée.



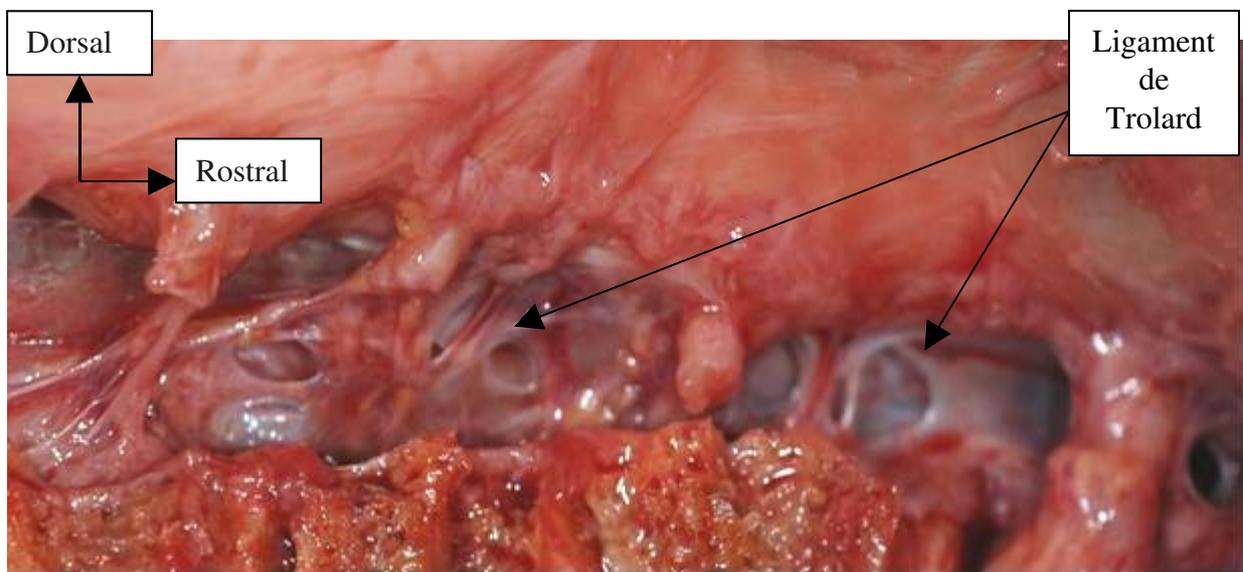
Cependant, cette formation ne se limite pas à cette région et a été retrouvée tout au long du rachis, sous trois différentes formes, comme on le voit décrit dans l'étude de Max Girardin, 1992 :

- Fibres arciformes





Chez le fœtus d'environ 28 SA

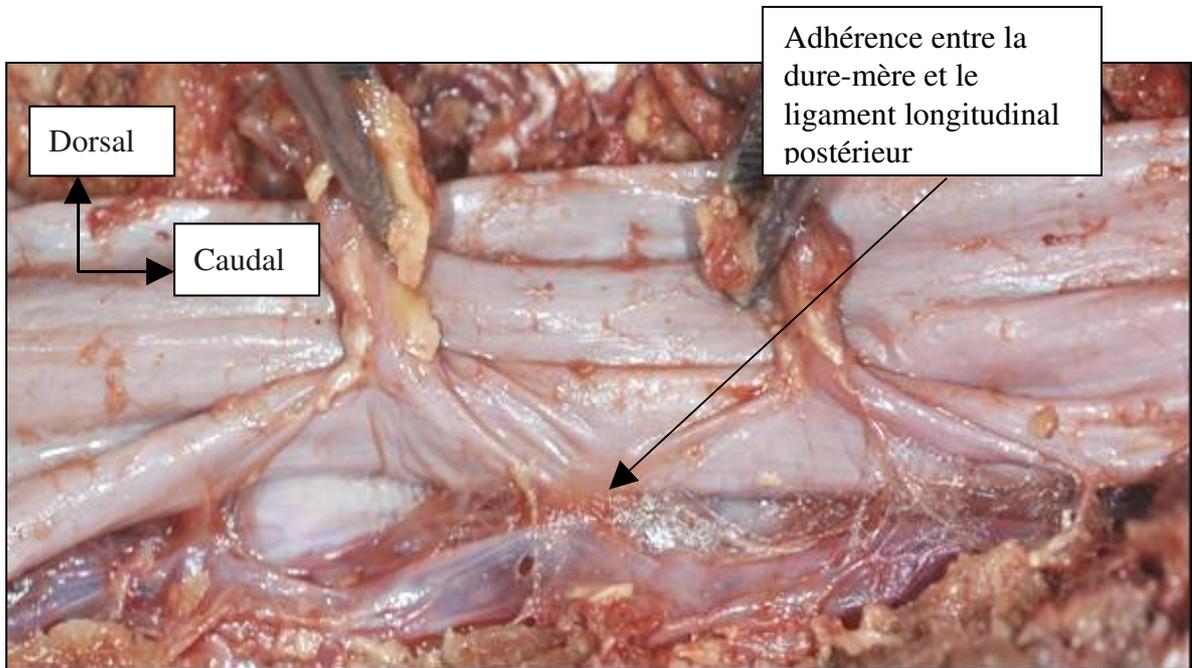


Au niveau cervical

Les fibres arciformes peuvent se condenser pour former de véritables adhérences ou cloisons.

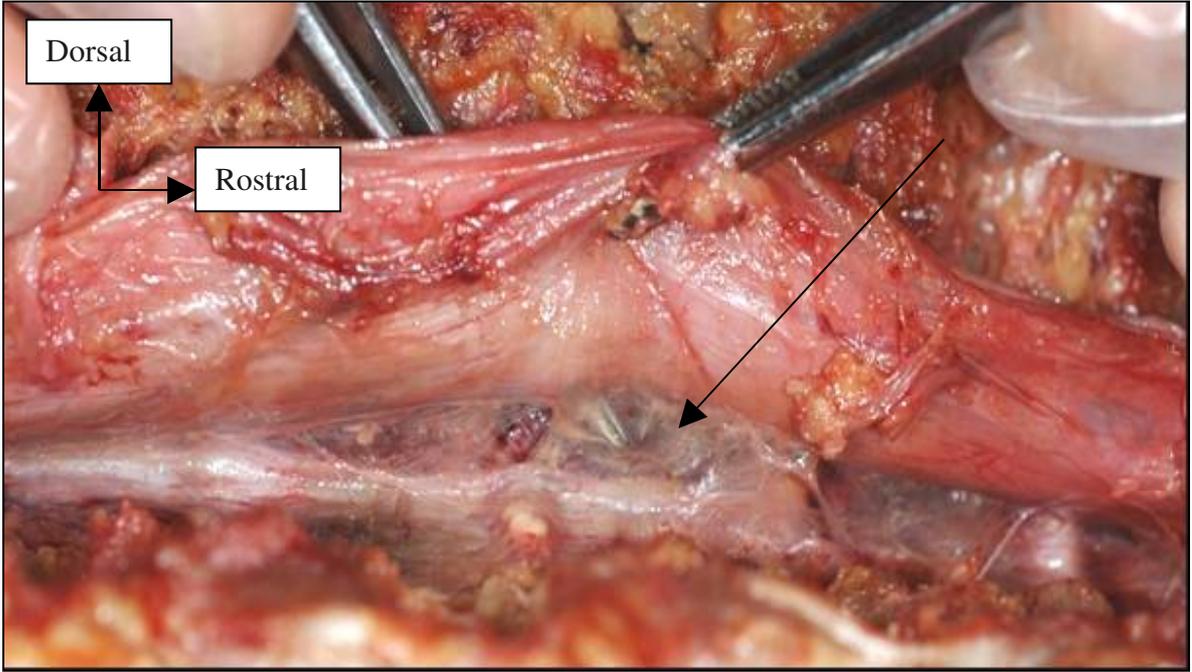


- Adhérence



- Cloison

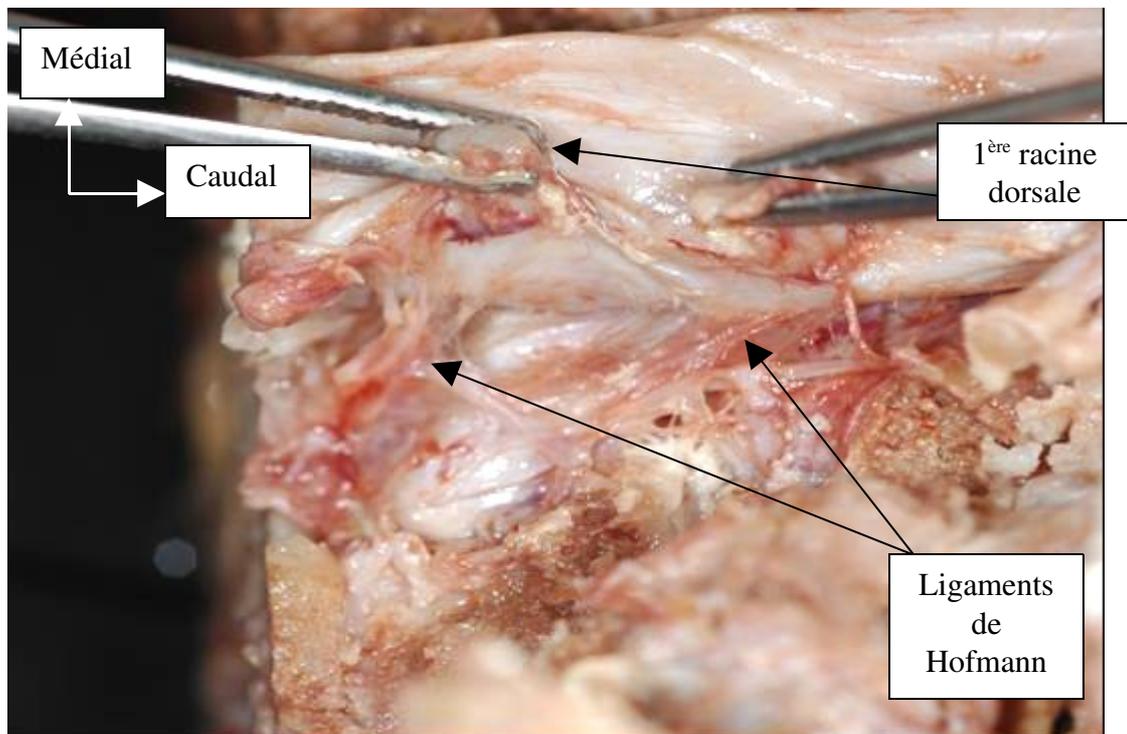
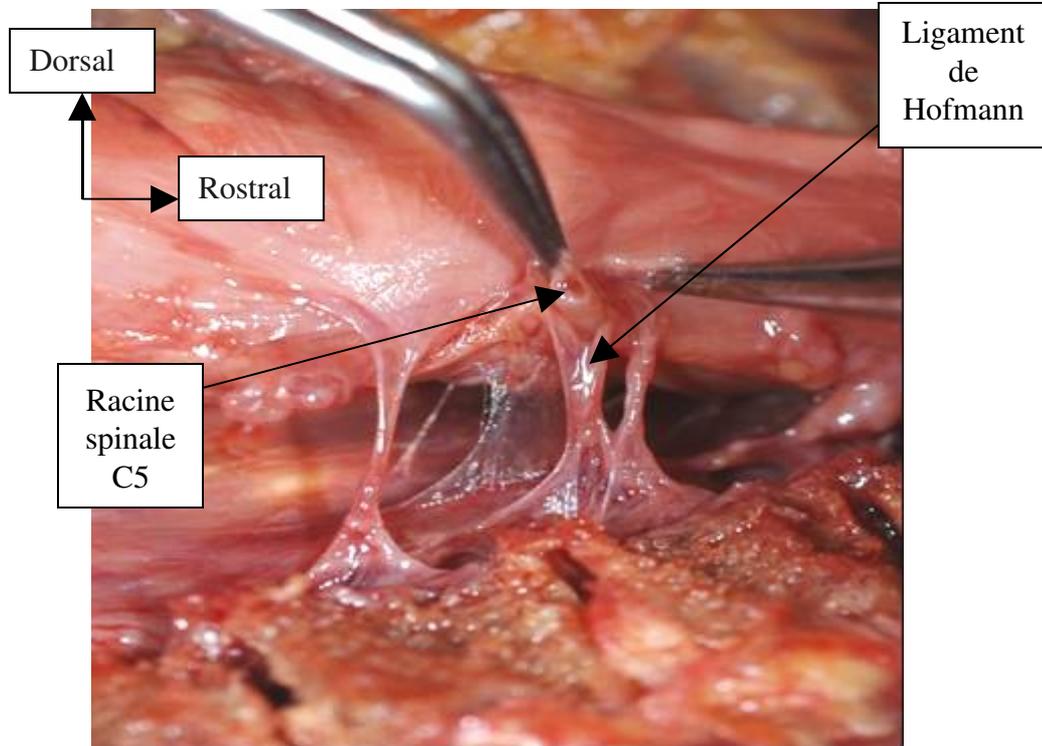
Cloison
conjonctive
séparant l'espace
épidural
antérieur en deux



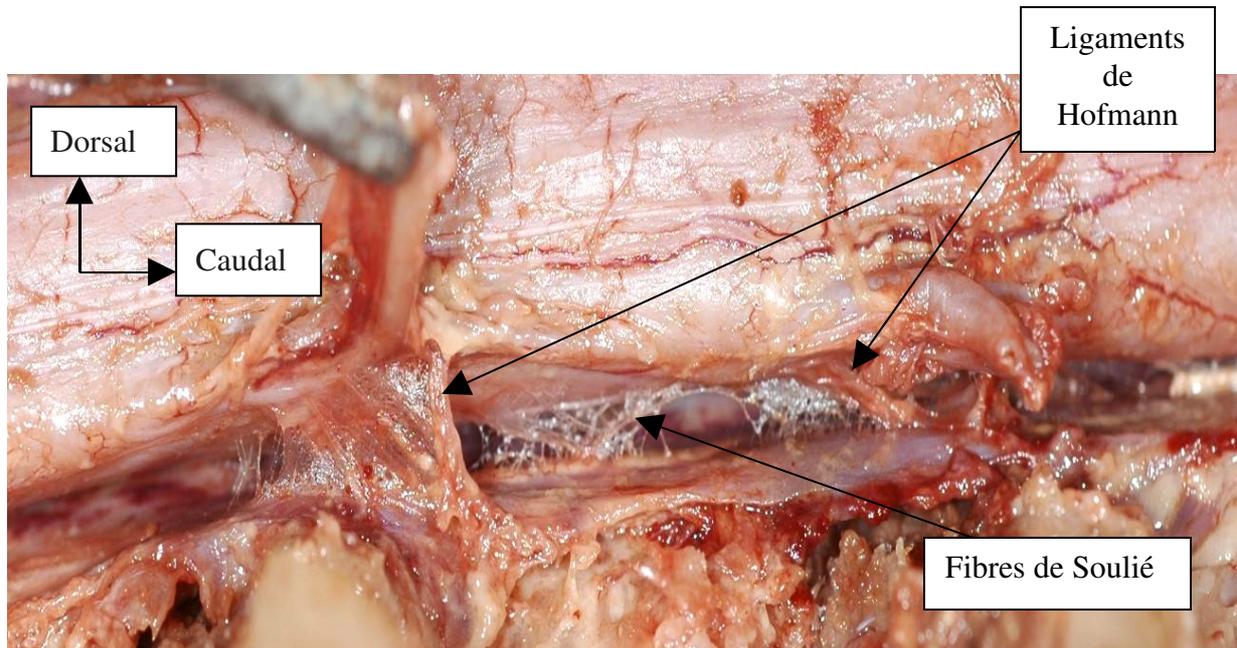
b. Ligaments de Hofmann

Trois orientations ont été relevées :

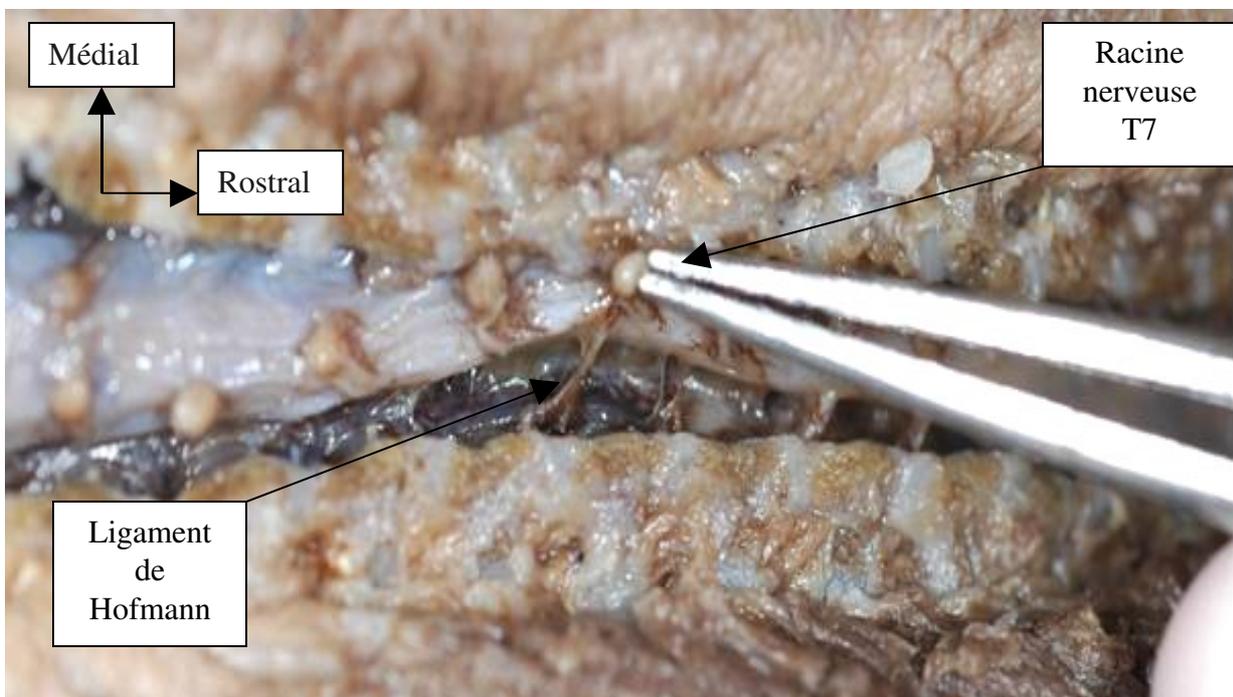
- Direction caudo-craniale :



- Direction transverse :

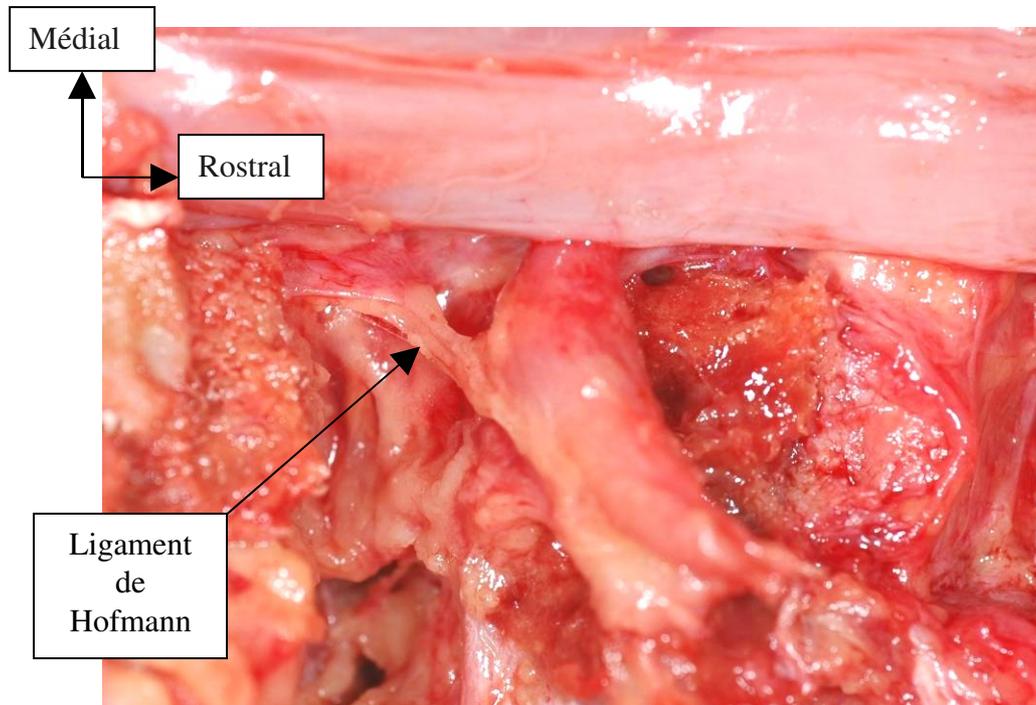


En regard de T7-T8

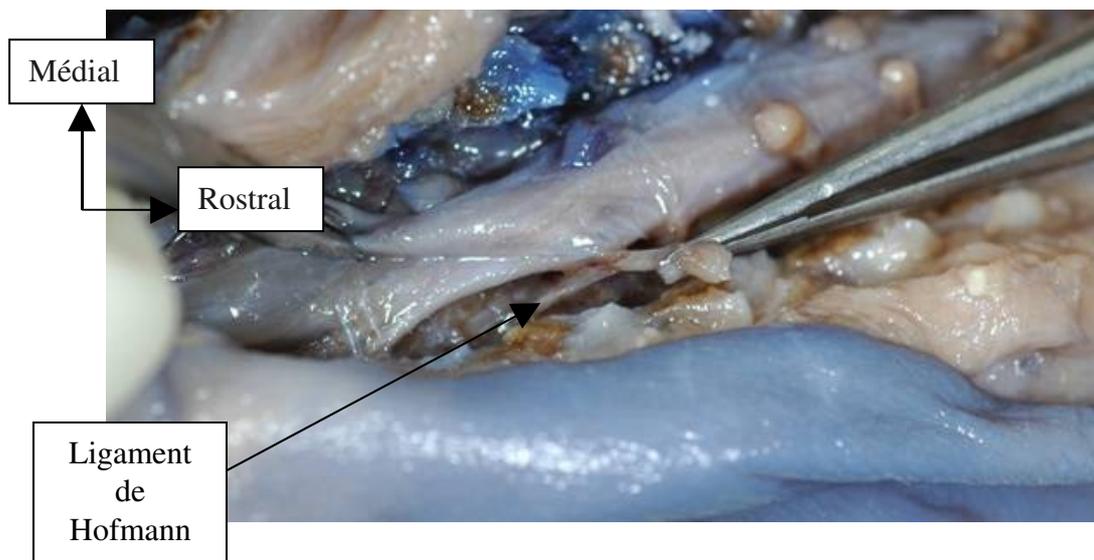


Au niveau dorsal moyen

- Direction cranio-caudale :



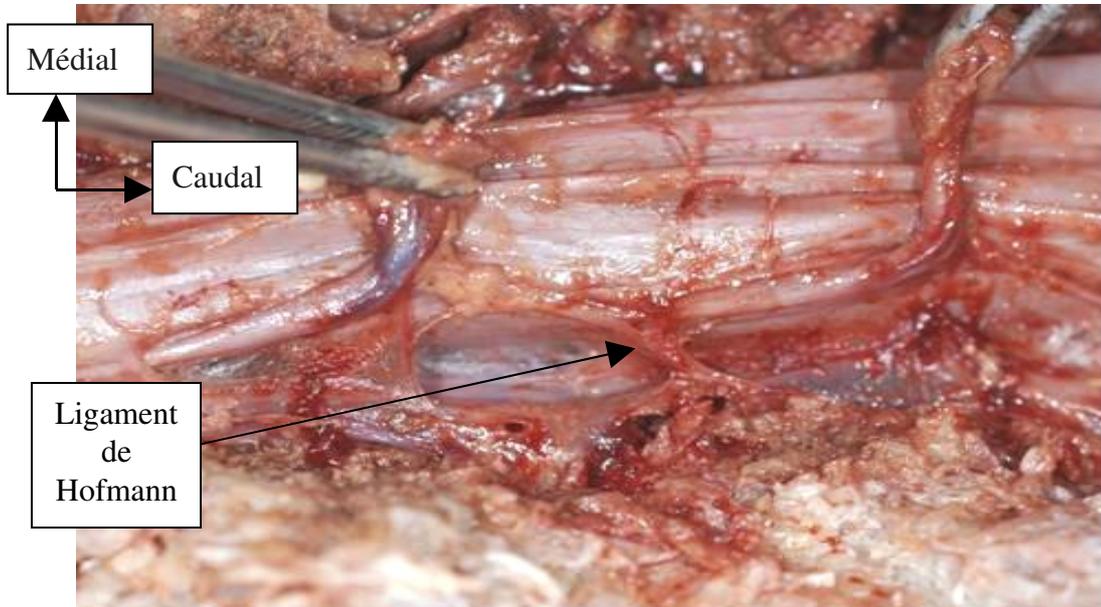
En regard de la racine nerveuse L5



*En regard de la racine nerveuse L5
chez le fœtus d'environ 28 SA*

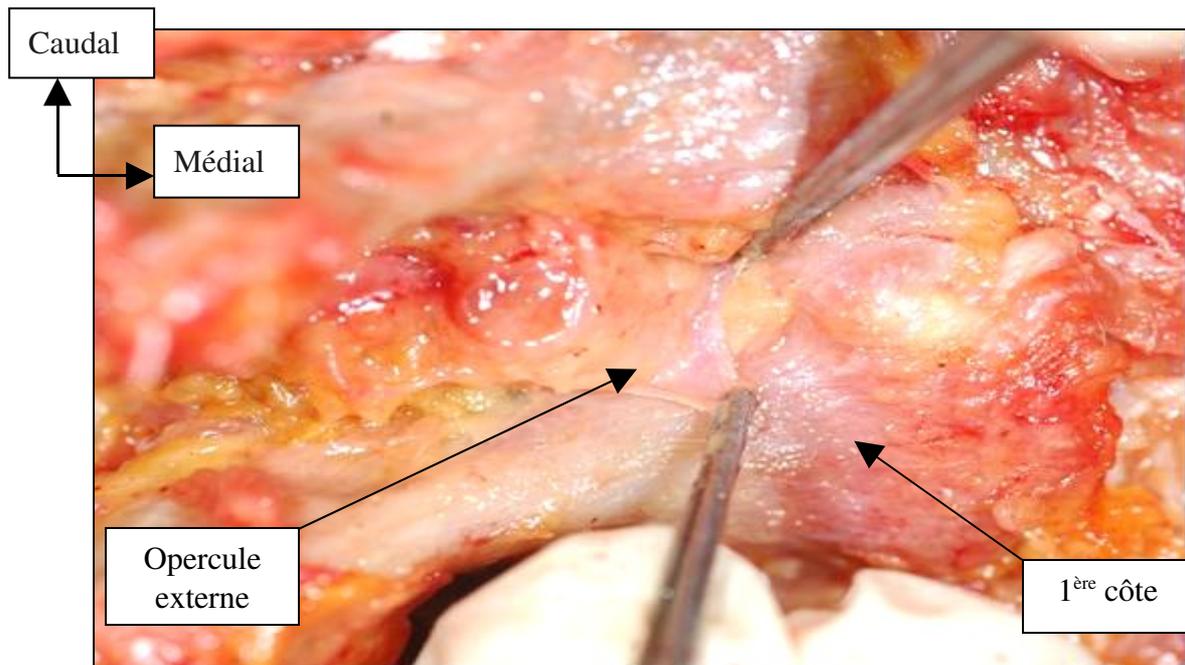
- Situation inter-radiculaire :

J'ai parfois observé des ligaments de Hofmann non directement à la face antérieure des racines nerveuse mais entre celles-ci.

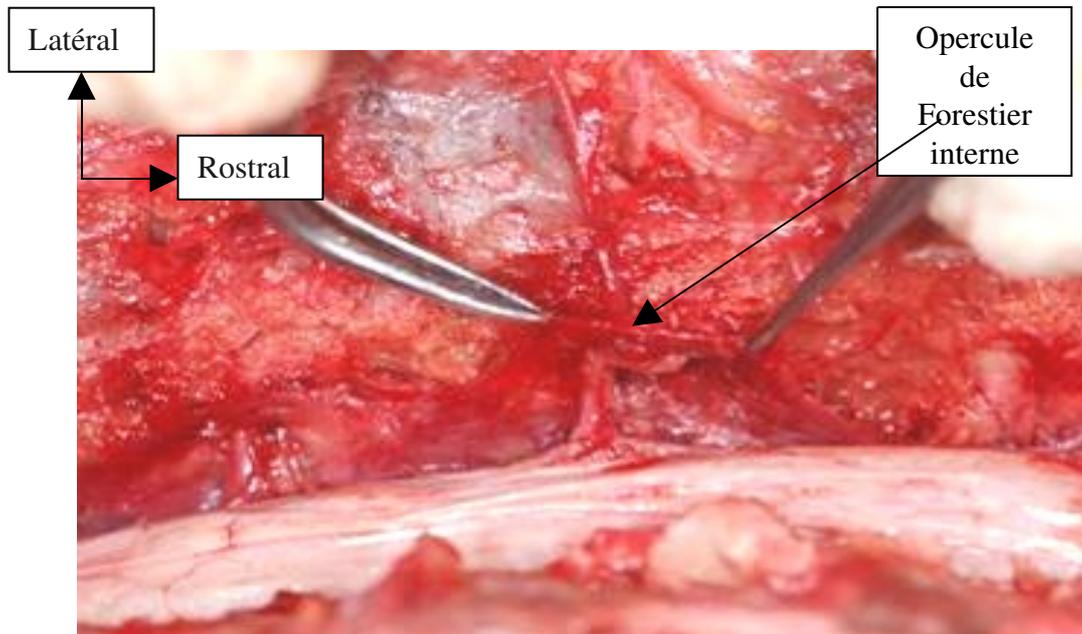


c. Opercules de Forestier

Le trou de conjugaison présente à son orifice externe comme l'a décrit J. Forestier un opercule fibreux. Lors de mes dissections, une formation similaire a été retrouvée recouvrant l'orifice interne. A l'université d'Heidelberg, j'ai également observé un rachis où tous les opercules externes ont été conservés sauf un seul qui a été percé au niveau lombaire.

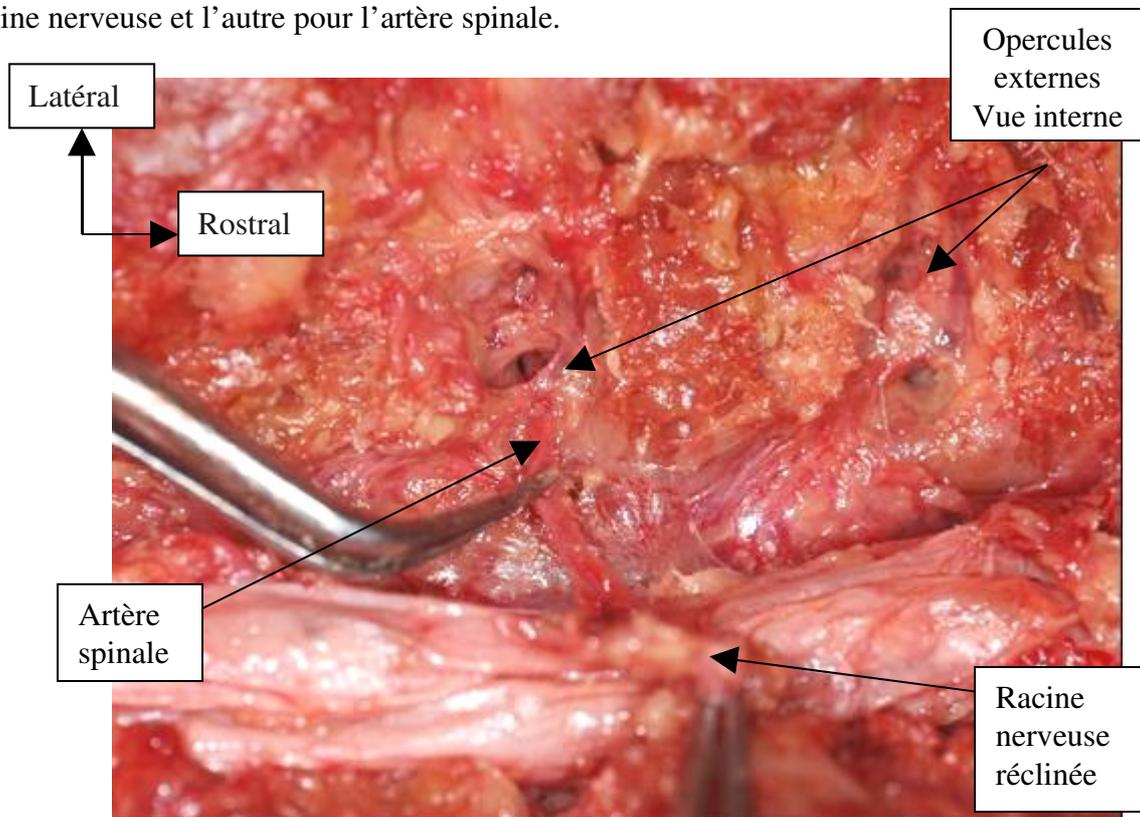


Opercule externe



Opercule interne

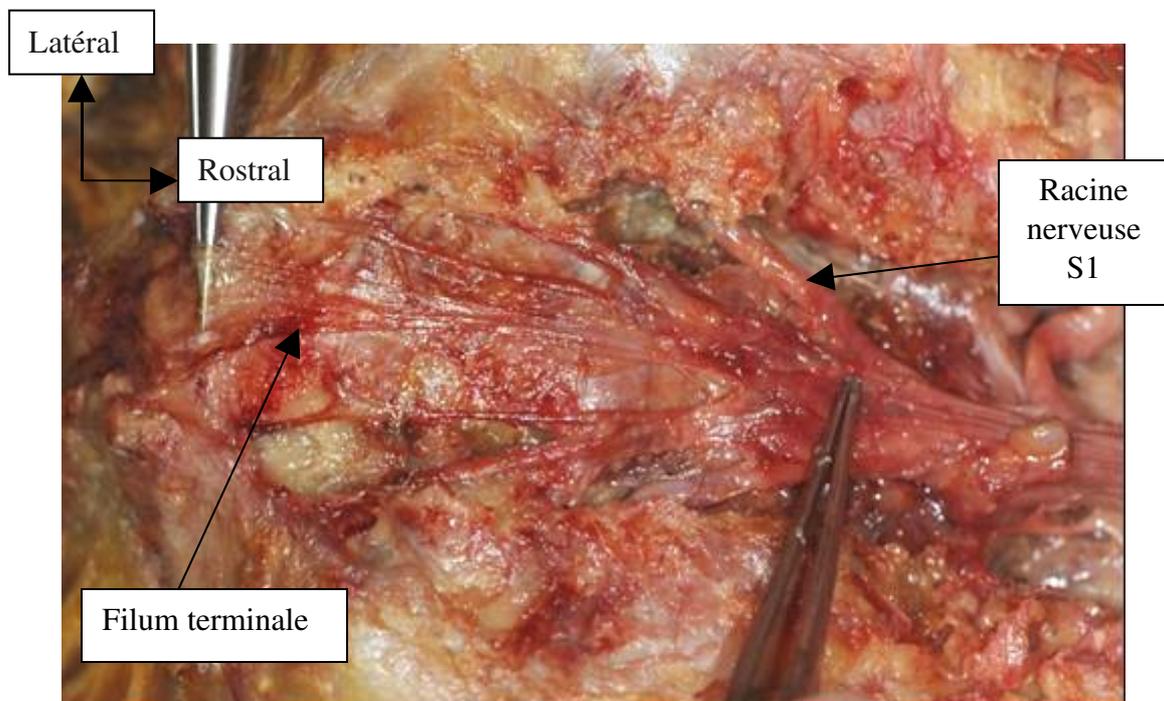
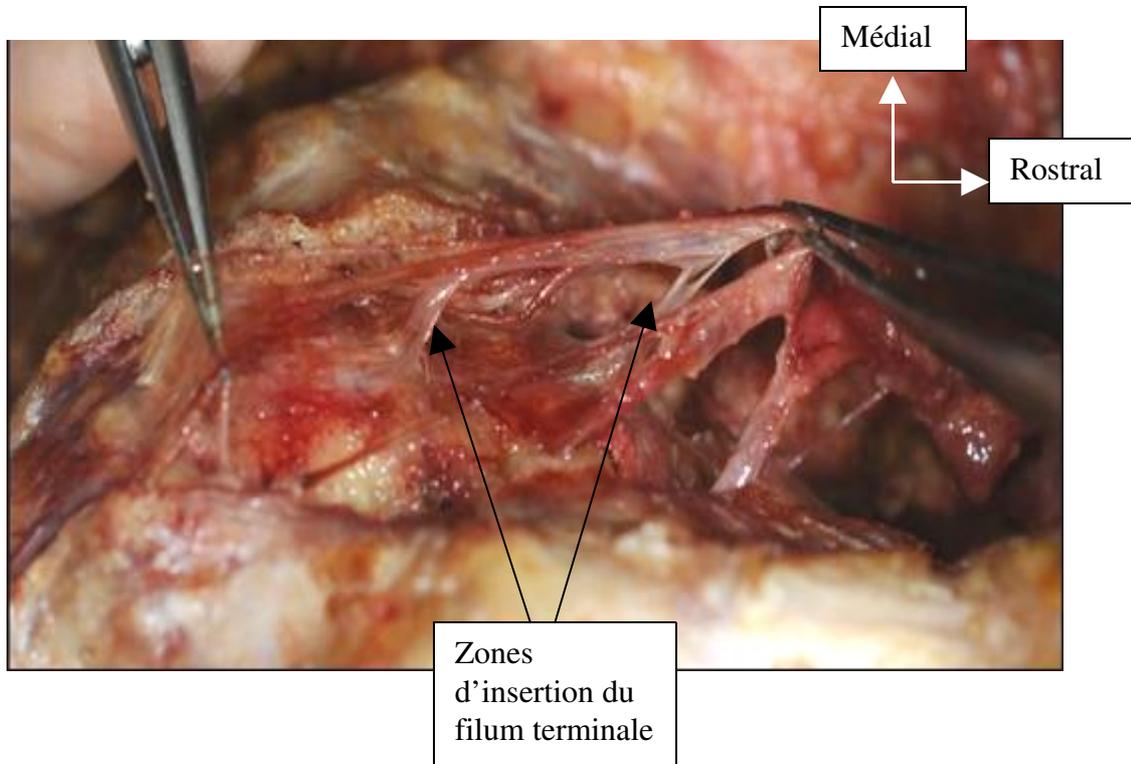
Après avoir réséqué l'opercule interne et récliné la racine spinale et le ganglion rachidien, la graisse diffluante et abondante du foramen inter-vertébral a été retirée afin de visualiser la face interne de l'opercule externe. Ce dernier présente deux orifices, un pour la racine nerveuse et l'autre pour l'artère spinale.



Face interne de l'Opercule externe avec ses deux orifices

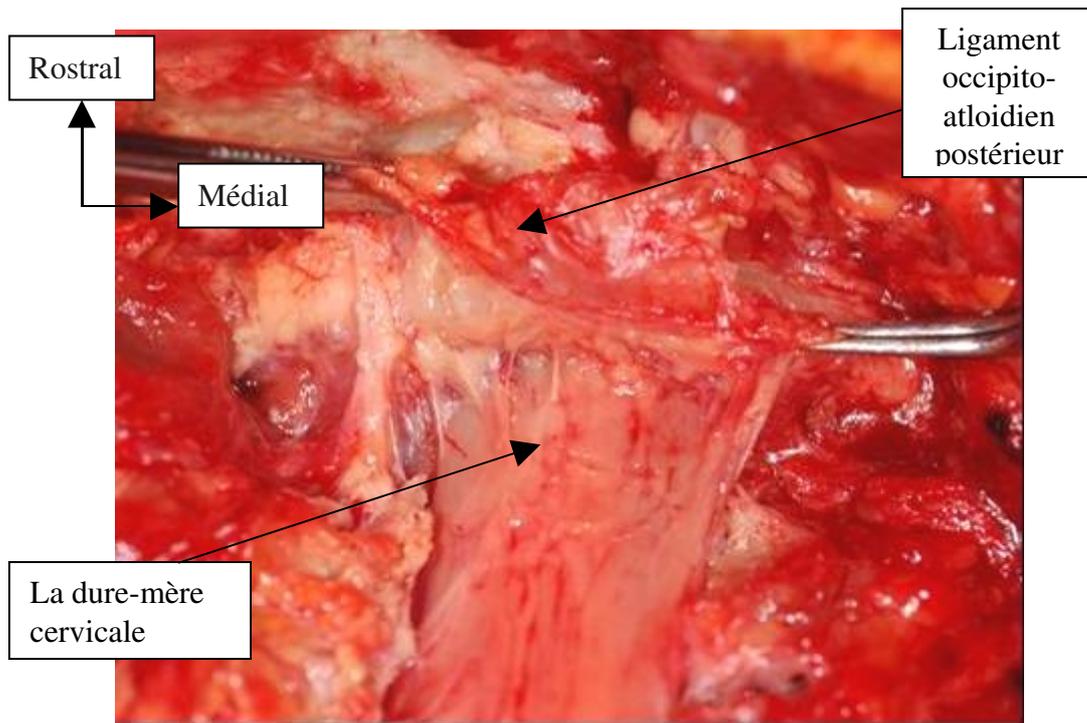
d. Filum terminale

La partie distale de la dure-mère se termine par le filum terminale constitué de cordons fibreux, qui s'insèrent sur la partie inférieure de la face postérieure du sacrum et sur le coccyx.



e. Attaches cervicales

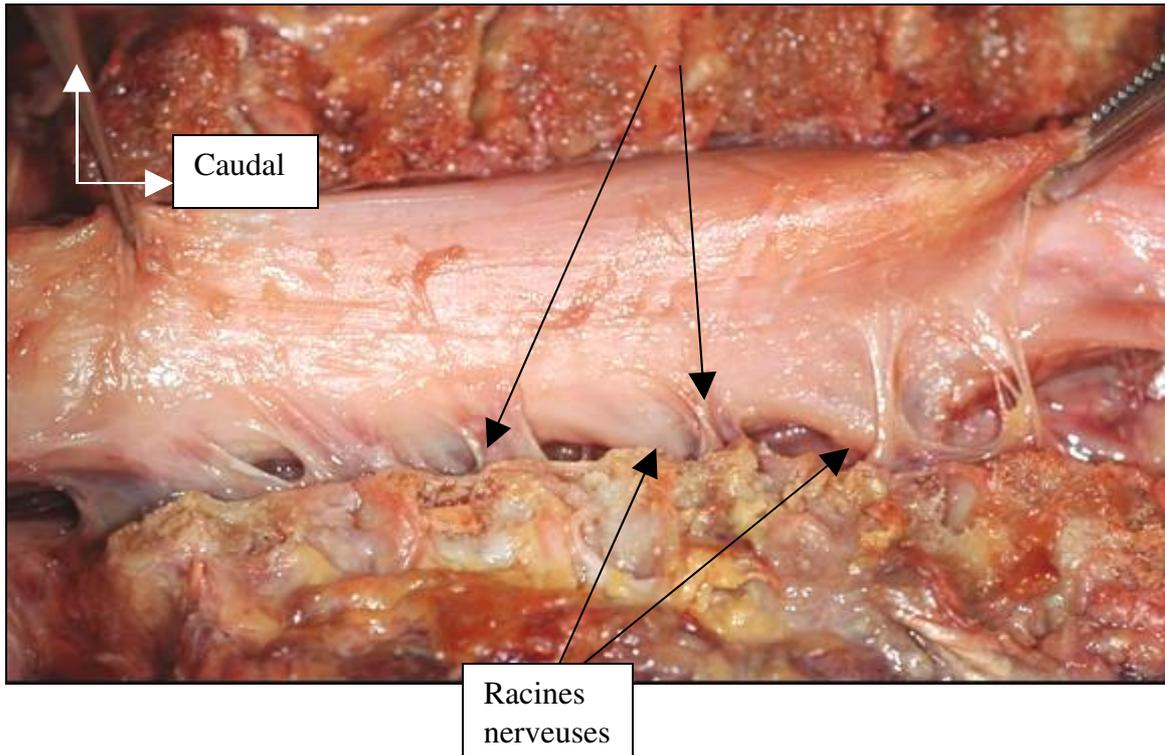
J'ai retrouvé un lien direct entre le ligament occipito-atloïdien postérieur et la dure-mère. Ce ligament passe en pont sur l'arc postérieur de C1 en s'y insérant. Ses fibres viennent ensuite se mêler à celle de la dure-mère.



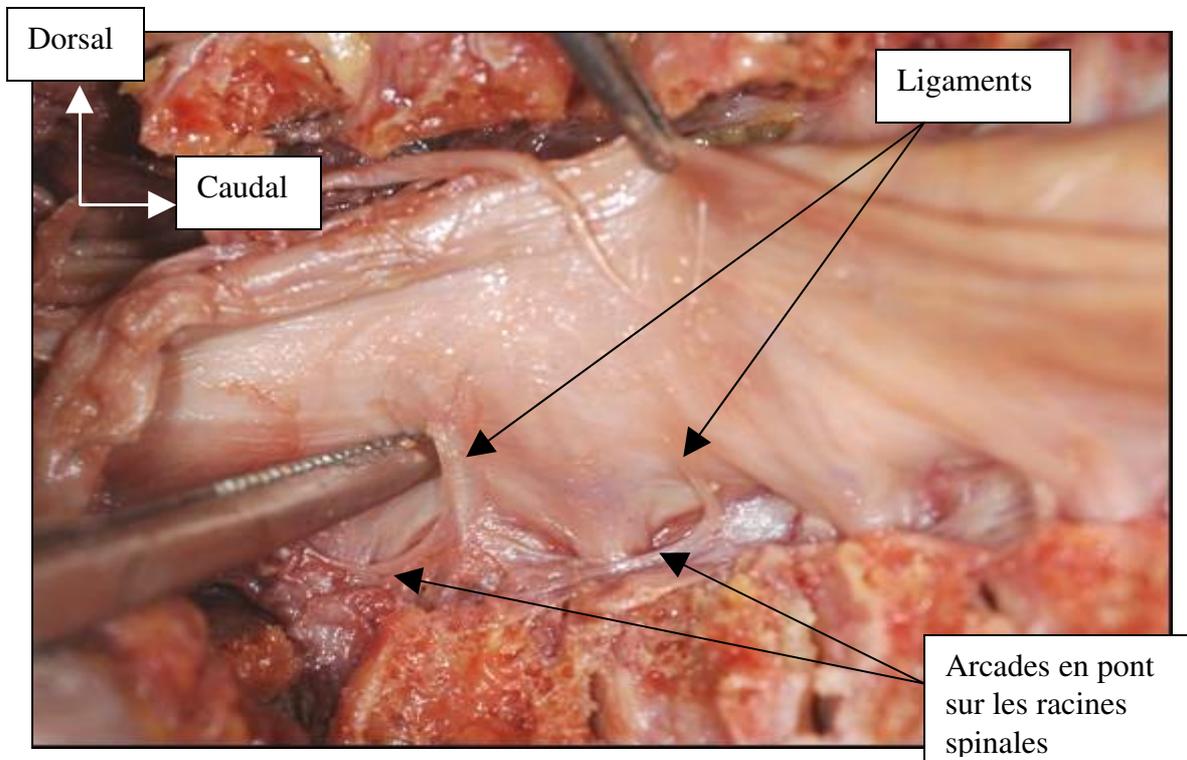
J'ai également observé au niveau cervical de véritables ligaments qui relient la face dorso-latérale de la dure-mère spinale au ligament longitudinal postérieur. Je n'ai retrouvé aucune description de ces structures dans la littérature.

Dorsal

Ligaments

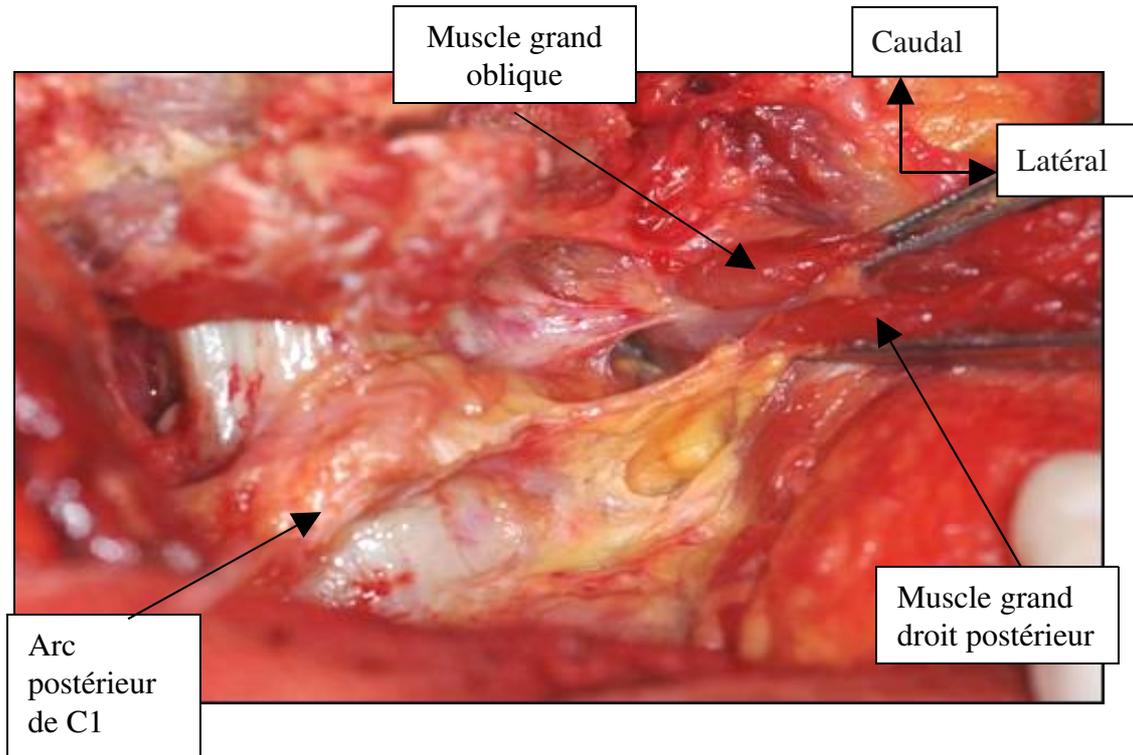


A noter, leur direction vers l'avant et légèrement en dehors. Ils prennent une direction craniale, transverse ou caudale en fonction de l'étage vertébral. Ils naissent à la partie postéro-latérale de la dure-mère spinale, entre les racines spinales pour ensuite se rejoindre et réaliser une arcade en pont sur la face postérieure de la racine spinale. De part et d'autre de la racine nerveuse, ils donnent des expansions au ligament longitudinal postérieur.



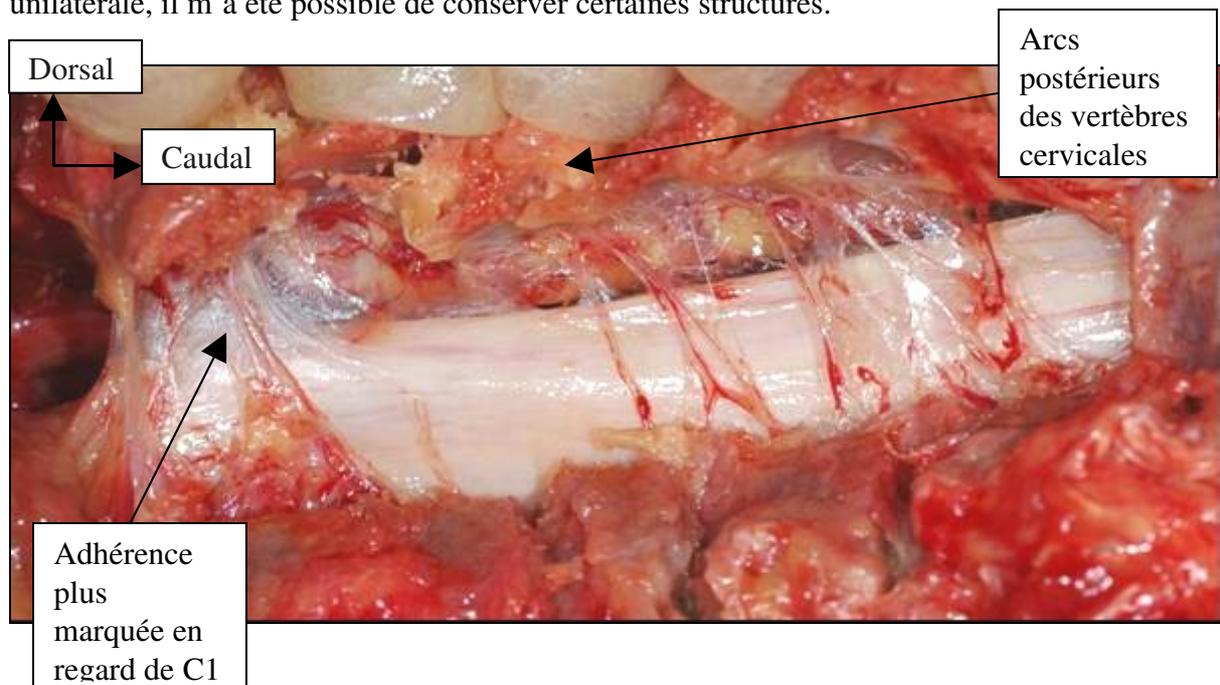
Hormis les ligaments qui relient la dure-mère au canal vertébral, j'ai été surprise de retrouver des insertions musculaires directement sur la dure-mère via un système

aponévrotique. Sur la photo ci-dessous, les insertions au niveau de C2 des muscles grand oblique et grand droit postérieur ont été réséqués.

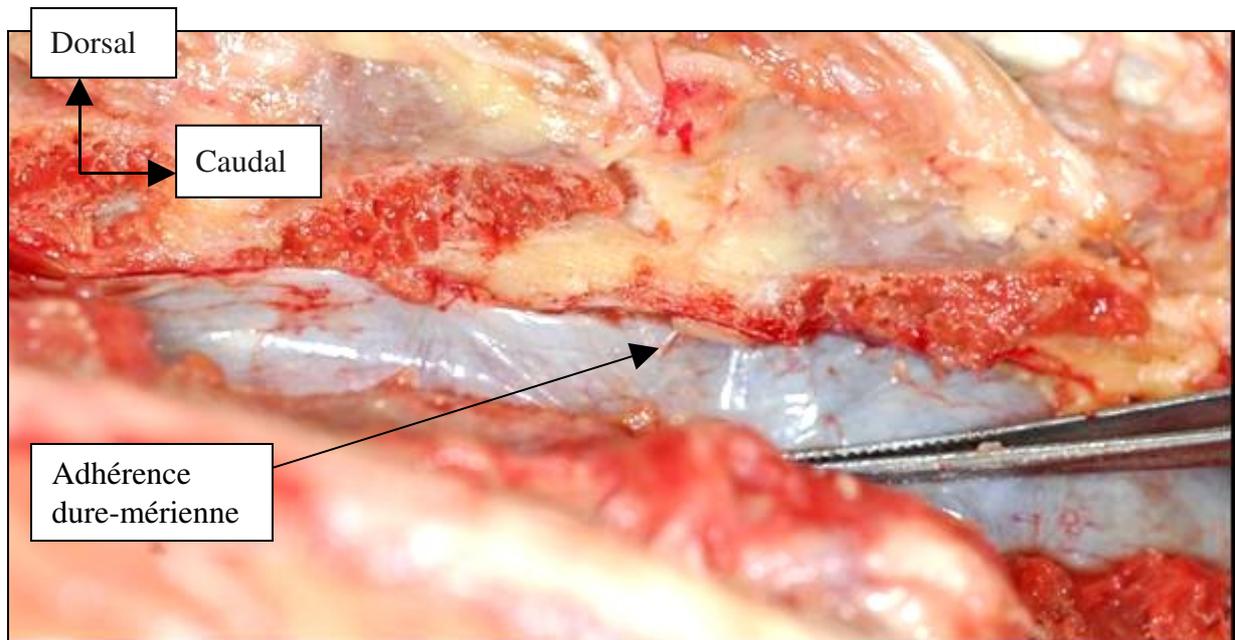


f. Attaches postérieures

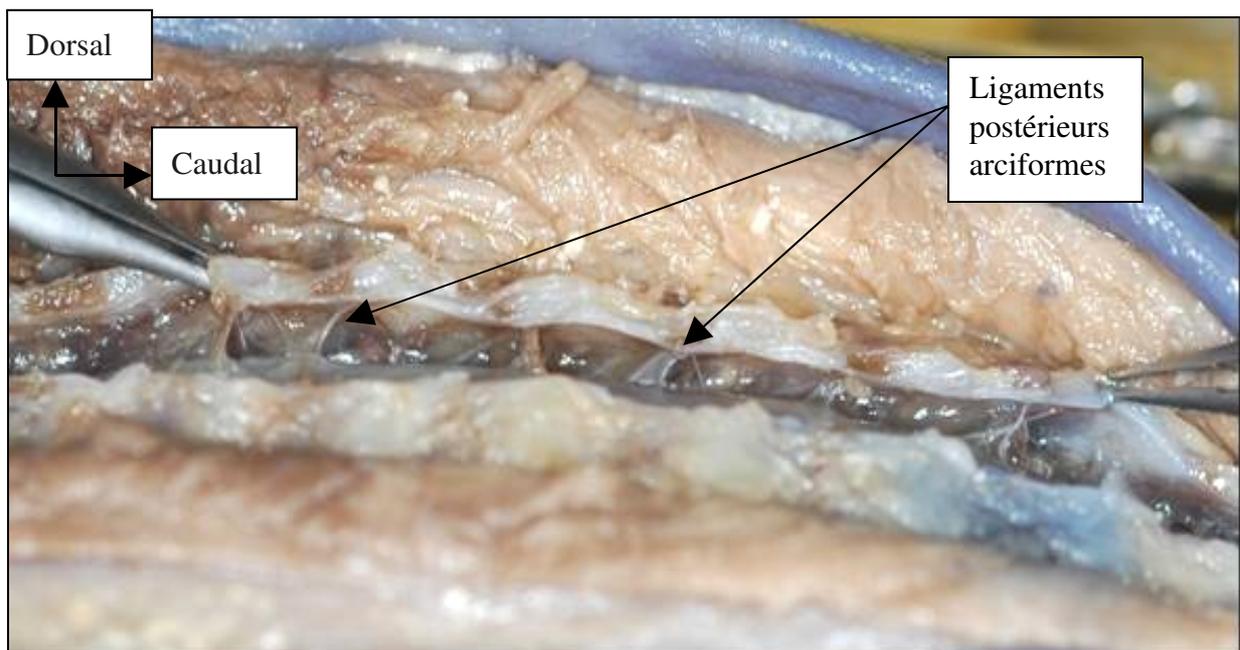
Bien que peu décrites dans la littérature, il existe des attaches dure-mériennes postérieures. Elles ont été difficilement conservables lors de cette étude, à cause de l'utilisation d'une voie d'abord postérieure. Cependant, en procédant par une laminectomie unilatérale, il m'a été possible de conserver certaines structures.



J'ai notamment retrouvé sur un sujet, une véritable adhérence entre la dure-mère et l'arc postérieur des vertèbres de T8 à T12.

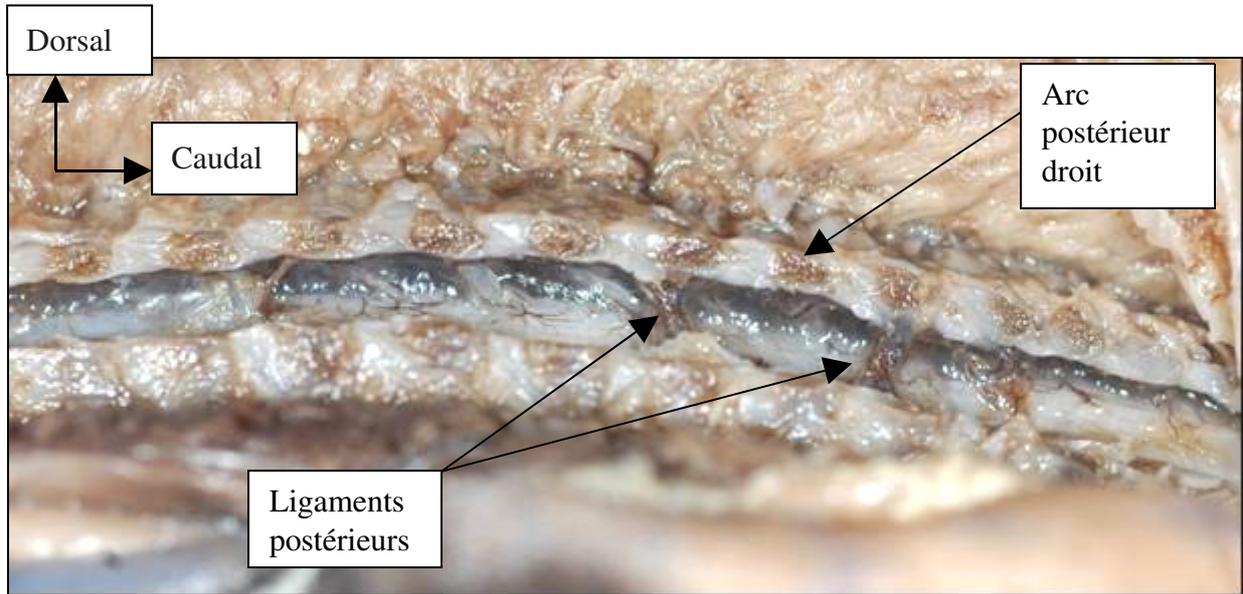


Chez le fœtus des ligaments postérieurs sont visibles à tous les étages vertébraux. A noter la disposition arciforme au niveau lombaire.



Au niveau lombaire

Au niveau dorsal, ces formations conjonctives postérieures accompagnent des structures vasculaires.



A l'étage dorsal

g. Histologie

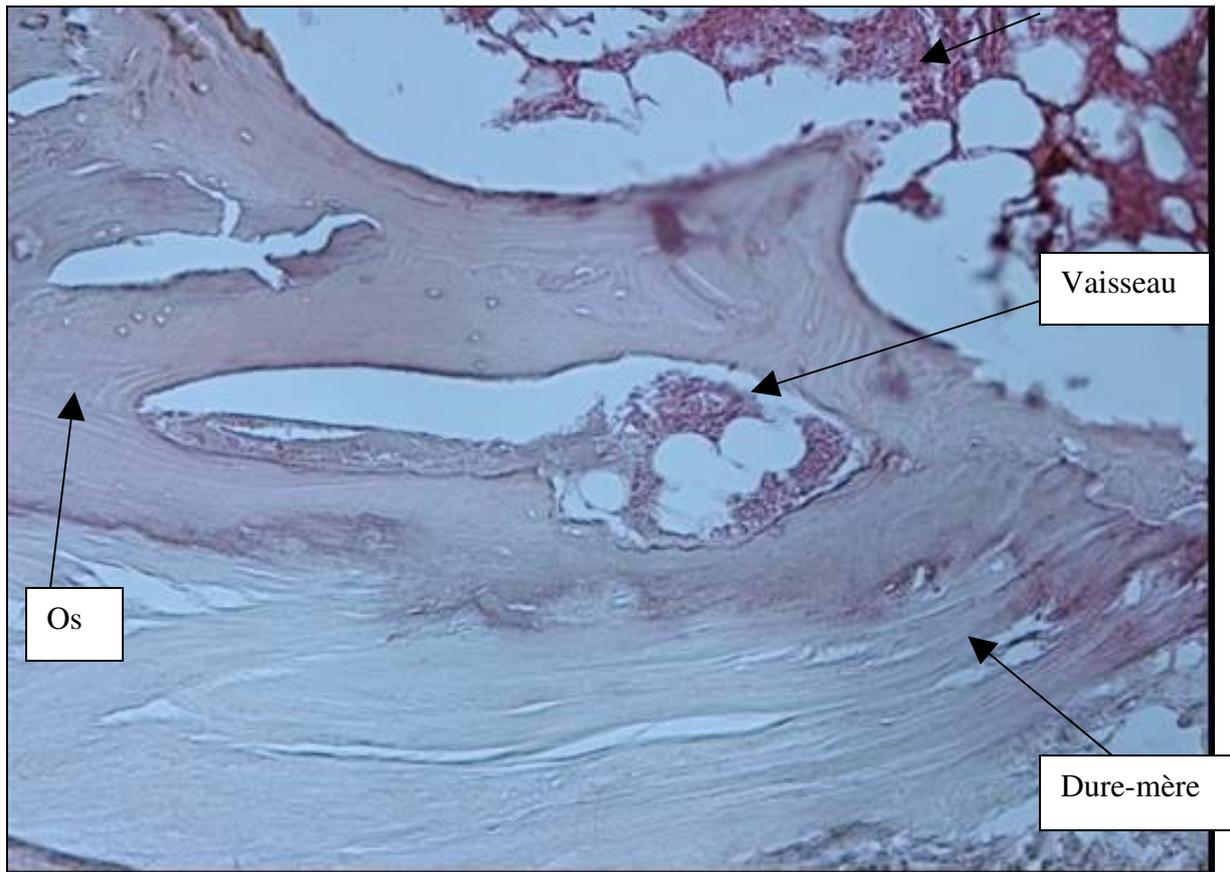
L'étude histologique a permis de mettre en évidence une continuité des tissus entre la dure-mère et l'os. Une zone que l'on pourrait qualifier d'enthèse.

En effet, j'ai pu retrouver à certains endroits une conformation identique, comprenant une zone de fibrocartilage qui passe brutalement à une zone de fibrocartilage calcifié dont la limite de minéralisation se fait par l'apparition d'une ligne basophile (ligne bleue). Sous cette couche de fibrocartilage minéralisé, se situe une zone constituée par l'os trabéculaire.

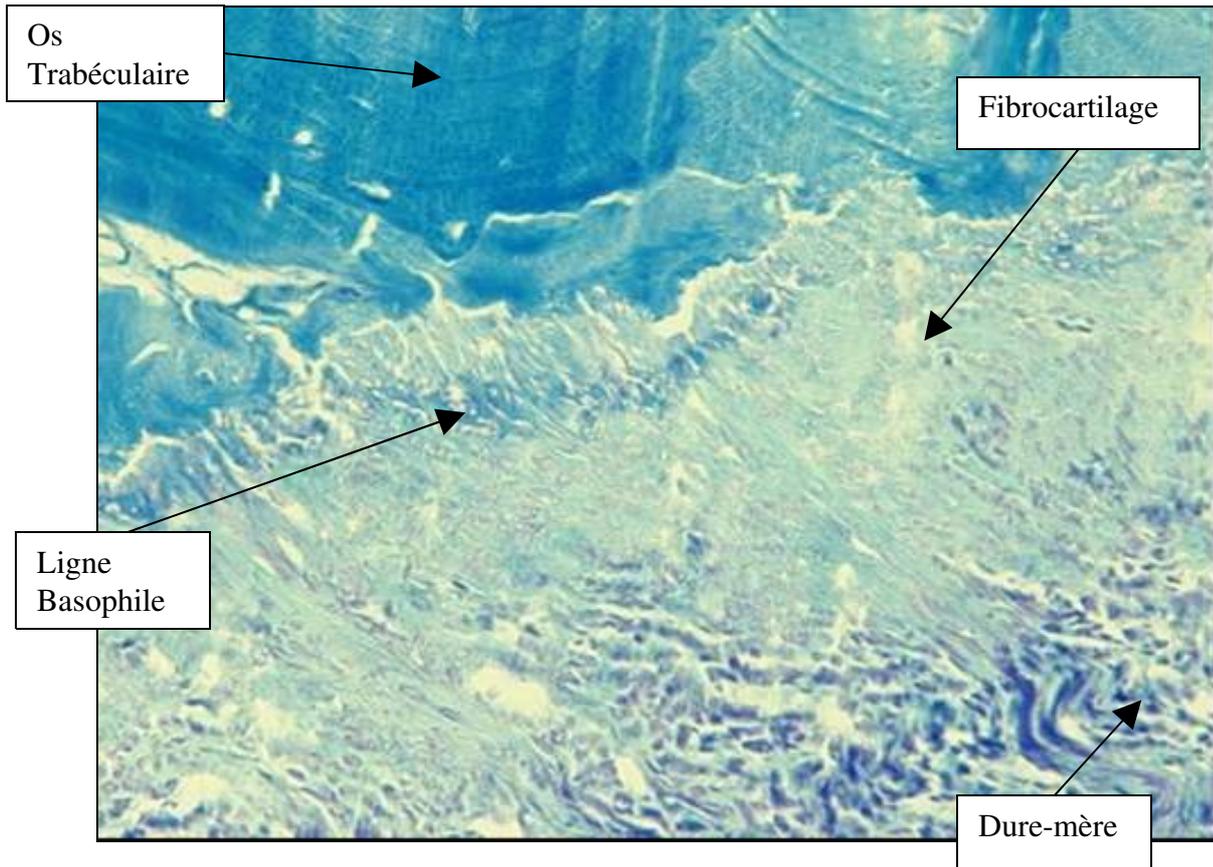
La vascularisation de cette région est assurée principalement par les vaisseaux du périoste.

J'ai également observé les différentes orientations des fibres conjonctives de la dure-mère correspondant aux formations arciformes dans les trois plans de l'espace du ligament de Trolard.

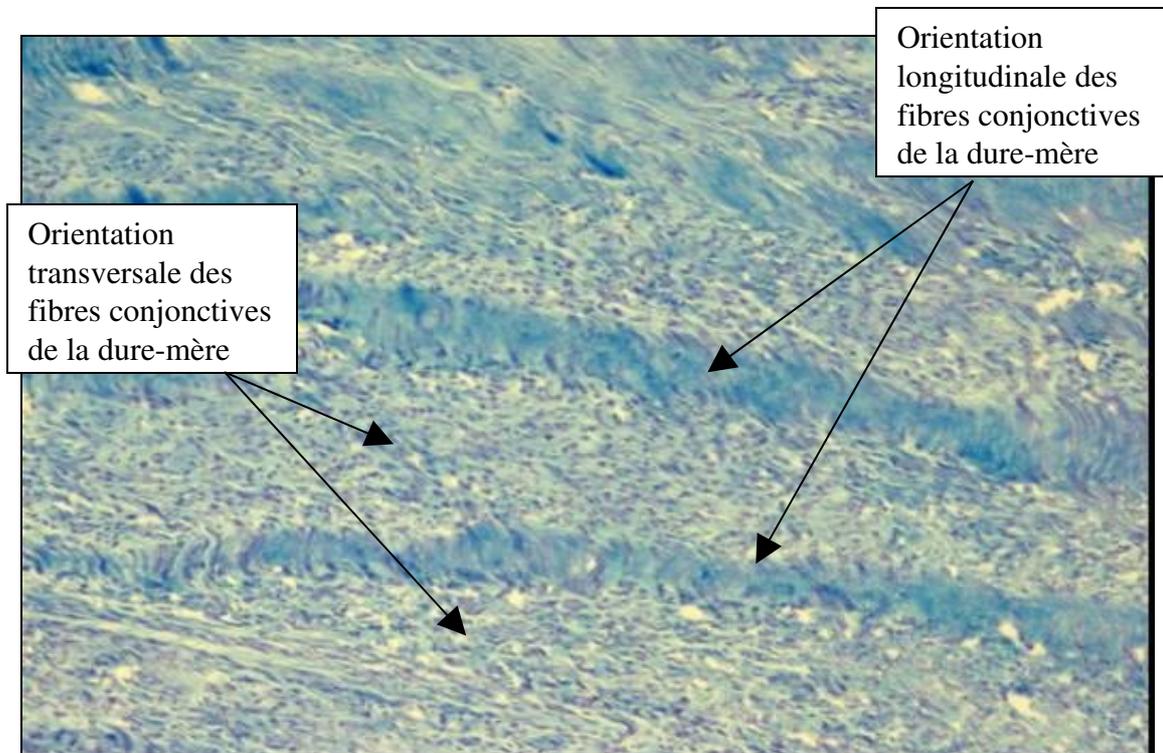
Moelle
osseuse



Coupe Transversale en L2
Coloration Hématoxyline-éosine



*Coupe transversale en L2
Coloration Luxol Fast Blue*



*Coupe transversale en L2
Coloration Luxol Fast Blue*

V) Discussion

a. Les limites de l'étude et réflexion

Les sujets d'étude ont une moyenne d'âge de 88 ans et présentent donc des rachis dégénératifs où les adhérences peuvent être considérées comme étant plus fréquentes. Il serait donc intéressant d'élargir l'étude. Cependant, nous avons pu constater qu'il existe également des attaches sur le fœtus.

Mon étude ne s'est effectuée que sur cinq sujets, elle est donc limitée. Cependant, elle rejoint celle de Max Girardin qui s'est effectuée il y a 20 ans sur une quarantaine de sujets. Mais par faute de temps je n'ai pas pu la traduire intégralement. En effet, elle est écrite en néerlandais.

De même, je n'ai pu traduire les thèses néerlandaises très intéressantes de Jean-Paul Höppner et de Patrick Van Dun respectivement sur la vascularisation et l'embryologie de la dure-mère, je n'ai donc pas pu comparer mes résultats avec leurs expérimentations.

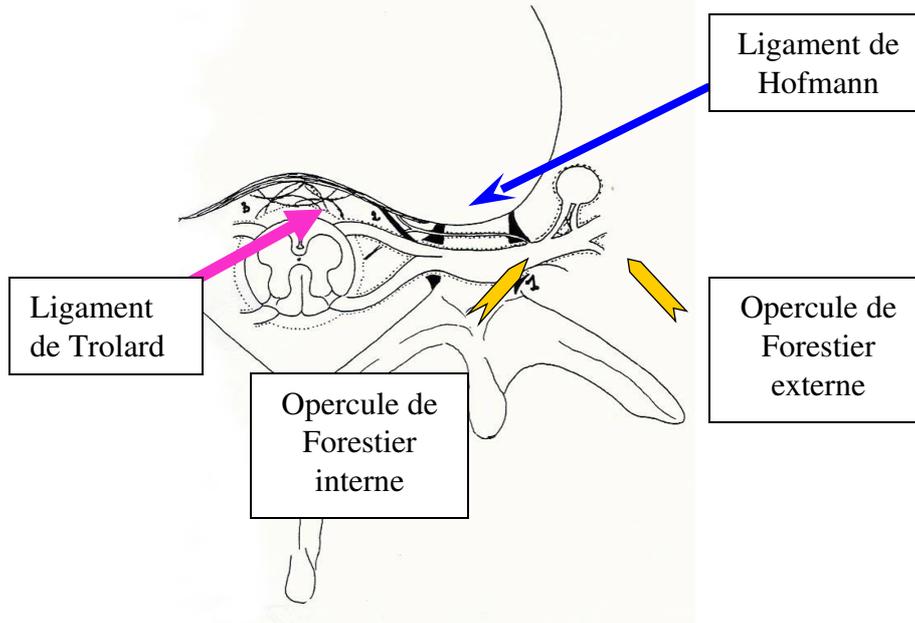
Pour cette recherche, j'ai utilisé une voie d'abord postérieure par laminectomie, ce qui ne m'a pas permis de conserver facilement le système d'attache postérieur.

J'ai également choisi de ne pas détailler les trousseaux fibreux de Soulié. Ce sont des attaches conjonctives fragiles, ressemblant à de l'arachnoïde et qui sont impossibles à conserver intactes à tous niveaux. Il semblerait que ces fibres accompagnent la vascularisation de la dure-mère, et constitue donc un véritable moyen de fixité. J'ai pu relever leur présence tout autour de la dure-mère tant à sa face antérieure que postérieure mais il ne m'a pas été possible de retrouver l'écrit original de Soulié.

Comme nous avons pu le voir tout au long de ce travail, les insertions de la dure-mère, bien que non décrites dans la plupart des ouvrages anatomiques classiques, ont fait l'objet d'une étude approfondie il y a plus d'un siècle. La plupart des attaches dure-mériennes ont été décrites et répertoriées mais l'anatomie ayant perdu de son importance dans l'enseignement, des choix pédagogiques ont du être fait éliminant de ce fait des connaissances importantes que l'on ne retrouve plus dans les livres d'anatomie classiques.

b. Systématisation

D'après Max Girardin

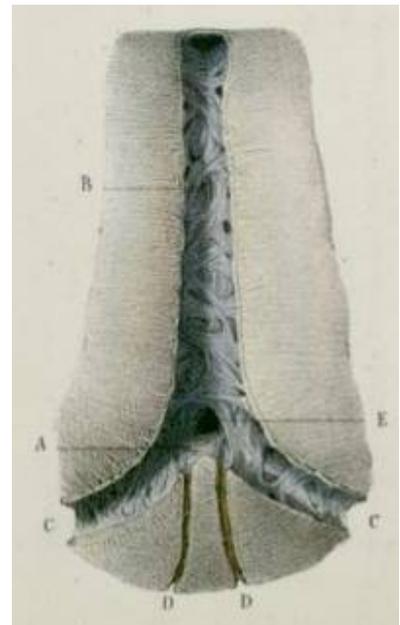


c. Ligament de Trolard

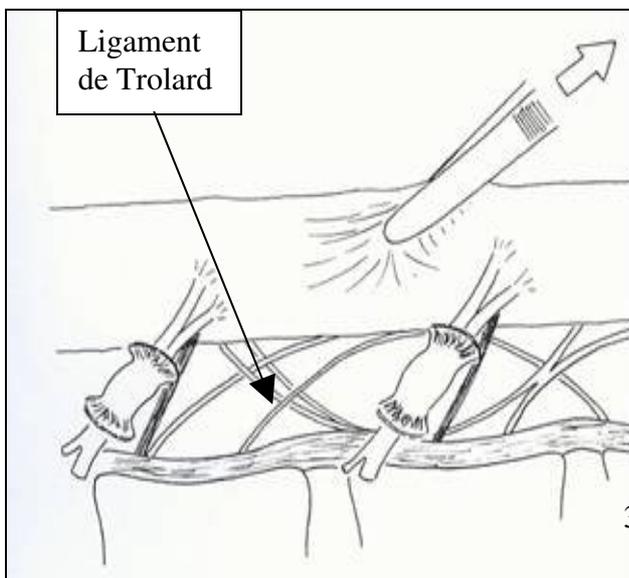
J'ai pu mettre en évidence trois morphologies différentes du ligament de Trolard et j'ai pu constater que les formations à type de cloison et d'adhérence étaient plus fréquentes chez un sujet présentant une scoliose. Il serait donc intéressant d'élargir l'étude pour savoir s'il existe une prédisposition à un type morphologique ou à un autre.

Nous pouvons également remarquer, sur des schémas d'Hirschfeld de 1853, la présence de fibres arciformes au niveau des insertions de la dure-mère crânienne sur la voûte. Ces schémas ressemblent étonnamment à la conformation des fibres dure-mériennes du ligament de Trolard tout au long du rachis.

Il serait donc intéressant de comprendre si cette disposition particulière a une explication biomécanique.



D'après Hirschfeld



L'expérience de Max Girardin montre qu'en tractant la dure-mère caudalement ou crânialement, une partie des fibres conjonctives du ligament de Trolard se tend tandis qu'une autre partie se relâche.

Ce système arciforme est conformé dans les trois plans de l'espace, avec des arches à convexité dure-mérienne et d'autres à convexité rachidienne.

On a donc affaire ici à un véritable réseau ligamentaire qui contrôle le mouvement de la dure-mère dans le rachis. Ce système permettrait donc d'harmoniser le rapport contenant-contenu entre le rachis et la dure-mère.

D'après Max Girardin

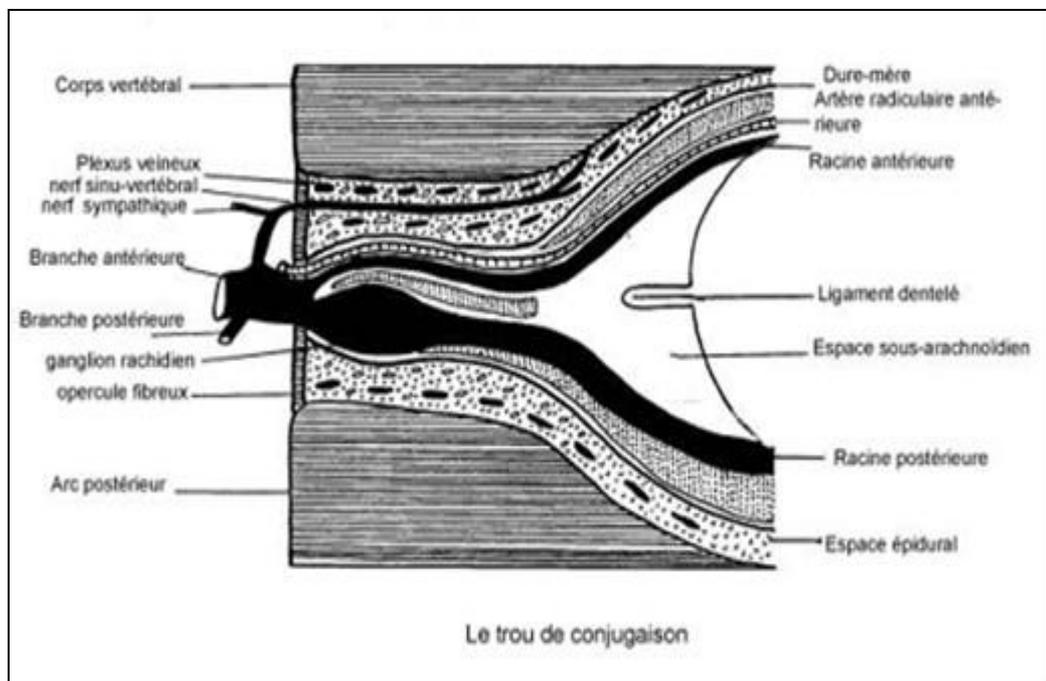
d. Ligament de Hofmann

Les ligaments de Hofmann présentent des différences de direction et de situation. Ils se sont développés soit antérieurement aux racines spinales ou entre celles-ci. Ceci pourrait être expliqué par l'embryologie.

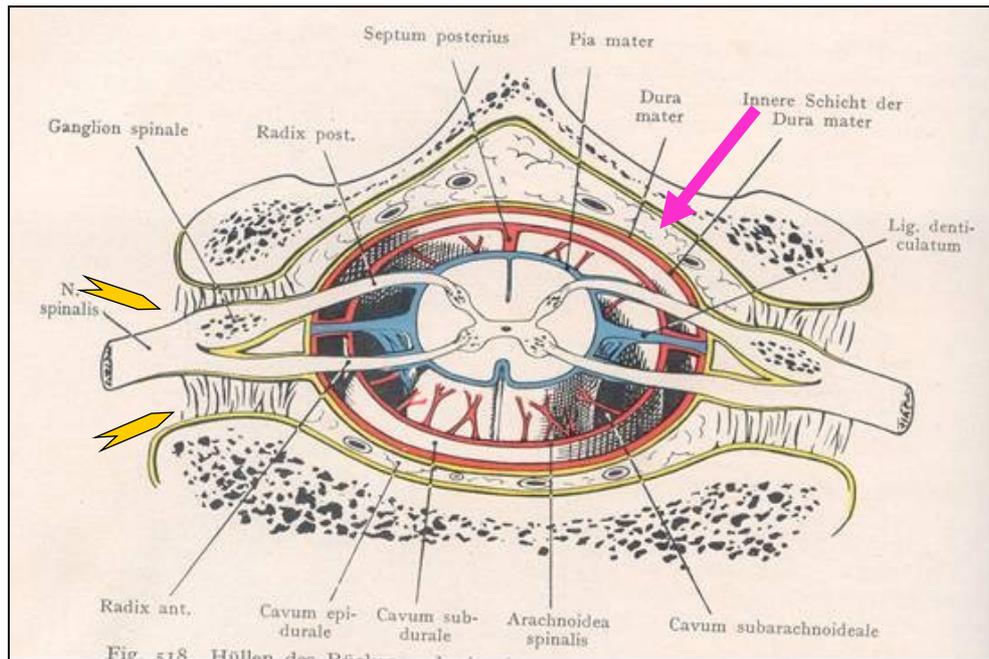
En effet, de la même façon que l'on peut expliquer la formation du sac dural par le fait que l'ascension « relative » de la dure-mère ait été moindre que celle de la moelle durant la période fœtale, nous pouvons expliquer la formation des ligaments de Hofmann par le fait que le rachis ait subi une croissance caudale plus importante que la dure-mère. Ces structures peuvent donc être considérées comme des moyens de moduler, freiner et contrôler cette croissance.

e. Opercule de Forestier

Des opercules externes en forme de « peau de tambour » ont été décrits par J. Forestier au niveau des trous de conjugaison, mais j'ai également observé des structures similaires au niveau interne. Ainsi, des schémas retrouvés dans certaines études sont incomplets, car il n'y figure pas d'opercule interne. (BOUTIN, 2007)



Il est intéressant de constater que sur un schéma de Corning de 1923 on retrouve dessiné les opercules de Forestier internes et externes même s'ils ne sont pas nommés. On retrouve également la conformation en deux feuillets (interne et externe) de la dure-mère spinale.



D'après Corning

Ces structures sont des éléments importants puisqu'ils ont des rapports directs et étroits avec le paquet vasculo-nerveux du trou de conjugaison. Bien qu'à ce niveau, la masse cellulogriseuse tient lieu d'organe protecteur, toute modification de tension au niveau de ces opercules, retentira sur la vascularisation et pourra également irriter les racines nerveuses, ce qui peut expliquer certaines névralgies.

Le trou de conjugaison est donc, par sa vascularisation abondante, susceptible d'affections que toute modification de sa fluidité retentira sur les organes de passage. En effet, l'artère élastique et résistante aura moins de chance d'en subir le contrecoup, mais les plexus veineux peuvent plus facilement subir une compression qui entraînerait une stase sanguine intrarachidienne avec ses conséquences sur l'équilibre humoral du liquide céphalo-rachidien.

f. Cas particulier des attaches dure-mériennes au niveau cervical

Je n'ai retrouvé aucune référence bibliographique des ligaments que j'ai identifiés au niveau cervical. Seul, Poirier a décrit en 1921 des structures qui pourraient s'y apparenter : « [...] *ligaments interspinaux*, particuliers aux trois premiers nerfs cervicaux, dont ils relient les gaines dures en les unissant en une double cloison ».

J'ai retrouvé ces structures sur deux sujets, mais il serait intéressant d'élargir l'étude pour savoir si on les retrouve de façon constante et s'il y a des variations de forme ou de situation en fonction des individus.

En outre, je n'ai pu individualiser avec précision les insertions musculaires sur la dure-mère cervicale. Je n'ai pas pu non plus faire d'étude histologique de la dure-mère cervicale pour savoir si l'on peut mettre en évidence des structures à type de mécanorécepteur ou

barorécepteur. Il serait donc intéressant d'approfondir l'étude à cet étage pour en comprendre la physiologie.

VI) Conclusion

La dure-mère n'est donc pas une structure qui flotte dans le canal vertébral, mais elle y adhère fortement par l'intermédiaire de diverses structures.

Maintenue en haut et en bas par ses attaches au niveau du foramen magnum et par le filum terminale, la dure-mère est attachée latéralement aux parois osseuses par l'intermédiaire des opercules de Forestier et des ligaments de Hofmann. Elle est enfin maintenue antérieurement, par une structure sagittale médiane, du nom de ligament de Trolard. Ce ligament, peut prendre différents aspects. Souvent fenêtré et formé de fibres arciformes, il peut aussi apparaître sous forme de cloison complète, ou être absent en faisant place à une adhérence forte entre la dure-mère et le ligament longitudinal postérieur.

Le facteur probablement le plus important qui interviendrait dans la dynamique d'adaptation de la moelle épinière et de la dure-mère spinale face aux variations de dimensions du canal vertébral, est constitué par ces différentes attaches du système dure-mérien rachidien aux structures osseuses.

a. Ouvrages anatomiques et embryologiques

BOUCHET A. & CUILLERET J.

Anatomie, topographique, descriptive et fonctionnelle, Tome 1 – Le système nerveux central, la face, la tête et les organes des sens – Edition Simep SA, 1983, Lyon, pp 159-161

BOURRET P. & LOUIS R.

Anatomie du système nerveux central, Expansion Scientifiques Françaises, Paris VI^{ème}, 1974, pp 109-110

CORNING H. K.

Lehrbuch der Topographischen Anatomie für Studierende und ärzte, Munich, 1923

ESTIENNE CH.

La dissection des parties du corps humain – Ed. Simon de Colines, Paris, 1546, pp 369-370

HIRSCHFELD L.,

Névrologie ou description et iconographie du système nerveux et des organes des sens de l'homme, Paris : J.-B. Baillière, 1853

LAZORTHES G., GOUAZE A., DJINDJIAN R.

Vascularisation et Circulation de la moelle épinière - Anatomie, Physiologie, pathologie, angiographie- Edition Masson&Cie, Paris, 1973

LAZORTHE G.

Système Nerveux Central – Description Systématisation Exploration, 3^{ème} Edition, Masson, Paris, 1983

NETTER F. H.

Atlas d'Anatomie Humaine, Traduction Kamina P., 3^{ème} édition, Masson, 2004

PATURET G.

Traité d'Anatomie Humaine, Tome IV -Système Nerveux- Edition Masson & Cie, Paris, 1964, pp 651-655

POIRIER P., CHARPY A.

Traité d'Anatomie Humaine, Tome III, 1^{er} et 2^{ème} fascicules -Système nerveux- 3^{ème} édition, Masson et Cie, Paris, 1921, pp 318-322

ROUVIERE H., DELMAS A.,

Anatomie Humaine descriptive, topographique et fonctionnelle, Tome IV -Système nerveux central- 15^{ème} Edition, Masson, Paris, 2002, pp 126-128

SAPPEY PH. C.,
Traité d'anatomie descriptive, Tome II, Paris, 1869

Traité d'anatomie descriptive, Tome III – Névrologie, organes des sens - 2^{ème} édition,
Paris, 1872

SPALTEHOLZ W., SPANNER R.
Handatlas der Anatomie des Menschen, Scheltema & Holkema, Amsterdam, 1970, p 82

TESTUT L.
Traité d'Anatomie Humaine, Tome II –Angéiologie, Système nerveux central- 4^{ème} édition,
Paris, 1900, pp 412-413, 894-898

TOLDT C., HOCHFTETTER F.
Anatomifcher Atlas – Dreiundzwanzigste Auflage, 23^{ème} édition, Urban & Schwarzenberg,
Wien, 1957, pp 153-155

WILLIAMS and WARWICK
Gray's anatomy, 36th ed., Churchill Livingstone, London, 1984

b. Thèses

BOUTIN J.-L.
Présentation du thorax, chapitre V le complexe vertébral thoracique, 2007
<http://www.osteopathie-france.net/content/view/106/525/>

DUBY P.
Contribution à l'étude anatomique du cul-de-sac dural, Annales de Médecine Ostéopathique,
vol. 1, Tome 1, 1985, pp 9-13

FORESTIER J.
Le trou de conjugaison vertébral et l'espace épidual, Thèse de médecine, Paris, 1922

GIRARDIN M.
Anatomische realiteit omtrent het ligament van Trolard en de caudale durale inserties, Thesis
voor het behalen van de titel D.O., 1992

GIRARDIN M., VAN DUN P.,
Embryological study of the spinal dura and its attachment into the vertebral canal,
Commission for Osteopathic Research Practice and Promotion (CORPP), 2003

KLEIN P., BURNOTTE J.
Contribution à l'étude biomécanique de la moelle épinière et de ses enveloppes, Annales de
Médecine Ostéopathique, vol. 1, Tome 3, 1985, pp 99-105

TANON

Les artères de la moëlle dorso-lombaire, Thèse, Paris, 1908

c. Articles

ESTEBE J-P., RIZK L.,
Anatomie lombaire appliquée à la rachianesthésie, 2003,
http://www.alrf.asso.fr/site/agora/cen/b_estebe_2003.htm

GEERS C., LECOUVET F., BEHETS C., MALGHEM J., COSNARD G., LENGELE B.,
Polygonal Deformation of the Dural Sac in Lumbar Epidural Lipomatosis: Anatomic Explanation by the Presence of Meningovertebral Ligaments, Human Anatomy Research Unit, St. Luc University Hospital, Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium, Présenté en partie au 28^{ème} Meeting de la Société Française de Neuroradiologie, Bruxelles, Belgique, 2000, et au 12^{ème} Congrès Européen d'Anatomie, Lyon, France, 2001.

TROLARD P.
Recherches sur l'anatomie des méninges spinales, des nerfs sacrés et du filum terminale dans le canal sacré, Archives de Physiologie 2 : 191-199, Paris, 1888

WADHAWANI S., LOUGHENBURY P., SOAMES R.,
The anterior dural (Hofmann) ligaments, School of Biomedical Sciences, University of Leeds, Leeds, United Kingdom, American Journal of Neuroradiology, 24:1276-1282, August 2003