



HAL
open science

**Anatomie osseuse tomодensitométrique de la portion
pédiculaire du foramen intervertébral du rachis cervical
inférieur : cartographie dans une population
asymptomatique et comparaison aux foramens sténosés
d'une population névralgique**

Pierre Coudert

► **To cite this version:**

Pierre Coudert. Anatomie osseuse tomодensitométrique de la portion pédiculaire du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur : cartographie dans une population asymptomatique et comparaison aux foramens sténosés d'une population névralgique. Médecine humaine et pathologie. 2018. dumas-02091557

HAL Id: dumas-02091557

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02091557>

Submitted on 5 Apr 2019

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.

**Anatomie osseuse tomодensitométrique de la portion
pédiculaire du foramen intervertébral du rachis cervical
inférieur : cartographie dans une population
asymptomatique et comparaison aux foramens sténosés
d'une population névralgique**

Pierre Coudert

► **To cite this version:**

Pierre Coudert. Anatomie osseuse tomодensitométrique de la portion pédiculaire du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur : cartographie dans une population asymptomatique et comparaison aux foramens sténosés d'une population névralgique. Médecine humaine et pathologie. 2018. dumas-02091557

HAL Id: dumas-02091557

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02091557>

Submitted on 5 Apr 2019

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.

N° 3128

**THÈSE pour l'obtention du DIPLOME d'ÉTAT de DOCTEUR EN
MÉDECINE**

Présentée et soutenue publiquement

Par **Pierre COUDERT**

Né le 14 Octobre 1987 à Montmorency

Le 15 octobre 2018

**Anatomie osseuse tomodensitométrique de la portion pédiculaire
du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur. Cartographie
dans une population asymptomatique et comparaison aux
foramens sténosés d'une population névralgique**

Directeur de thèse : **Pr Olivier Gille**

Composition du jury

Monsieur le Professeur Jean-Marc VITAL, Président
Monsieur le Docteur Louis BOISSIÈRE, Rapporteur
Monsieur le Docteur Vincent POINTILLART
Monsieur le Professeur Thierry FABRE
Monsieur le Professeur Olivier HAUGER
Monsieur le Professeur Olivier GILLE

REMERCIEMENTS

À mon maître et président du jury :

Monsieur le Professeur Jean-Marc VITAL,

Vous me faites l'honneur de présider cette thèse. Je vous suis très reconnaissant pour les connaissances et savoir-faire chirurgicaux que vous m'avez enseignés. Vous m'avez ouvert la porte du service quand je suis arrivé à Bordeaux au début de mon internat et transmis la passion pour la chirurgie de la colonne vertébrale. Vous m'avez également lancé sur les rails de l'anatomie, science fondamentale pertinente chirurgicalement et intellectuellement, je n'ai pas eu les épaules pour embrasser cette carrière mais cette discipline sera toujours présente en moi et au sein de mes réflexions. Je vous prie de voir en ce travail l'illustration de mon plus profond respect et de ma plus grande reconnaissance.

À mon maître, directeur de thèse et juge :

Monsieur le Professeur Olivier GILLE,

Vous me faites l'honneur d'avoir dirigé ce travail. Votre dextérité chirurgicale, vos connaissances et votre expertise en chirurgie rachidienne ont enrichi ma formation. Je vous suis très reconnaissant pour la transmission de votre savoir et savoir-faire. Je vous remercie de m'avoir suivi durant ces 5 années d'internat malgré les rebondissements et de m'accueillir bientôt dans le service pour poursuivre ma formation à vos côtés. Soyez assuré de mon plus profond respect et de ma plus grande reconnaissance.

À mon rapporteur de thèse et juge :

Monsieur le Docteur Louis BOISSIÈRE,

Merci d'avoir accepté de relire ce travail. Ton expertise, tes connaissances dans la chirurgie de la déformation et ton implication dans la recherche scientifique sont pour moi un exemple. À plusieurs moments de mon internat j'ai pu apprendre à tes côtés, toujours dans une ambiance bienveillante et rassurante malgré la complexité de certaines interventions. Je suis admiratif de ton sang-froid et de l'intérêt que tu portes à la relation médecin-malade. Merci pour tous les enseignements que tu m'as donnés, sois assuré de ma plus grande reconnaissance.

À mes juges :

Monsieur le Docteur Vincent POINTILLART,

Vos enseignements et vos réflexions sur la chirurgie et la relation avec les malades ont laissé une grande empreinte sur ma pensée. Je vous suis très reconnaissant pour la transmission de votre savoir et de votre expérience technique. La vie n'est pas que la chirurgie et le bien-être est indispensable à notre constitution personnelle, s'il n'est pas acquis on ne peut pas réussir. Merci de m'avoir aidé à me rendre compte de cette dernière phrase. Soyez assuré de mon plus profond respect et de ma plus grande reconnaissance.

Monsieur le Professeur Thierry FABRE,

Merci d'avoir accepté de juger ce travail. Je vous suis très reconnaissant pour les savoirs techniques et théoriques que vous m'avez transmis lors de mon passage dans votre service. Je vous suis également reconnaissant envers l'esprit d'équipe et le sens du collectif que vous essayez de nous inculquer. Soyez assuré de mon plus profond respect et de ma plus grande reconnaissance.

Monsieur le Professeur Olivier HAUGER,

Merci d'avoir accepté de juger ce travail à la frontière entre nos deux spécialités. Votre expertise et vos connaissances dans le domaine de l'imagerie ostéo-articulaire sont pour moi un modèle. Soyez assuré de mon plus grand respect.

À mes maîtres de la « chirurgie Bordelaise » :

-Monsieur le Professeur Jean-Charles Le-Huec, votre dynamisme scientifique et vos qualités chirurgicales sont un exemple pour moi. Merci de m'avoir accueilli à deux reprises dans votre service et de m'avoir enseigné votre savoir. Soyez assuré de mon plus profond respect.

-Monsieur le Professeur Dominique Chauveaux, merci de m'avoir accueilli durant mon deuxième semestre, soyez assuré de mon plus profond respect.

-Le Docteur Ibrahim Obeid, ton excellence dans la chirurgie rachidienne est pour moi un exemple.

-Le Docteur Stéphane Aunoble, pour tes qualités chirurgicales et ton humilité.

-Le Docteur Vincent Souillac, pour ton expertise dans la chirurgie des membres, pour ton bon sens.

-Le Docteur Olivier Laffenetre, pour votre excellence dans la chirurgie du pied.

-Le Docteur Yann Wiart,

-Le Docteur Clément Tournier, pour tes « trucs et astuces » et ta sympathie.

-Le Docteur Marie-Laure Abi-Chahla, pour ton expertise en chirurgie de la main et ta volonté de nous former.

-Aux « Libournais » avec qui j'ai passé des moments formidables et auprès desquels j'ai beaucoup appris : le docteur Stéphane Coste, le docteur Éric Lasseur, le docteur Prakash Dindoyal, le Docteur Bertrand Dunet.

-Le Docteur Michel Allizard,

-Le Docteur Nicolas Pellet, ce semestre à Robert Picqué fût très riche pour ma formation, merci pour ton sens de l'opiniâtreté chirurgicale et ta sympathie.

-Le Docteur Véronique Darcel,

-Le Docteur Pierre Carret,

-Le Docteur Benoît Gheysens, merci pour ces 6 mois à vos côtés au cœur d'une spécialité qui m'était inconnue, merci pour votre compagnonnage.

-Le Docteur François Minet,

-Le Docteur François Junes.

À mes Chefs :

-Les Docteurs Rémi Mariey, Jean Bernard, Louis Boissière, Julien Rigal et Hugues Demezou : merci de m'avoir accompagné durant mes premiers pas en orthopédie, je vous dois mes premières vis pédiculaires, et beaucoup de bons moments.

-Les Docteurs Julien Abad, Nicolas Pommier, Charles Rivière et Julien Lucas Y Hernandez, pour ce semestre mémorable (très « evidence based medecine » et « sports med », « c'est important ! »)

-La Rafale « Bichat-ienne » : les docteurs Arnaud Cogniet, Rafael De Bartolo et Geoffrey Recanati. Je vous dois pas mal de choses : « Coudert t'es nul ! », « Coudert on ne tape pas sur une tige cimentée ! », « viens à Bordeaux, tu vois ça c'est mon quotidien », et surtout des bons moments.

-Les Docteurs Thibault Masquefa et Nicolas Verdier pour m'avoir fait opérer si j'acceptais de me faire casser les tibias au foot le jeudi soir : un 4-4-2 si proche de la RPTH bipolaire !

- Les Docteurs Alexandra Erbland et Jérémie Knafo,

-Le Docteur Vincent Challier,

-Le Docteur Stephan Ebrad, je te remercie pour ta disponibilité et ton compagnonnage.

-Les Docteurs Camille Damade et Thibault Cloché pour leur compagnonnage de fin d'internat : merci à vous.

-Le Docteur Ahmed Benzakour pour ta bienveillance.

-Les « Le-Huec's girls » : les Docteurs Wendy Thompson et Amélie Léglise, merci sincèrement pour ce dernier semestre, je vous dois beaucoup.

À mes co-internes devenus mes Chefs :

Les « OG's boys » : Souf et JET ! merci pour votre soutien permanent et votre amitié au fil des années. Je vous dois beaucoup et j'ai hâte de partager bientôt votre bureau.

À l'équipe du service d'orthopédie pédiatrique de la Timone :

-Monsieur le Professeur Jean-Luc Jouve, merci de m'avoir accueilli en inter-CHU. J'ai beaucoup appris à vos côtés par vos connaissances, vos qualités chirurgicales et votre investissement auprès des enfants. Ces 6 mois ont été primordiaux dans mon cursus. Soyez assuré de mon plus profond respect.

-Madame le Professeur Elke Viehweger,

-Les Docteurs Émilie Peltier, Elie Choufani, Jean-Marie Gennari.

À mes co-internes en stage :

-Mention spéciale pour Pépite (véritable compagne de route durant l'internat) et Audrey pour ce premier semestre : un carnage !

-Ce bon vieux Cadennes et « mini-moi » : un semestre d'anthologie.

-Mon pote Lebecque, pour les Aller-retours Bordeaux-Libourne le bistouri entre les dents.

-Ma pote Dias ! 2 semestres à se supporter tu y aurais cru toi ?

-La « fine-équipe » du membre inf : Thelen et Ribes, plus fort que « métal-métal ».

-Débi et Delgove,

-Velut,

-aux marseillais : seb et camous ! le PSG sera toujours au-dessus, rassurez-vous, il vous reste le pastis.

-La Couane le chirurgien campeur.

-Paul Sommeil, Romain, Yassine et Nabila, belle équipe !

-Monsieur Campana le travailleur fou et Cécile.

Parce qu'à Bordeaux l'orthopédie est une famille, à mes autres co-internes :

Doudou, Cremer, La Courge, Azzo, Vargas, Stratos, Alison, Mazas, Le Sergent, Jules, Moshi, Pierre, Pi-max, Critic, Legallus et tous les autres.

À mes amis :

-Aux parisiens : Clément, Bu, Geo, Alex, Clémence, Morgane

-Au canadien : Thomas

-Aux parisiens devenus bordelais : le Docteur P, Louis, Lisa

-Aux parisiens exilés : Bertrand, Babeth

-A mes amis de l'internat : Amine, Léo, Adrien, Elliot, Vivien, Alex, Renaud.

À ma famille :

-À mon défunt Grand Père, Paul Coudert, qui m'a appris les deux valeurs les plus importantes de la vie d'un homme : l'humilité et le sens de la famille pour ceux qui ont la chance d'en avoir une.

-À mes parents, Catherine et Christian, pour leur amour et leur disponibilité sans manquement. Je n'en serais jamais arrivé là sans vous. Merci de m'avoir transmis vos valeurs qui sont les miennes aujourd'hui. Vos différences créent un équilibre idéal dans lequel j'ai eu la chance de grandir, voyez en ces quelques mots une infime partie de ma reconnaissance et de l'amour que je vous porte.

-À mes grands-parents : Raymonde, Annie et François, pour les valeurs que vous nous avez transmises et pour vos bras qui nous ont toujours accueillis.

-À ma sœur Marie, à qui j'ai toujours pu me confier, tu mérites le meilleur, je suis très heureux pour toi aujourd'hui.

-À mes oncles, mes tantes, mes cousins, cousines, ma marraine, mention spéciale pour mon parrain Benoît et son « aide scientifique ».

-À Monsieur et Madame Duffo, notamment pour leur gentillesse et leur implication dans ma réussite scolaire (je n'aurais jamais pu apprendre le latin sans vous).

-À Monsieur et Madame Delpup.

-À Anaïs, merci pour ta présence et ton soutien de chaque jour. Tu es la clef de mon équilibre, je n'imagine pas les projets à venir sans toi et cette idée me rend heureux. Je t'aime.

RÉSUMÉ

Introduction :

La névralgie cervicobrachiale commune est une pathologie fréquente amenant le chirurgien à suivre les malades et à les opérer lorsque le traitement conservateur médical se solde par un échec ou lors de signes de gravité neurologique. Les deux étiologies principales sont la hernie discale « molle » et plus fréquemment la sténose foraminale dégénérative (« hernie dure »). La tomodensitométrie est un examen essentiel dans le diagnostic et l'évaluation de cette dernière étiologie, il est le plus performant pour l'analyse de la structure osseuse des compressions et fait partie du bilan préopératoire d'une sténose foraminale.

L'anatomie osseuse tomodensitométrique du foramen intervertébral cervical n'a, à notre connaissance, pas été étudié avec précision.

Les objectifs de ce travail étaient de déterminer, grâce à un protocole de mesures, la cartographie osseuse du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur dans une population jeune et asymptomatique, et d'identifier, par comparaison avec une population névralgique, quelles étaient les mesures les plus impactées par la dégénérescence arthrosique.

Matériel et méthodes :

Nous avons mené une étude rétrospective descriptive sur deux populations : une population asymptomatique de moins de 30 ans ayant eu un scanner du rachis cervical dans une indication extra-rachidienne et une population souffrant de sténose foraminale dégénérative significative cliniquement et ayant eu un scanner lors du bilan préopératoire.

Nous avons déterminé une méthode permettant la réalisation de différentes mesures tomodensitométriques dans les foramens intervertébraux du rachis cervical inférieur : hauteur foraminale (HF), longueur foraminale (LF), largeur foraminale en regard du plateau vertébral inférieur (lfPi), largeur foraminale en regard du haut de l'uncus (lfsu), largeur foraminale en regard de la base de l'uncus (lfbu), ces 3 dernières largeurs ont également été mesurées à l'entrée médiale du foramen dans le récessus (lrPi, lrsu et lrbu), hauteur discale (HD) et angulation locale (AD). Nous avons également calculé le volume de la portion pédiculaire des foramens étudiés (VF). Notre analyse statistique déterminait des moyennes et écarts-type des dimensions foraminales mesurées et du volume calculé dans la population asymptomatique selon le niveau cervical. Nous avons également étudié les éventuelles corrélations selon le sexe, les données morphologiques et entre les paramètres mesurés. Une étude de reproductibilité de nos mesures par calcul des coefficients intra-classe (ICC) a été menée. Enfin nous comparions les mesures entre la population asymptomatique et les foramens sténosés significativement de la population névralgique afin de déterminer les différences significatives.

Résultats :

Nous avons étudié 100 foramens chez 10 patients asymptomatiques et 100 foramens, dont 23 sténosés significativement, chez 10 patients névralgiques. Nos mesures étaient très reproductibles pour une précision au dixième de millimètre ($ICC > 0,9$). Nous avons déterminé

la cartographie tomодensitométrique osseuse et le volume des foramens intervertébraux aux différents étages cervicaux dans la population asymptomatique. Il existait une corrélation ($p < 0,05$) liée au sexe concernant la longueur foraminale (LF), la hauteur foraminale (HF) et la hauteur discale (HD).

La comparaison aux étages C4C5, C5C6 et C6C7 avec les foramens sténosés de la population névralgique a montré plusieurs diminutions significatives ($p < 0,001$) des mesures ainsi qu'une diminution significative ($p < 0,001$) du VF. Les dimensions les plus diminuées significativement étaient lfPi, lfsu, lrPi, lrsu et VF.

Conclusion :

Cette étude nous a permis de justifier la reproductibilité des mesures tomодensitométriques effectuées, et de déterminer une cartographie osseuse précise des dimensions foraminales dans une population jeune, asymptomatique avant le début des phénomènes de dégénérescence arthrosique. Ce travail nous montrait également que les zones foraminales les plus sténosées sont celles en regard du haut de l'uncus et du bord postérieur du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente. Cette information anatomique pourra aider le chirurgien lors des gestes de décompression foraminale afin de libérer au mieux les racines nerveuses. Un résultat intéressant de notre étude était le VF. Ce paramètre très peu étudié dans la littérature actuelle, nous semble être le plus représentatif du foramen intervertébral cervical. Il apparaît important de poursuivre cette étude par un travail volumique (volume mesuré et non calculé) des foramens intervertébraux cervicaux.

SOMMAIRE

LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	10
INTRODUCTION	11
NOTIONS FONDAMENTALES.....	13
I. Rappels anatomiques.....	13
A. Anatomie générale de la colonne vertébrale.....	13
B. Ostéologie de la vertèbre cervicale type	14
C. Le canal vertébral cervical	17
D. Le foramen intervertébral cervical	19
E. La région unco-vertébrale.....	25
II. Le vieillissement du rachis cervical inférieur.....	27
A. Histoire naturelle dégénérative	27
B. Physiopathologie de la radiculopathie et de la myélopathie cervicarthrosique	28
MATERIEL ET METHODES.....	33
I. Patients étudiés	33
A. Population jeune asymptomatique	33
B. Population névralgique.....	33
II. Recueil des données	34
A. Données morphologiques.....	34
B. Analyse tomodensitométrique.....	34
III. Analyse statistique.....	45
A. Analyse de la reproductibilité des mesures	45
B. Analyse de la cohorte « population asymptomatique »	45
C. Analyse comparative	46
RESULTATS.....	47
I. Populations étudiées	47
A. Description de la cohorte « patients asymptomatiques »	47
B. Cohorte « patients névralgiques »	47
II. Reproductibilité des mesures	48
III. Résultats de l'étude de la cohorte « patients asymptomatiques »	49
A. Résultats concernant les mesures des foramens intervertébraux	49
B. Résultats concernant les mesures des paramètres liés au disque intervertébral	57
C. Résultats concernant le volume des foramens intervertébraux (VF)	59
D. Résultats concernant les corrélations étudiées	60
IV. Résultats de l'étude « foramens sténosés de la population névralgique » versus « foramens de la population asymptomatique »	63
A. Analyse du niveau C4C5.....	63
B. Analyse du niveau C5C6.....	64
C. Analyse du niveau C6C7.....	65
D. Comparaison du Volume foraminal.....	66

V. Résultats de l'étude « foramens sténosés de la population névralgique » versus « foramens sains de la population névralgique »	67
A. Analyse du niveau C4C5.....	67
B. Analyse du niveau C5C6.....	68
C. Analyse du niveau C6C7.....	69
D. Comparaison du Volume foraminal.....	70
DISCUSSION	71
I. Concernant la méthodologie de nos mesures	71
II. Étude de la reproductibilité et de la répétabilité des mesures	73
III. Étude de la population « asymptotique »	74
A. Concernant les paramètres relatifs aux foramens intervertébraux	74
B. Concernant les paramètres relatifs aux disques intervertébraux	78
C. Concernant le volume foraminal (VF).....	79
D. Analyse des corrélations.....	81
IV. Étude de la population « névralgique »	83
A. Concernant les niveaux étudiés	84
B. Comparaison des niveaux C4C5, C5C6 et C6C7	84
CONCLUSION	89
ANNEXES	90
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	95
SERMENT D'HIPPOCRATE	101
ABSTRACT	102

LISTE DES ABRÉVIATIONS

NCB : Névralgie cervicobrachiale commune

C0 : occiput

C1 : première vertèbre cervicale (atlas)

C2 : deuxième vertèbre cervicale (axis)

C3 : troisième vertèbre cervicale

C4 : quatrième vertèbre cervicale

C5 : cinquième vertèbre cervicale

C6 : sixième vertèbre cervicale

C7 : septième vertèbre cervicale

T1 : première vertèbre thoracique

T2 : deuxième vertèbre thoracique

S1 : première vertèbre sacrée

C3C4 : étage entre la troisième et la quatrième vertèbre cervicale

C4C5 : étage entre la quatrième et la cinquième vertèbre cervicale

C5C6 : étage entre la cinquième et la sixième vertèbre cervicale

C6C7 : étage entre la sixième et la septième vertèbre cervicale

C7T1 : étage entre la septième vertèbre cervicale et la première vertèbre thoracique

L1L2 : étage entre la première et la deuxième vertèbre lombaire

L2L3 : étage entre la deuxième et la troisième vertèbre lombaire

HD : hauteur discale

AD : angulation du disque intervertébral / angulation locale

LF : longueur du foramen intervertébral

HF : hauteur du foramen intervertébral

lfPi : largeur foraminale en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente

lfsu : largeur foraminale en regard du haut de l'uncus (au niveau du disque intervertébral) de la vertèbre sous-jacente

lfbu : largeur foraminale en regard de la base de l'uncus de la vertèbre sous-jacente

lrPi : largeur à l'entrée médiale du foramen en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente

lrsu : largeur à l'entrée médiale du foramen en regard du haut de l'uncus (au niveau du disque intervertébral) de la vertèbre sous-jacente

lrbu : largeur à l'entrée médiale du foramen en regard de la base de l'uncus de la vertèbre sous-jacente

mm : millimètre

cm : centimètre

kg : kilogramme

kg.m⁻² : kilogramme par mètre carré

mm² : millimètre carré

mm³ : millimètre cube

cm³ : centimètre cube

ICC : coefficient de corrélation intra-classe

IRM : imagerie par résonance magnétique

INTRODUCTION

La névralgie cervicobrachiale commune (NCB) est une pathologie fréquente touchant de nombreux patients et représente un motif habituel de consultation. Un traitement médical est habituellement proposé en première intention en l'absence de signe de gravité neurologique. La chirurgie est souvent indiquée après échec d'un traitement conservateur bien conduit.

On distingue principalement deux étiologies : la hernie discale (« hernie molle ») et la sténose ostéophytique foraminale (« hernie dure »).

Ces deux entités, même si le concept du traitement chirurgical reste le même (décompression radiculaire et arthrodèse ou arthroplastie cervicale), diffèrent par leur physiopathologie.

Le rachis cervical se différencie anatomiquement des autres segments de la colonne vertébrale car il est le plus mobile et il est habituel de distinguer le rachis cervical haut (C0, C1, C2) et le rachis cervical inférieur.

Le foramen intervertébral du rachis cervical inférieur est une entité anatomique unique et différente des mêmes orifices aux étages sous-jacents. Effectivement la notion d'orifice est employée pour les foramens lombaires et thoraciques, le foramen intervertébral cervical est quant à lui un véritable canal de conjugaison ayant la forme d'un tunnel.

Le vieillissement du rachis cervical inférieur est précoce comparé à la colonne lombaire, principalement en raison de son importante mobilité et donc d'une usure discale plus rapide. Le processus de dégénérescence arthrosique cervical, bien connu aujourd'hui, est à l'origine des sténoses foraminales ostéophytiques.

Le scanner est un examen de choix, souvent plus performant que l'IRM pour l'analyse des tissus osseux. Il s'inscrit donc naturellement dans le bilan diagnostique et préopératoire des patients souffrant d'une névralgie cervicobrachiale. Il permet de rechercher les phénomènes de dégénérescence arthrosique et d'évaluer l'intensité de la sténose foraminale.

À notre connaissance il existe peu d'études dans la littérature ayant analysé avec précision l'anatomie osseuse tomodensitométrique du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur. Le foramen intervertébral a bien été étudié au niveau cervical, souvent lors de travaux anatomiques sur cadavres et nous connaissons certaines de ses dimensions. Néanmoins la majorité des études décrivaient peu de dimensions différentes (hauteur foraminale, largeur maximale du foramen, aire foraminale) et une cartographie osseuse précise n'était pas retrouvée. Nous notons également que les résultats des études cadavériques étaient influencés par le vieillissement de la colonne vertébrale cervicale.

L'objectif de notre travail était de déterminer un protocole de mesures permettant de cartographier l'anatomie osseuse tomodensitométrique de la portion pédiculaire du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur dans une population jeune asymptomatique, de s'assurer de la reproductibilité de nos mesures et de comparer ces dimensions avec celles des foramens sténosés d'une population névralgique.

Nous pouvons justifier cette étude par la nécessité d'une cartographie précise de l'anatomie osseuse du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur chez les sujets jeunes

asymptomatiques (avant le début des phénomènes de vieillissement). Ces données descriptives permettront de comparer les « dimensions foraminales normales » à celles des patients souffrant d'une NCB par sténose foraminale ostéophytique. Ce travail, réalisé in vivo sur supports tomodensitométriques, aidera les chirurgiens et autres spécialistes de la colonne vertébrale à mieux comprendre les phénomènes dégénératifs et à identifier les zones foraminales nécessitant une attention concernant le geste de décompression dans les chirurgies cervicales par cervicotomie antérieure.

Nous rappellerons des notions fondamentales concernant l'anatomie et le vieillissement du rachis cervical en préambule de notre travail. Nous présenterons ensuite la méthodologie de notre étude et ses résultats. Enfin, nous discuterons ces derniers avant de conclure.

NOTIONS FONDAMENTALES

I. Rappels anatomiques

Avant de détailler les particularités anatomiques du rachis cervical inférieur, nous rappellerons quelques concepts de base concernant l'architecture de la colonne vertébrale.

A. Anatomie générale de la colonne vertébrale

La colonne vertébrale, véritable mat du corps humain, est dans le plan frontal, parfaitement verticale et un fil de plomb appliqué sur l'occiput passe par le pli fessier.

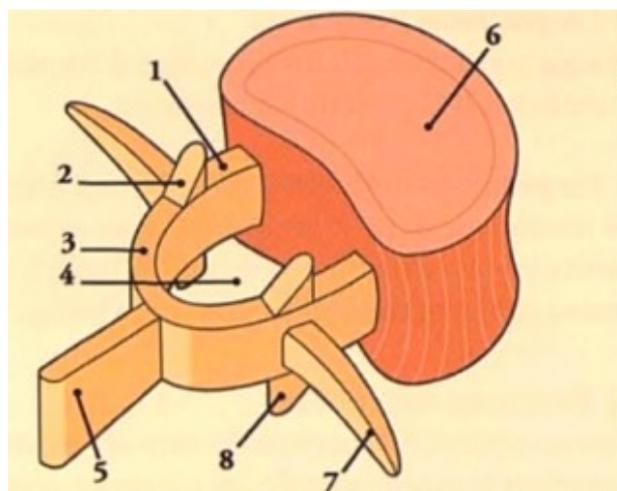
Dans le plan sagittal il existe chez l'adulte des courbures rachidiennes : une lordose cervicale d'environ 30 degrés, une cyphose thoracique d'environ 40 degrés, une lordose lombaire d'environ 50 degrés et une cyphose sacroccocygienne.

Delmas a décrit à côté de ces courbures d'angulation moyenne trois morphotypes rachidiens allant d'un morphotype statique à un morphotype dynamique (1).

Roussouly a décrit plus tard quatre types de dos (2) incluant dans sa classification les paramètres pelviens et notamment l'incidence pelvienne décrit par Duval-Beaupère (3).

Malgré les variations morphologiques selon les étages, on retrouvera toujours au niveau de chaque vertèbre les éléments d'une vertèbre fondamentale.

Figure 1 : Vertèbre fondamentale. (P.Kamina. Anatomie Clinique, Tome 2, 3^e édition. Maloine 2009. Fig 10.12 p133)



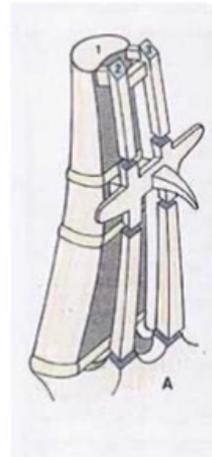
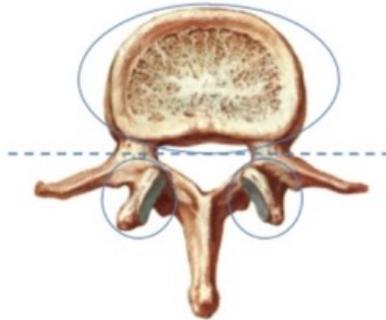
- 1.pédicule
- 2.processus articulaire sup. (zygapophyse sup.)
- 3.lame
- 4.foramen vertébral
- 5.processus épineux
- 6.surface articulaire sup. du corps
- 7.processus transverse
- 8.processus articulaire inf. (zygapophyse inf.)

On constate aisément que l'arc neural délimite un orifice qui, par l'empilement des vertèbres constituera le canal rachidien.

Cet empilement justement nous fait rappeler la théorie des trois colonnes ostéoligamentaires fonctionnelles de Stringa et Louis, qui par articulations entre les structures détermine la colonne des corps vertébraux et les deux colonnes des massifs articulaires (4,5).

Figure 2 : les 3 colonnes de Louis (5)

Les 3 piliers de la colonne vertébrale (au-dessous de C2)



René LOUIS 1977

Il existe une autre unité fonctionnelle primordiale témoignant de la mobilité et de l'élasticité de la colonne vertébrale : le segment mobile intervertébral de Junghanns (6). Cette unité segmentaire comporte d'avant en arrière le ligament longitudinal antérieur, le disque intervertébral, le ligament longitudinal postérieur, le ligament jaune, les surfaces cartilagineuses zygapophysiales postérieures et la capsule articulaire, le ligament inter-épineux et le ligament sus-épineux.

Grâce à la superposition de ces segments mobiles intervertébraux, la colonne vertébrale autorise des mouvements de rotation, de flexion-extension et d'inclinaison latérale.

Ce préambule anatomique nous fait comprendre les fonctions principales de la colonne vertébrale dans son ensemble (7) :

- une fonction statique pure dans le plan sagittal (selon les courbures) et dans le plan frontal
- une fonction de ressort permettant d'encaisser les contraintes mécaniques entre les disques intervertébraux et les articulaires postérieures
- une fonction de flexible autorisant les mouvements
- une fonction de protection des structures neurologiques dans les canaux rachidiens.

B. Ostéologie de la vertèbre cervicale type

Le rachis cervical a pour fonctions principales le support du crâne et l'orientation de la tête afin de permettre à l'être humain d'utiliser ses sens (vue, odorat, ouïe principalement).

Ce segment est donc doué de propriétés de solidité et de mobilité. La mobilité du rachis cervical est la plus importante de la colonne vertébrale, conférée notamment par des spécificités anatomiques sur lesquelles nous reviendrons, mais représente également un facteur de vieillissement et de dégénérescence arthrosique précoce.

La colonne cervicale comporte sept vertèbres.

Il faut séparer deux entités lorsqu'on parle du rachis cervical, le rachis cervical haut qui forme la charnière craniale-cervicale (occiput, atlas et axis) et le rachis cervical inférieur (de C3 à la charnière cervico-thoracique).

Nous n'aborderons pas les spécificités anatomiques (qui sont nombreuses) du rachis cervical supérieur car notre étude concernait le rachis cervical bas.

La vertèbre cervicale a des dimensions plus petites que les vertèbres thoraciques ou lombaires car elle supporte moins de charges que le rachis sous-jacent.

1. Le corps vertébral

Plutôt cubique que cylindrique, et allongé dans le sens transversal, le corps a un diamètre frontal presque deux fois plus grand que le diamètre antéro-postérieur. La face supérieure se relève sur les parties latérales en deux saillies en forme de crêtes, les processus uncinaires ou crochets, de telle sorte qu'elle est fortement excavée dans le sens transversal. Les uncus s'engrènent avec les échancrures creusées symétriquement sur les parties latérales de la face inférieure de la vertèbre sus-jacente et forment « les articulations unco-vertébrales ». La face inférieure est concave dans le sens antéropostérieur, et convexe transversalement. Le bourrelet qui la limite est échancré latéralement par la face interne des uncus de la vertèbre sous-jacente. La partie antérieure de la circonférence est légèrement concave de haut en bas, et criblée d'orifices vasculaires. Ses parties latérales présentent dans leur moitié supérieure l'implantation de l'apophyse transverse et du pédicule, leur moitié inférieure montre les échancrures déjà signalées. Le segment postérieur de la circonférence est à peu près plan, sa fossette vasculaire est souvent subdivisée en deux par une crête verticale. Le bord supérieur est presque tranchant il se relève sur les côtés, pour se continuer avec le bord supérieur des processus uncinaires. Le bord inférieur échancré de chaque côté, se détache en bourrelet saillant grâce à la concavité de la face inférieure en bas il forme un véritable bec appelé aussi le rostre.

2. Les pédicules

Obliquement dirigés en arrière et en dehors, les pédicules se détachent du corps en arrière et en dedans des apophyses transverses. Ils sont très convergents dans le plan axial. Ils se fixent par leur extrémité antérieure au niveau de l'angle de réunion des faces latérales et de la face postérieure du corps, leur extrémité postérieure se confond en dedans avec les lames, en dehors avec les apophyses articulaires. Leur face externe, creusée en avant par une gouttière verticale qui forme la paroi interne du canal transverse, reçoit en arrière l'implantation de l'apophyse transverse. Leur face interne, lisse, constitue la paroi latérale du canal vertébral. L'échancrure du bord supérieur est plus profonde que celle du bord inférieur. Les corticales des pédicules sont épaisses, ainsi, le trou de conjugaison inter-pédiculaire mériterait bien le nom de « canal ». De C3 à C7 leur hauteur (dans le plan crânio-caudal) est d'environ 7mm et leur largeur (dans le plan transversal) de 5 à 6mm. L'angle de l'axe du pédicule avec le plan sagittal décroît de 40 à 29 degrés de C3 à C7 (8), leur convergence est donc plus importante à la partie crâniale du rachis cervical inférieur.

3. Les zygapophysies articulaires postérieures

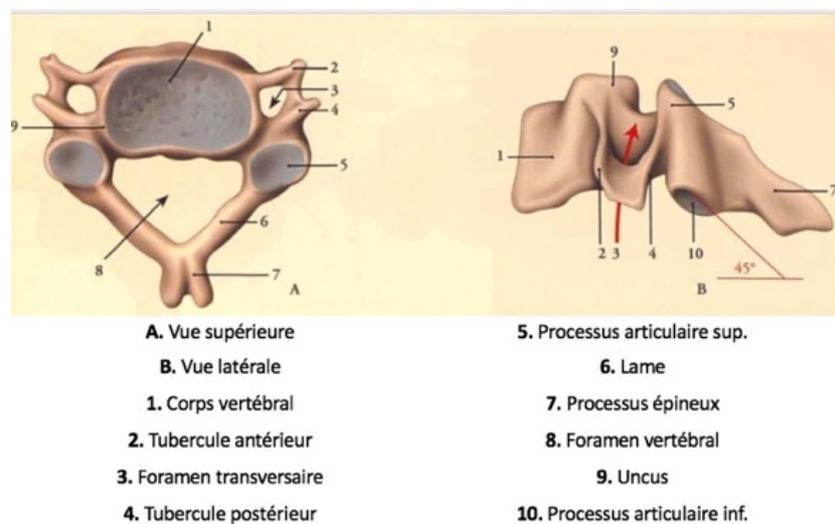
Elles se projettent latéralement à la jonction entre le pédicule et la lame. Les surfaces articulaires sont planes, le plus souvent ovalaires ou circulaires et font avec l'horizontale un angle de 45° environ. La facette articulaire des apophyses supérieures regarde en arrière et

en haut, elle s'articule avec la facette des apophyses articulaires inférieures de la vertèbre sus-jacente. Cette dernière regarde en avant et en bas (9).

4. Les apophyses transverses

Situées sur le prolongement de l'axe transversal du corps, en dehors des pédicules, au-devant des apophyses articulaires, les apophyses transverses ont la forme d'une gouttière transversale à concavité supérieure, inclinée en bas et en dehors. La base de cette gouttière, creusée par les nerfs rachidiens, est perforée d'un large trou, le foramen transversaire par lequel passe l'artère vertébrale. L'extrémité latérale des apophyses transverses se termine par deux tubercules, très distincts, que l'on désigne sous les noms de tubercules antérieur et postérieur.

Figure 3 : Vertèbre cervicale. (P.Kamina. Anatomie Clinique, Tome 2, 3^e édition. Maloine 2009. Fig 10.14 p135)



5. Les lames et apophyses épineuses

Les lames sont minces et de forme quadrilatère. Elles sont fortement inclinées de haut en bas et d'avant en arrière de telle sorte qu'elles s'imbriquent les unes sur les autres en tuiles de toit. A leur extrémité interne, elles se réunissent sur la ligne médiane pour constituer l'apophyse épineuse et à leur extrémité latérale elles s'épaississent et supportent les apophyses articulaires.

Les apophyses épineuses sont prismatiques et triangulaires, inclinées en bas et en arrière. Leurs faces latérales convergent en haut où elles se réunissent en forme de toit. A leur sommet s'individualisent deux tubercules (d'où le caractère bifide des épineuses cervicales) séparés par une échancrure profonde et sur lesquels s'insèrent les muscles cervicaux postérieurs.

6. Particularités des sixième et septième vertèbres cervicales

Le tubercule antérieur de C6 est beaucoup plus saillant et volumineux que les autres. Appelé « tubercule carotidien » ou « tubercule de Chassaignac », il répond au point d'entrecroisement des artères carotide primitive, vertébrale et thyroïdienne inférieure.

La vertèbre C7, véritable vertèbre de jonction à la charnière cervico thoracique est plus volumineuse que les autres vertèbres cervicales, les uncus sont moins développés et son apophyse épineuse est plus longue, volumineuse, non bifide et aisément palpable sous la peau, d'où son qualificatif de « proéminente ». Ses apophyses transverses sont longues, et le foramen transversaire est plus petit et ne livre pas passage à l'artère vertébrale mais souvent uniquement aux veines vertébrales.

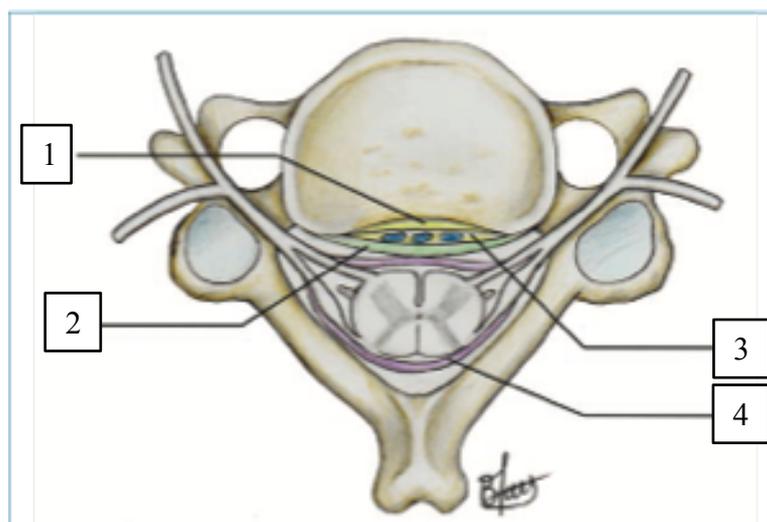
Il est également à noter qu'il est fréquent mais non constant de retrouver des processus uncinaires sur la première vertèbre thoracique.

C. Le canal vertébral cervical

Le canal rachidien central cervical est limité en avant par le mur postérieur du corps vertébral et le disque intervertébral dans les espaces intersomatiques, l'ensemble étant tapissé à la face postérieure par le ligament longitudinal vertébral postérieur.

Ce ligament a une anatomie particulière qui mérite d'être détaillée. Il est en fait composé de deux feuillets : un faisceau profond épais indissociable du disque intervertébral et accolé à la face postérieure des corps vertébraux, et un faisceau superficiel plus fin dans le prolongement de la membrane tectoria (« membrana tectoria »). Entre ces faisceaux circulent des plexus veineux en rapport avec les veines corporeales (10).

Figure 4 : Ligament longitudinal postérieur en région cervicale : 1) couche profonde ; 2) couche superficielle (membrana tectoria) ; 3) plexus veineux ; 4) Dure-mère. (J-M. Vital, Anatomie de la colonne vertébrale : nouveaux concepts, Sauramps Medical, 2016, p 319)



Le canal rachidien est limité en arrière par l'arc postérieur et à ses extrémités antérolatérales par les pédicules, il est ainsi en continuité avec les foramens intervertébraux dans les espaces

inter-pédiculaires. L'arc postérieur est tapissé à sa face endocanalaire par le ligament jaune en continuité avec les capsules articulaires au niveau des massifs zygapophysiaux postérieurs.

Il est grand, de forme triangulaire à base antérieure. Son diamètre transversal est à peu près le double du diamètre antéro-postérieur.

C'est au niveau cervical que le foramen vertébral est le plus large, son diamètre sagittal médian diminue de haut en bas. On admet un diamètre sagittal médian de 23mm en regard de C1, 20mm en C2. De C3 à C6, ce diamètre varie de 17 à 18mm et on retrouve le plus petit diamètre sagittal médian en regard de C7, environs 15mm (11).

En réalité on peut différencier deux diamètres antéro-postérieur. Le diamètre sagittal médian fixe ou constitutionnel qui est osseux puisque tracé entre le milieu du corps vertébral et la partie haute des lames, sa dimension ne variera plus après la fermeture du cartilage neuro-central vers l'âge de 5-6 ans. Le diamètre sagittal médian mobile correspond au diamètre antéro-postérieur en regard du segment mobile de Junghans. Ce dernier augmente en flexion, et diminue en extension et il sera atteint au cours du vieillissement dans la pathologie dégénérative cervicale (12).

Classiquement, selon Wackenheim (13), un canal rachidien cervical de taille normal peut admettre de profil un corps vertébral.

Figure 5 : Canal cervical normal admettant la projection d'un corps vertébral normal selon Wackenheim (13)



Pavlov et Torg (14) ont proposé un indice permettant de déterminer si le foramen vertébral cervical est normal ou rétréci. Soit le rapport A/B, où A représente le diamètre sagittal médian et B le diamètre antéropostérieur du corps vertébral, si ce rapport est inférieur à 0,8 il y a rétrécissement canalaire.

En réalité, plus que le diamètre antéro-postérieur ou transversal, c'est le volume de réserve autour de la dure-mère qui est le paramètre le plus important. Il a été défini par Lee (15) au niveau lombaire mais peut être utilisé à tous les niveaux. Au niveau cervical, le volume de réserve est important.

Nous pouvons également rappeler les travaux de De-Peretti (16) qui montrait que l'ensemble des structures neurologique (moelle et filets radiculaires) occupait environs un tiers de la

surface de foramen vertébral : 34,4% en C6, la même proportion était retrouvée pour le liquide céphalo-rachidien : 25,2% en C6.

Finalement le canal rachidien cervical est un contenant large dans lequel les structures neurologiques sont à l'aise. Ces dimensions anatomiques permettent la mobilité de cette région tout en préservant la protection des structures neurologiques.

D. Le foramen intervertébral cervical

Cette structure anatomique était le sujet de notre travail que nous vous présenterons plus loin.

1. Le contenant

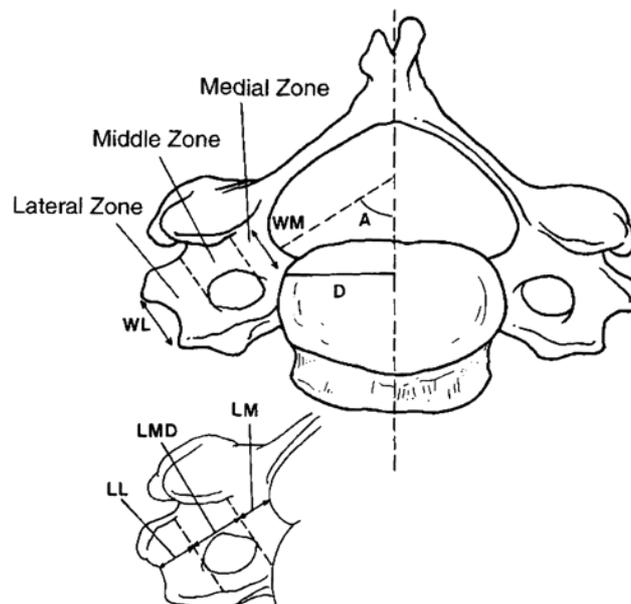
Le foramen intervertébral cervical est un véritable canal de conjugaison qui est en continuité anatomique avec deux zones adjacentes.

En effet, les racines nerveuses doivent traverser successivement trois régions depuis la zone intra-canaulaire jusqu'à la région extra-vertébrale.

Ces trois zones ont été décrites par différents auteurs.

Nous pouvons citer tout d'abord les travaux d'Ebraheim et al (17) où les auteurs décrivaient 3 zones : une portion pédiculaire (« medial zone ») limitée en dedans et en avant par l'uncus et contenant les racines antérieures et postérieures ; une zone articulaire (« middle zone ») limitée par le processus articulaire en arrière et le foramen transversaire en avant et contenant le ganglion spinal ; une zone transversaire (« lateral zone ») correspondant à la gouttière transversaire de l'apophyse transverse où le nerf spinal va se diviser en deux branches (l'une antérieure et l'autre postérieure).

Figure 6 : Les 3 régions du foramen intervertébral cervical selon Ebraheim et al (17). WM représente la largeur de la zone médiale ; WL représente la largeur de la zone latérale ; LM représente la longueur de la zone médiale ; LMD la longueur de la zone moyenne et LL la longueur de la zone latérale.



Tanaka et al (18) ont repris les travaux des auteurs précédemment cités et ont redéfini ces 3 zones de façon un peu différente.

Une zone médiale équivalente du récessus latéral lombaire, juste en dedans de l'orifice médial du foramen intervertébral, le ligament jaune constitue la paroi postérieure.

Une zone moyenne étroite entre l'uncus en avant et l'articulation interapophysaire postérieure en arrière, entre le pédicule sus-jacent en haut et le pédicule sous-jacent en bas. Dans cette zone, qui correspond réellement à la définition de canal de conjugaison d'un foramen intervertébral, l'uncus constitue un mur protecteur pour l'artère vertébrale et le ganglion spinal vis à vis du disque intervertébral.

Une zone latérale à la sortie du « canal » précédemment décrit correspondant à la portion transversaire où le ganglion spinal donne naissance aux rameaux antérieur et postérieur du nerf spinal après son passage en arrière du foramen transversaire. Les 2 rameaux cheminent ensuite dans la gouttière transversaire.

Cette deuxième description des portions du foramen intervertébral nous paraissait plus pertinente pour l'étude des dimensions tomодensitométriques du canal de conjugaison.

Ces trois zones sont alignées selon un axe orienté à 45 degrés en avant par rapport au plan sagittal constituant dans l'ensemble un chenal d'environ 20mm de long (19).

Figure 7 : Coupe anatomique horizontale à l'étage cervical moyen montrant les rapports des racines nerveuses au sein du foramen intervertébral. Ra : racine antérieure ; Rp : racine postérieure ; gg : ganglion spinal ; AV : artère vertébrale ; flèches courtes : uncus ; flèches longues : articulation interapophysaire postérieure. D'après Demondion X. et al (20).



En conclusion la zone pédiculaire qui correspond véritablement au canal de conjugaison du foramen intervertébral cervical est un « tunnel osseux » limité en haut par le pédicule de la vertèbre sus-jacente, en bas par le pédicule de la vertèbre sous-jacente, en arrière par l'articulation zygapophysaire postérieure où le processus articulaire inférieur se projette dans la partie supérieure du foramen et le processus articulaire supérieur dans la partie moyenne et inférieure. Les limites antérieures de ce canal sont le plateau inférieur de la vertèbre sus-

jacente dans la partie supérieure du foramen puis en descendant « l'articulation unco-vertébrale et l'incisure discale », et enfin l'uncus de son sommet à sa base. Les limites de cette zone dans le plan transversal sont le bord médial du pédicule sous-jacent et la tangente parallèle au bord médial du foramen transversaire.

C'est cette portion que nous étudierons dans notre travail ainsi que la zone médiale définie par Tanaka et al (18) correspondant à un équivalent du récessus latéral lombaire et qui représente l'entrée du foramen.

2. Le contenu

Les nerfs cervicaux sont constitués par la réunion d'une racine antérieure et d'une racine postérieure. La racine antérieure est grêle et constituée de quatre à sept racicules issues du sillon collatéral antérieur de la moelle. La racine postérieure sensitive est trois fois plus grosse que la racine antérieure et se divise en quatre à dix racicules qui pénètrent le sillon collatéral postérieur (21).

La racine antérieure a des rapports étroits avec l'uncus en avant et avec le pédicule de la vertèbre sous-jacente en bas. La racine postérieure, plus volumineuse, est habituellement placée en arrière et au-dessus de la racine antérieure, et est située en regard du processus articulaire supérieur de la vertèbre sous-jacente (22).

Le ganglion spinal se trouve positionné entre l'artère vertébrale en avant (foramen transversaire) et l'articulation interapophysaire postérieure en arrière. Sur une coupe para-sagittale passant en avant par la partie postérieure du corps vertébral au niveau de l'uncus, en haut par le pédicule de la vertèbre sus-jacente, en bas par le pédicule de la vertèbre sous-jacente, on retrouvera les racines antérieure et postérieure soit au niveau, soit au-dessous du plan discal.

Les veines épidurales sont très abondantes à l'étage cervical et communiquent avec les plexus veineux situés autour de l'artère vertébrale. Elles jouent ainsi un rôle d'amortisseur en traversant le foramen intervertébral. En effet, à l'étage cervical, la fixation des éléments nerveux se fait davantage par les éléments veineux que par la graisse épidurale comme c'est le cas à l'étage lombaire.

Au sein du foramen intervertébral, l'artère radulaire se divise en deux rameaux, une branche antérieure cheminant sur la face antérieure de la racine antérieure et une branche postérieure cheminant sur la face antérieure de la racine postérieure.

Figure 8 : Schéma du foramen intervertébral cervical moyen, ici C5C6, et son contenu, d'après Pech (22).

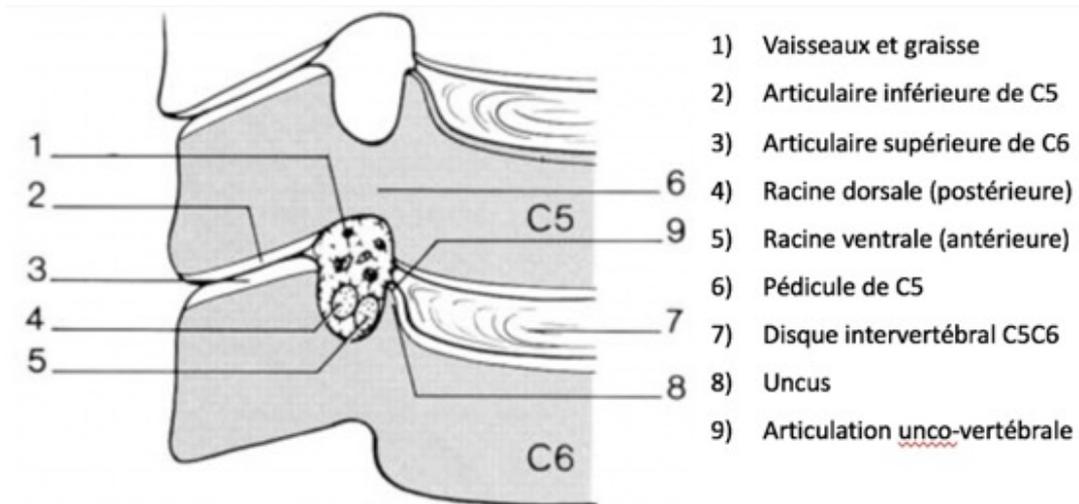
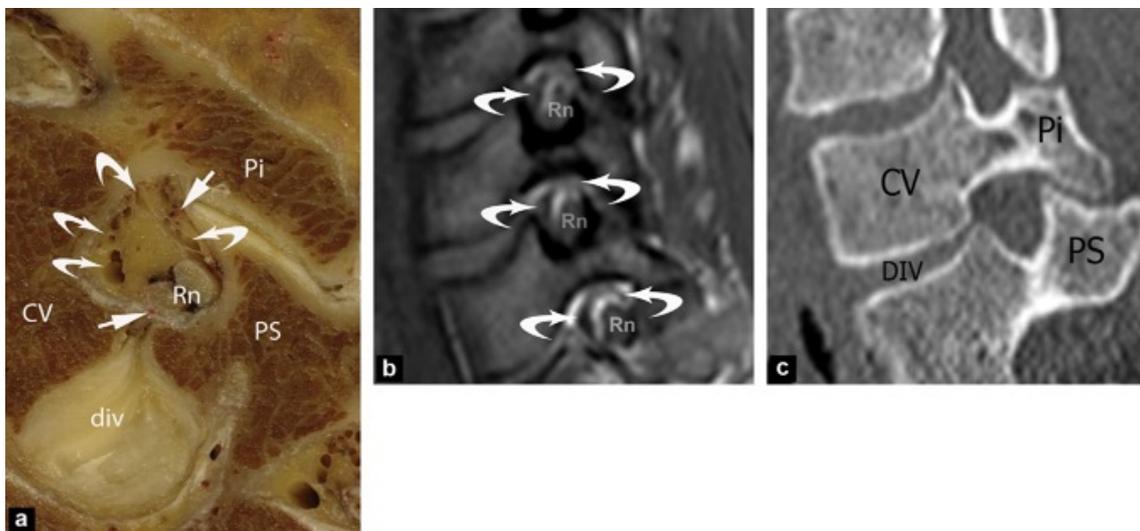


Figure 9 : Partie moyenne d'un foramen intervertébral cervical étudié selon un plan de coupe sagittale oblique perpendiculaire à l'axe des processus transverses : a : coupe anatomique ; b : coupe IRM sagittale en pondération T1 ; c : coupe tomodensitométrie en constante ; CV : corps vertébral ; div : disque intervertébral ; Pi : processus articulaire inférieur ; Ps : processus articulaire supérieur ; Rn : racines nerveuses ; flèches courbes : veines foraminales ; flèches : artères. D'après Demondion X. et al (20).



3. Une entité anatomique aux dimensions modifiables

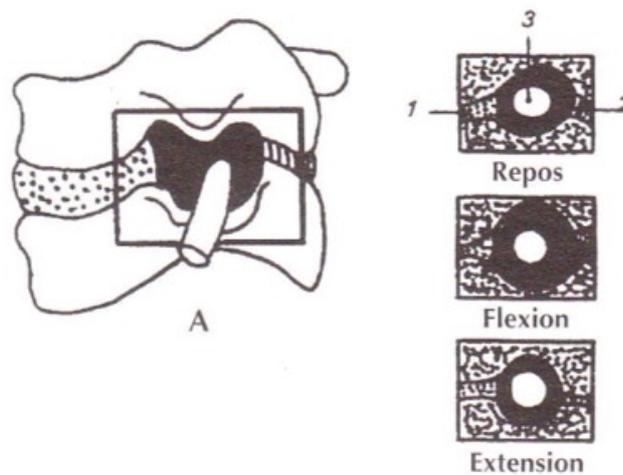
Le foramen intervertébral cervical, par son anatomie précédemment décrite est le siège de l'émergence et du passage en région extra-rachidienne des nerfs spinaux.

Son anatomie lui confère un rôle protecteur d'un point de vue statique vis à vis des structures neurologiques et vasculaires, notamment par le véritable mur de protection formé par l'uncus.

Ce rôle protecteur est également retrouvé d'un point de vue dynamique. En effet, de nombreux travaux scientifiques ont montré la variation des dimensions du foramen selon les mouvements du cou.

Tomoaki Kitagawa et al (23) ont réalisé une étude tomodynamométrique chez sept patients asymptomatiques en réalisant des acquisitions en position neutre et en extension et flexion maximales. Les auteurs retrouvaient une augmentation significative de la hauteur foraminale, de la largeur du foramen et de l'aire du foramen en flexion et une diminution significative de ces mêmes paramètres lors de l'extension.

Figure 10 : Modification du foramen intervertébral cervical en flexion-extension d'après J-M Vital (12) (1 : disque intervertébral ; 2 : interligne articulaire ; 3 : nerf rachidien)

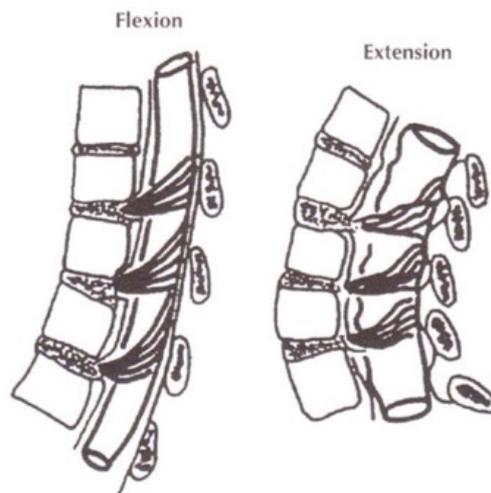


Lors d'une étude anatomique cadavérique, Ebraheim et al (24) ont étudié l'aire des foramens intervertébraux cervicaux de 20 sujets lors des mouvements de translation antéro-postérieurs. Pour cela les auteurs, ont réalisé des acquisitions tomodynamométriques après avoir reproduit anatomiquement un rétrolisthésis de C5. Ainsi ils étudiaient les foramens C4C5 sur un étage reproduisant un antélisthésis et les foramens C5C6 sur un étage reproduisant un rétrolisthésis.

Les auteurs retrouvaient une augmentation significative de l'aire des foramens avec l'antélisthésis et une diminution significative avec le rétrolisthésis.

Ainsi, le foramen intervertébral cervical, par la mobilité de certaines entités anatomiques le constituant, adopte un rôle protecteur lors des mouvements. Ses dimensions augmentent lors des mouvements de flexion ou de translation antérieure et diminuent lors des mouvements d'extension ou translation postérieure. Nous pouvons logiquement associer ces propriétés à la dynamique radiculo-médullaire bien décrite par R. Louis (25) : en flexion la moelle s'allonge et avance vers le corps et les disques et les radicelles se tendent ; en extension la moelle et les radicelles se détendent et la moelle recule vers l'arc postérieur.

Figure 11 : Mouvements des racines et de la moelle d'après J-M. Vital (12)

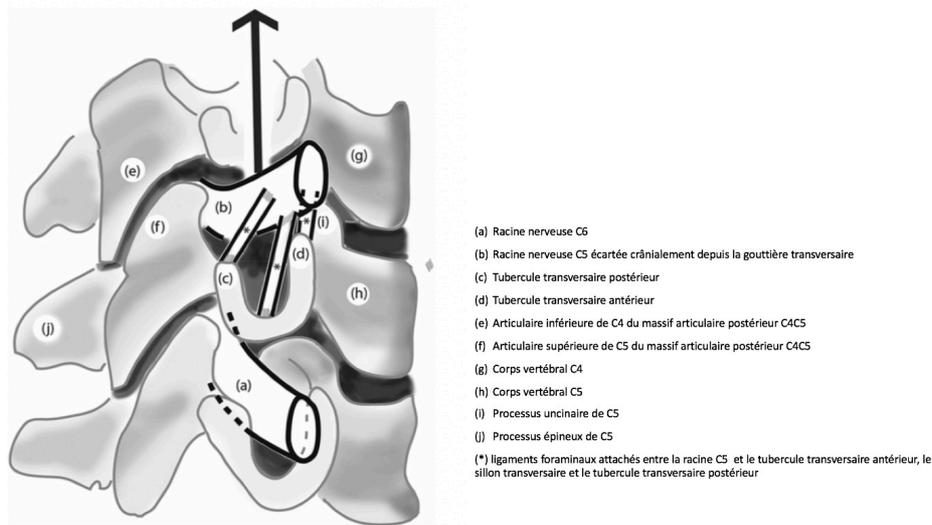


Ces modifications dynamiquement de la taille du foramen intervertébral cervical permettent également de comprendre la séméiologie, en effet le foramen se serre en extension et inclinaison homolatérale et cela constitue la base de la manœuvre de Spurling.

Ces considérations dynamiques nous permettent ainsi de comprendre le rôle protecteur des canaux rachidiens envers les structures neurologiques.

Concernant le foramen intervertébral du rachis cervical une autre particularité anatomique joue un rôle protecteur envers les racines nerveuses lors des mouvements. En effet, la racine dans sa portion transversaire, n'est pas totalement libre puisqu'elle connaît des attaches ligamentaires : les ligaments foraminaux. A l'étage cervical on décrit 3 ligaments amarrant la racine au foramen (26), un chef ligamentaire s'insérant sur le tubercule transversaire antérieur, un dans le sillon transversaire et un dernier sur le tubercule transversaire postérieur. Ces structures fibreuses sont présentes dans tous les foramens intervertébraux du rachis. Au niveau lombaire, plusieurs publications (27,28) ont montré le rôle protecteur des ligaments foraminaux envers les racines nerveuses. Concernant le rachis cervical, Lohman et al (29) ont publié en 2015 une étude anatomique et biomécanique s'intéressant aux mêmes propriétés. Les auteurs étudiaient le déplacement des racines nerveuses au cours d'un test validé (30) (« ULNTT : Upper Limb Neural Tension Test ») qui consistait à positionner le membre supérieur homolatéral en abduction et rotation externe de l'épaule, extension du coude, du poignet et des doigts, avant et après avoir détaché les racines des ligaments foraminaux. Leurs résultats montraient que les ligaments foraminaux diminuaient le déplacement et la tension des racines nerveuses durant la manœuvre ULNTT. Ainsi ils concluaient que ces structures ligamentaires avaient un rôle protecteur envers les racines nerveuses.

Figure 12 : Vue schématisée oblique des racines nerveuses C5 et C6 droites depuis leur sortie de la portion pédiculaire et sillonnant dans la portion transversaire des foramens intervertébraux C4C5 et C5C6 droits d'après Lohman et al (29).



Nous pouvons donc en conclure que la protection des structures neurologiques au sein du foramen intervertébral est assurée à la fois par le contenant (modification de l'aire du foramen selon les mouvements) et par le contenu (ligaments foraminaux).

E. La région unco-vertébrale

L'uncus est une spécificité anatomique propre aux vertèbres cervicales permettant mobilité, stabilité et protection des structures neurologiques postérieures.

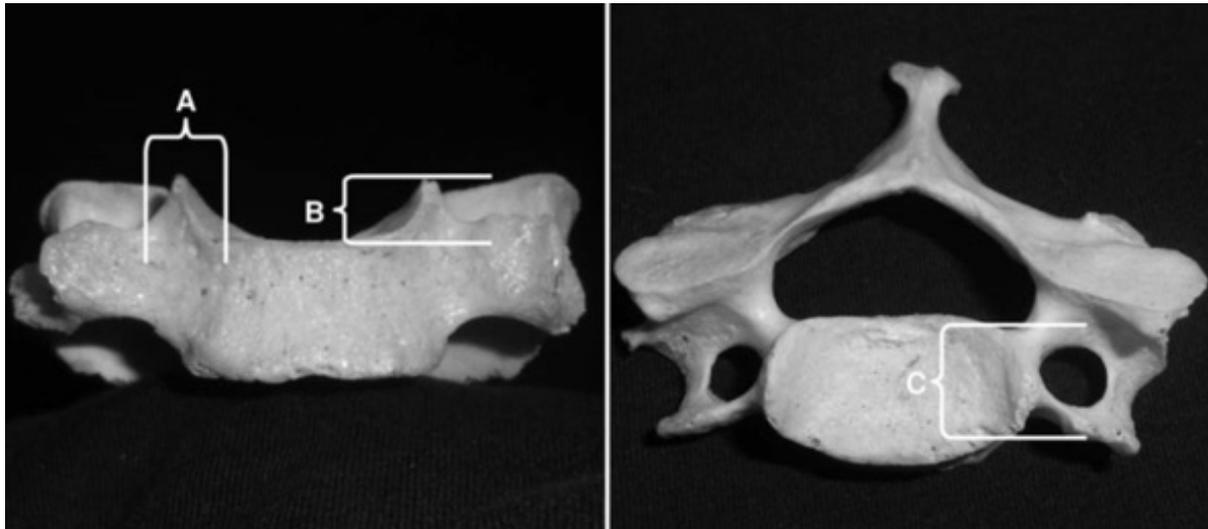
En 1834, Rathke décrit les processus uncinaires comme une proéminence à la partie supérieure et postéro-latérale des corps vertébraux cervicaux (31). En 1858, Luschka décrit l'articulation unco-vertébrale existant entre les processus uncinaires et la vertèbre sus-jacente (32), nous reviendrons plus tard sur cette notion très contestée.

1. Anatomie des processus uncinaires

Les uncus sont généralement retrouvés de C3 à T1, cependant il existe des variations interindividuelles. Ils ressemblent à une pyramide ou un crochet avec un sommet et des pentes postérieures et antérieures délimitant une face interne concave formant, pour certains auteurs, la surface articulaire (33).

Les dimensions des uncus ont bien été décrites dans la littérature. D'une façon globale leurs dimensions (hauteur, largeur et longueur) augmentent suivant un gradient crânio-caudal (34). Panjabi et al (11) retrouvaient un angle formé avec le plan sagittal d'environ 40°.

Figure 13 : Processus uncinaires avec la largeur (A), la hauteur (B) et la longueur (C) selon Hartman J (34)



2. « L'articulation unco-vertébrale »

Cette notion est débattue depuis l'appellation donnée par Luschka. MacNab (35) s'accorde avec ce dernier et décrit l'articulation neurocentrale car les apophyses unciformes se situent à l'aplomb des cartilages neurocentraux.

Hirsch (36) décrit une fissuration de la partie latérale du disque intervertébral naissant de la partie moyenne et se dirigeant vers les uncus. Après fissuration, se produit une métaplasie avec apparition de chondrocytes sans membrane synoviale. Selon ce dernier auteur le terme d'articulation est donc inadapté.

Mercer et Bogduk (37) décrivent que cette « articulation » est cloisonnée dans un tissu, créant une pseudo-capsule. Les auteurs nomment ce tissu le fascia périosté (« periosteofascial tissue »). Cette structure anatomique naît depuis l'extrémité latérale du ligament longitudinal postérieur, contourne l'uncus à sa face latérale en cloisonnant la région unco-vertébrale puis rejoint le ligament longitudinal antérieur ou certaines de ses fibres se confondent avec l'annulus fibrosus.

L'anatomie de la structure unco-vertébrale est toujours débattue à ce jour en faisant une entité unique.

Brismée et al (31) ont démontré que la région unco-vertébrale recevait des fibres nerveuses et qu'elle était donc potentiellement génératrice de cervicalgies.

3. Rapports anatomiques

L'uncus est donc en rapport avec le disque intervertébral à sa face médiale.

La partie postéro-latérale de l'uncus forme la paroi antérieure du foramen intervertébral protégeant ainsi les nerfs spinaux du disque intervertébral.

La partie antérolatérale de l'uncus se trouve à proximité de l'artère vertébrale et des plexus veineux qui l'accompagnent.

Les rapports entre l'artère vertébrale et l'uncus ont largement été étudiés dans la littérature, nous n'avons donc pas inclus ces rapports dans notre travail que nous vous présenterons plus loin.

4. Rôles

L'articulation unco-vertébrale participe à la mobilité du rachis cervical. En effet la relation de l'uncus avec la vertèbre sus-jacente favorise les mouvements de flexion, extension, inclinaisons latérales et rotation. De plus cette structure anatomique sert de rail guidant et contrôlant la translation antéropostérieure durant les mouvements de flexion-extension (38). Les uncus garantissent également la stabilité des segments cervicaux grâce à sa partie postérieure (plus large et plus haute que la partie antérieure) (39,40). Enfin les uncus forment une véritable barrière protégeant les structures neurologiques postéro-latérales et l'artère vertébrale du disque intervertébral.

II. Le vieillissement du rachis cervical inférieur

Le processus dégénératif cervical dû au vieillissement s'exprime moins cliniquement qu'à l'étage lombaire mais plus fréquemment qu'à l'étage thoracique.

Le rachis cervical est la région vertébrale la plus mobile et donc logiquement celle dont l'usure est la plus précoce. Le processus dégénératif cervical débute généralement à partir de la troisième décennie (41). Néanmoins l'expression clinique des sténoses dégénératives varie selon les individus car il s'agit d'un processus lentement évolutif (42).

Le vieillissement correspond à une cascade d'événements aboutissant à l'accumulation de phénomènes de surcharge jusqu'au stade d'ankylose. Ces lésions de surcharge conduisent à la diminution des dimensions du canal rachidien (pouvant entraîner la myélopathie cervicarthrosique) et du foramen intervertébral (pouvant entraîner la névralgie cervicobrachiale commune dégénérative appelée également « hernie dure »). Comme à l'étage lombaire ces phénomènes de surcharge surviennent par altération de la structure du segment vertébral mobile.

Il faut ajouter à ces lésions de surcharge des lésions d'hypermobilité touchant le rachis sus-jacent et qui peuvent entraîner des sténoses dynamiques, notamment en hyperextension. Ces phénomènes d'hypermobilité sont aussi à l'origine de l'autre étiologie des névralgies communes : la « hernie molle », beaucoup moins fréquentes (43).

A. Histoire naturelle dégénérative

Il n'existe toujours pas aujourd'hui de véritable consensus relatant la chronologie physiopathologique exacte du vieillissement cervical. La majorité des publications affirment que la dégénérescence du disque intervertébral est un processus propre au vieillissement, donc normal, bien que certains facteurs (44,45,46) puissent accélérer ce processus dégénératif (traumatismes, mouvements répétés excessivement, certains métiers, ...). Il n'existe donc pas de facteur déclenchant unique, la genèse du vieillissement est plurifactorielle associant facteurs exogènes et l'apanage génétique de chaque individu comme l'avaient montré Battié et al (47).

A partir de la troisième décennie de vie, le réseau vasculaire péri-discal, permettant la nutrition et l'excrétion des déchets cataboliques par diffusion au travers des plateaux vertébraux, devient moins compétent. Ainsi ce phénomène, associé à l'évolution scléreuse des vertèbres et des plateaux vertébraux, entraînera un déséquilibre du métabolisme discal. Les apports nutritifs deviennent insuffisants et les déchets ne sont pas suffisamment excrétés (48). L'environnement devient acide, les cellules deviennent sénescents et produisent moins de protéoglycanes (49), les capacités de rétention d'eau au sein du disque sont donc altérées. Ainsi, l'appauvrissement de la matrice extracellulaire entraîne la déshydratation du nucleus pulposus, les capacités viscoélastiques du disque intervertébral diminuent.

Mécaniquement, le noyau discal absorbe moins les contraintes, progressivement elles sont transférées à l'annulus fibrosus entraînant fissures et perte d'élasticité. Le disque intervertébral se collapse et devient parfois une structure fibrocartilagineuse perdant totalement la distinction structurale qui existait en son sein entre le nucleus pulposus et l'annulus fibrosus (50,51).

La diminution de la hauteur discale aura deux conséquences sur les structures adjacentes : l'hypermobilité et l'augmentation des contraintes mécaniques.

Ainsi l'inflammation et la mobilité excessive entraînera la formation de complexes ostéophytiques dans les régions unco-vertébrales, aux bords des plateaux vertébraux, dans les zones péri-discale antérieures et postérieures. Secondairement l'arc postérieur sera également touché par les mêmes phénomènes entraînant hypertrophie des facettes articulaires postérieures et du ligament jaune et développement d'ostéophytes (52).

L'association de ces processus de surcharge entraînera une sténose concentrique des canaux rachidiens cervicaux qui, plus ou moins aggravée par les phénomènes dynamiques, sera à l'origine des myélopathies et/ou des radiculopathies cervicarthrosiques.

B. Physiopathologie de la radiculopathie et de la myélopathie cervicarthrosique

Notre travail, que nous présenterons plus loin, concernait le foramen intervertébral. Néanmoins les mécanismes de la compression radiculaire dans le foramen intervertébral et de la compression médullaire dans le foramen vertébral sont de la même nature et différenciés par la topographie. Il nous paraissait important dans cette partie, de présenter la physiopathologie de ces deux pathologies.

Le vieillissement du rachis cervical entraîne une réduction des dimensions des canaux rachidiens (canal vertébral et foramens intervertébraux). Les espaces sont réduits, entraînant la sténose des structures neurologiques et vasculaires à l'origine de la symptomatologie neurologique.

White et Panjabi (53) ont développé une théorie biomécanique décrivant les mécanismes responsables de la symptomatologie clinique (myélopathie et/ou radiculopathie) dans le cadre de la cervicarthrose. Les auteurs décrivaient 2 grandes classes : les mécanismes statiques et les mécanismes dynamiques.

Les mécanismes statiques sont les phénomènes dégénératifs réduisant les canaux rachidiens que nous avons décrits plus haut : formations ostéophytiques aux dépens des corps vertébraux, des articulations unco-vertébrales, hernies discales, hypertrophie des facettes articulaires postérieures, du ligament jaune et calcifications du ligament longitudinal

postérieur et du ligament jaune. Il convient également de rajouter la possibilité d'un canal congénitalement étroit chez certains patients.

Les mécanismes dynamiques correspondent aux pressions anormales exercées sur les structures neurologiques (moelle épinière et racines nerveuses) au cours des mouvements et de l'absorption des contraintes mécaniques.

Au total c'est donc l'action conjuguée des mécanismes statiques et dynamiques qui conduit à l'apparition de symptômes neurologiques.

Comme nous l'avons vu plus haut, la cascade dégénérative est initiée par la déshydratation du noyau discal entraînant une perte des capacités viscoélastiques de ce dernier. L'annulus fibrosus supporte alors de façon palliative les contraintes mécaniques, son élasticité est altérée et des fissures surviennent, c'est à ce stade que le contenu du disque peut s'extérioriser en arrière, respectant ou traversant le ligament longitudinal postérieur, et comprimer les structures neurologiques. Ce phénomène est appelé « hernie molle ».

La hauteur discale est plus importante à la partie antérieure qu'à la partie postérieure afin de garantir la lordose cervicale. D'ailleurs, la structure du disque n'est pas homogène le long de l'axe antéropostérieur. Dans la partie ventrale, l'annulus fibrosus est constitué de plusieurs couches entrelacées de fibres de collagène de type 1, alors qu'à sa partie dorsale il n'est formé que d'une fine couche de fibres (37). Initialement, la perte de hauteur discale concerne la partie antérieure du disque et entraîne une diminution de la lordose cervicale. Cette modification biomécanique est autoentretenu car la diminution de la lordose provoque une augmentation des contraintes à la partie ventrale du disque et mènera à une déformation cyphotique (54).

Suite à la perte de hauteur discale, les corps vertébraux adjacents se rapprochent et provoquent une plicature des capsules articulaires et du ligament jaune dans le canal rachidien, puis une hypertrophie réduisant son diamètre. L'augmentation des contraintes mécaniques sur les structures palliant l'incompétence du disque intervertébral dégénératif entraîne la formation d'ostéophytes aux bords des corps vertébraux, dans les zones péri-discales, dans les régions unco-vertébrales puis aux dépens des facettes articulaires postérieures. Ces phénomènes réduisent les dimensions des canaux rachidiens et peuvent comprimer les structures neurologiques. Une compression entre la région unco-vertébrale et les articulaires postérieures (foramen intervertébral) entraînera une symptomatologie radiculaire, alors qu'une compression entre la partie postérieure de la colonne antérieure (ostéophytes des corps vertébraux, protrusion discale postérieure, ossification du ligament longitudinal postérieur) et le ligament jaune provoquera une symptomatologie médullaire. White et Panjabi (53) ont montré que les patients ayant un diamètre sagittal médian canalaire inférieur à 14,8mm étaient plus susceptibles de développer une myélopathie cervicarthrosique.

La mobilité cervicale entretient les phénomènes compressifs. En effet la flexion entraînera ou aggravera la symptomatologie par compression ventrale. L'extension induira une compression dorsale par le ligament jaune.

Le vieillissement cervical provoque l'instabilité des segments cervicaux (due à l'arthrose discogénique). Les structures neurologiques subissent alors des compressions itératives par un phénomène de pincement entre les structures ostéoarticulaires dorsales et ventrales lors des mouvements de flexion et d'extension (53).

Les phénomènes dynamiques ont été étudiés sur le foramen intervertébral cervical. En 2016, Mao et al (55) proposaient une étude sur un modèle in vivo étudiant les dimensions foraminales en flexion et en extension. Les auteurs montraient, par rapport à la position neutre de référence, une augmentation des dimensions foraminales (hauteur, largeur et aire) en flexion et une diminution en extension. En 2017 dans une autre étude in vivo, Chang et al (56) étudiaient chez des patients volontaires sains les modifications des dimensions (hauteur et largeur) foraminales selon les mouvements (flexion-extension et rotation axiale) et selon les étages cervicaux. Les auteurs montraient que ces dimensions diminuaient significativement dans l'ensemble en extension et en rotation homolatérale et augmentaient en rotation controlatérale. L'apport original de cette étude était l'analyse des variations des dimensions selon les étages et selon les mouvements. Ainsi les auteurs montraient que la hauteur foraminale variait de façon plus importante pendant les mouvements de flexion-extension aux étages bas (C5C6 et C6C7) et pendant les mouvements de rotation axiale aux étages proximaux (C3C4 et C4C5). Concernant la variation de la largeur foraminale il n'existait pas de différence significative selon les étages et le type de mouvement. Néanmoins lorsque les auteurs comparaient les variations de largeur selon le niveau sans inclure dans l'analyse le type de mouvement, ils montraient une variation significativement plus importante aux étages proximaux. L'intérêt de ce dernier résultat était de montrer que les foramens proximaux avaient plus de capacités à augmenter leurs dimensions que les foramens des étages inférieurs. Ainsi cela pouvait expliquer la prédominance des sténoses symptomatiques aux étages inférieurs par rapport aux niveaux supérieurs.

Contrairement à la région lombaire, les lésions compressives discocorporéales antérieures sont prédominantes sur les lésions de l'arc postérieur. Cette considération physiopathologique est à l'origine d'un autre phénomène biomécanique aggravant la symptomatologie neurologique : l'effet de corde sagittale (« sagittal bowstring effect »). En effet, lors des déformations dégénératives en cyphose, le cordon médullaire se retrouve attaché, par les réactions inflammatoires locales péri-lésionnelles, aux structures ventrales discocorporéales dégénératives. Le risque de contusion médullaire dynamique est augmenté par ce phénomène. Un autre phénomène similaire, moins fréquent est également décrit dans le plan coronal (« coronal bowstring effect »), où le cordon médullaire se retrouve attaché par ses expansions latérales : les racines nerveuses et le ligament dentelé (54). La compréhension de ces phénomènes est indispensable pour le choix de la technique chirurgicale thérapeutique. En effet, une approche postérieure avec laminectomie peut aggraver la symptomatologie neurologique dans ces deux cas précis, comme l'illustrent les figures ci-dessous.

Figure 14 : « sagittal bowstring effect » : représentation du mécanisme par lequel un patient avec un rachis cervical cyphosé (en haut) peut être aggravé neurologiquement par une décompression postérieure (en bas). D'après Benzel EC (54)

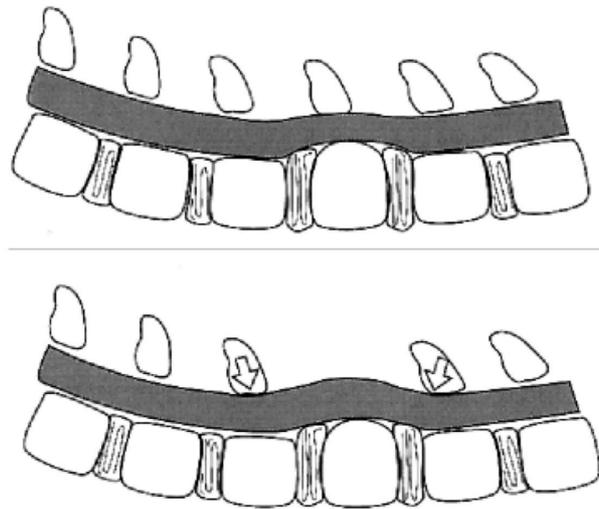
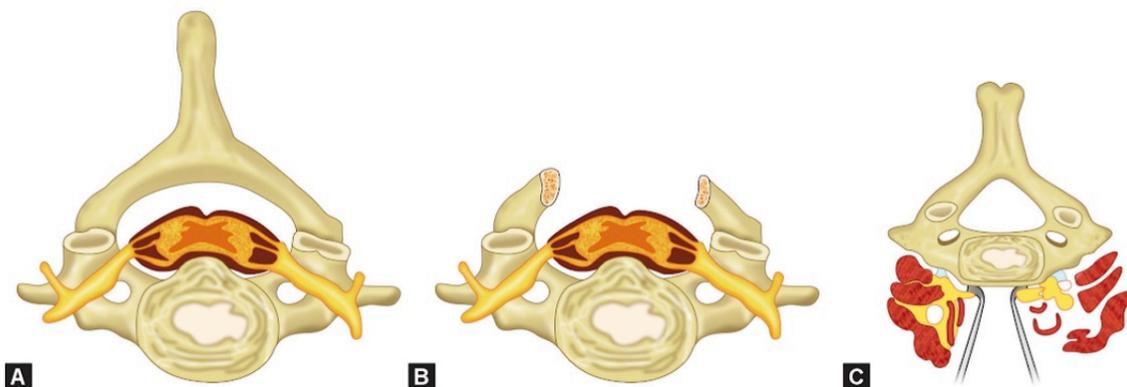


Figure 15 : « coronal bowstring effect » : A) compression médullaire par attachement du cordon par ses expansions latérales (racines et ligament dentelé). B) une laminectomie ne libère pas la compression des structures neurologiques. C) une décompression par voie antérieure est indiquée dans ce cas précis. D'après Benzel EC (54)



La connaissance de ces mécanismes et la prédominance des lésions compressives discocorporéales antérieures justifient souvent que la chirurgie par cervicotomie antérieure est plus apte à régler les problèmes de compression neurologique à l'étage cervical.

Deux autres phénomènes sont à intégrer dans la physiopathologie que nous décrivons.

La cervicarthrose a également un retentissement vasculaire, puisque les excroissances ostéophytiques peuvent comprimer les vaisseaux alimentant les structures neurologiques et provoquer une ischémie. D'après Chakravorty (57), les artères radiculaires de C5 à C7 sont les plus fragiles. Ainsi une sténose ou une thrombose artérielle peut être à l'origine d'une myélopathie.

D'un point de vue biomoléculaire, Yu et al (58) ont montré en 2009 sur des modèles animaux que la cervicarthrose provoquait une perte progressive du tissu neuronal : apoptose des neurones et des oligodendrocytes. Cet élément ouvre la voie à des thérapies moléculaires en complément du traitement chirurgical.

En conclusion nous retenons que le vieillissement du rachis cervical et les phénomènes dégénératifs peuvent être neurotoxiques par des mécanismes multiples (compression mécanique directe, compression dynamique, déformation, ischémie, dégénérescence biomoléculaire neuronale) et souvent conjugués.

MATERIEL ET METHODES

Nous souhaitons rappeler en préambule qu'après avoir déterminé un protocole de mesures tomodensitométriques, les objectifs principaux de notre travail étaient :

- l'étude de la reproductibilité des mesures
- la détermination d'une cartographie osseuse tomodensitométrique et du volume de la portion pédiculaire du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur dans une population jeune asymptomatique
- l'étude des corrélations liées au sexe, aux données morphologiques, et entre les paramètres mesurés dans la population jeune asymptomatique
- la comparaison des mesures foraminales et du volume foraminaux entre la population jeune asymptomatique et les foramens sténosés significativement de la population névralgique.

I. Patients étudiés

Notre travail était une étude descriptive rétrospective basée sur deux populations différentes : une population adulte jeune asymptomatique et une population de patients adultes symptomatiques.

Nous allons décrire ci-dessous les critères de sélection de ces deux populations.

A. Population jeune asymptomatique

Nous avons sélectionné dix patients (cinq hommes et cinq femmes) adultes, d'âge supérieur à dix-huit ans et inférieur à trente ans.

Ces patients avaient tous eu une exploration tomodensitométrique cervicale pour une indication extra-rachidienne (ORL le plus souvent) entre décembre 2016 et mars 2017.

Ces sujets n'avaient aucune symptomatologie clinique évoquant une sténose foraminale cervicale ou une myélopathie d'étiologie rachidienne cervicale. Ainsi tous les foramens étudiés dans cette population étaient considérés comme « sains ».

Nous avons exclu les patients présentant les antécédents suivants :

- antécédent de fracture du rachis cervical
- antécédent de chirurgie du rachis cervical
- syndrome polymalformatif ou maladie génétique
- pathologie à spectre rachidien
- anomalie congénitale du rachis cervical

Les informations médicales concernant ces patients ont pu être retrouvées via le logiciel médical « dxCare » du CHU de Bordeaux.

B. Population névralgique

Nous avons sélectionné 10 patients ayant été opérés dans le service de chirurgie orthopédique de la colonne vertébrale du CHU de Bordeaux (Spine Unit 1) entre décembre 2017 et mars 2018.

Pour chacun de ces sujets le diagnostic de sténose foraminale cervicale d'origine dégénérative était posé par le chirurgien et confirmé par un examen tomodensitométrique préopératoire

du rachis cervical. Dans l'analyse, un foramen était considéré comme « sténosé » lorsqu' il était le siège d'une compression radiculaire clinique : responsable d'une Névralgie cervico-brachiale, et défini comme sténosé par le radiologue ayant interprété le scanner préopératoire. Les autres foramens étaient considérés comme « sains ». Nous avons également exclu les patients aux antécédents de fracture du rachis cervical, de chirurgie de la colonne vertébrale cervicale, de myélopathie cervicarthrosique, de syndrome polymalformatif, de maladie génétique, de pathologies à spectre rachidien et d'anomalie congénitale du rachis cervical.

Chez ces patients il était noté une disparition ou une amélioration des symptômes à la première consultation de suivi post-opératoire.

Les informations médicales concernant ces patients ont pu être retrouvées via le logiciel médical « dxCare » du CHU de Bordeaux.

II. Recueil des données

A. Données morphologiques

Chez chaque patient étudié nous retenions l'âge et le sexe.

Dans la cohorte « patients asymptomatiques » nous avons recueilli des données morphologiques supplémentaires : la taille (en cm), le poids (en kg) et l'indice de masse corporelle (IMC ou BMI, en kg.m⁻²). Ce recueil de données supplémentaires paraissait pertinent dans la population asymptomatique car il s'agissait de décrire des mesures anatomiques dans une « population normale », ainsi des analyses de corrélation selon la morphologie devaient être effectués chez ces sujets.

Les données morphologiques ont pu être recueillies grâce au logiciel médical « dxCare » du CHU de Bordeaux.

B. Analyse tomodensitométrie

Tous les sujets de notre étude ont eu un scanner du rachis cervical. Cet examen était réalisé dans le cadre d'une exploration extra-rachidienne pour les sujets de la « population asymptomatique », et dans le cadre du bilan préopératoire pour les sujets de la « population névralgique ».

Pour tous les patients, cet examen a été réalisé dans le service de radiologie et d'imagerie médicale et interventionnelle du CHU de Bordeaux – Hôpital Pellegrin. Le scanner ayant permis la réalisation de l'examen était l'appareil « GENERAL ELECTRIC OPTIMA 660 ».

Les examens tomodensitométriques du rachis cervical comportaient tous des coupes axiales infra-millimétriques en fenêtrage osseux de tout le rachis cervical haut (vertèbres C0, C1 et C2), du rachis cervical bas (vertèbres C3, C4, C5, C6 et C7) et des premières vertèbres thoraciques (vertèbres T1 et T2). Ce préalable permettait donc l'analyse complète et précise de tous les niveaux étudiés.

Les images au format DICOM (« Digital imaging and communications in medicine ») de tous les examens ont été gravées sur CD-ROOM distincts avec succès et sans perte de données

dans le service de radiologie du CHU. Ces examens tomodensitométriques ont ensuite été anonymisés en nommant de 1 à 10 les patients de la « population asymptomatique » et de 11 à 20 les patients de la « population névralgique ».

Nous avons utilisé la version 3.1.1 du logiciel « HOROS » (© 2018 The Horos Project & OsiriX Team) pour l'analyse des images et la réalisation des mesures.

Pour s'assurer de la reproductibilité de notre travail, deux observateurs ont réalisé chacun deux séries de mesures. Cela permettait d'étudier les reproductibilités intra et inter-observateur.

Le protocole de mesures était expliqué aux observateurs sous la forme d'un document écrit et iconographique.

Enfin, un paramètre supplémentaire était calculé à partir des mesures réalisées pour chaque foramen selon une formule prédéterminée qui sera présentée plus bas, il s'agissait du volume de la portion pédiculaire du foramen intervertébral.

1. Mesures réalisées

Notre étude concernait le rachis cervical bas, ainsi les étages étudiés étaient les suivants : C3C4, C4C5, C5C6, C6C7 et l'étage C7T1.

A chaque niveau les observateurs mesuraient 2 paramètres relatifs aux disques intervertébraux et 8 paramètres (une hauteur, une longueur, 6 largeurs) par foramen intervertébral (2 par niveau).

Nous allons décrire ci-dessous les paramètres mesurés avant de détailler plus loin la méthode de mesure.

a) Paramètres relatifs aux disques intervertébraux

A chaque étage cervical étaient mesurées :

- La hauteur discale (HD)
- L'angulation du disque ou angulation locale (AD)

b) Paramètres relatifs aux foramens intervertébraux

Avant de décrire les mesures, nous souhaitons rappeler que notre étude s'intéressait à la portion « pédiculaire » du foramen intervertébral cervical, c'est à dire le véritable canal de conjugaison. La portion latérale correspondant à la gouttière transversaire n'était pas étudiée dans ce travail.

Pour chaque foramen intervertébral étaient mesurées :

- La longueur du foramen (LF)
- La hauteur du foramen (HF)
- Trois largeurs au centre du foramen :

- Largeur en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente (IfPi)
- Largeur en regard du haut de l'uncus (en regard du disque intervertébral) de la vertèbre sous-jacente (Ifsu)
- Largeur en regard de la base de l'uncus de la vertèbre sous-jacente (Ifbu)
- Trois largeurs au niveau de l'entrée médiale du foramen (récessus) :
 - Largeur en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente (IrPi)
 - Largeur en regard du haut de l'uncus (en regard du disque intervertébral) de la vertèbre sous-jacente (Irsu)
 - Largeur en regard de la base de l'uncus de la vertèbre sous-jacente (Irbu)

c) Enregistrement des mesures

L'angulation locale (AD), en degrés, était négative si le niveau était lordosé, positive s'il était cyphosé.

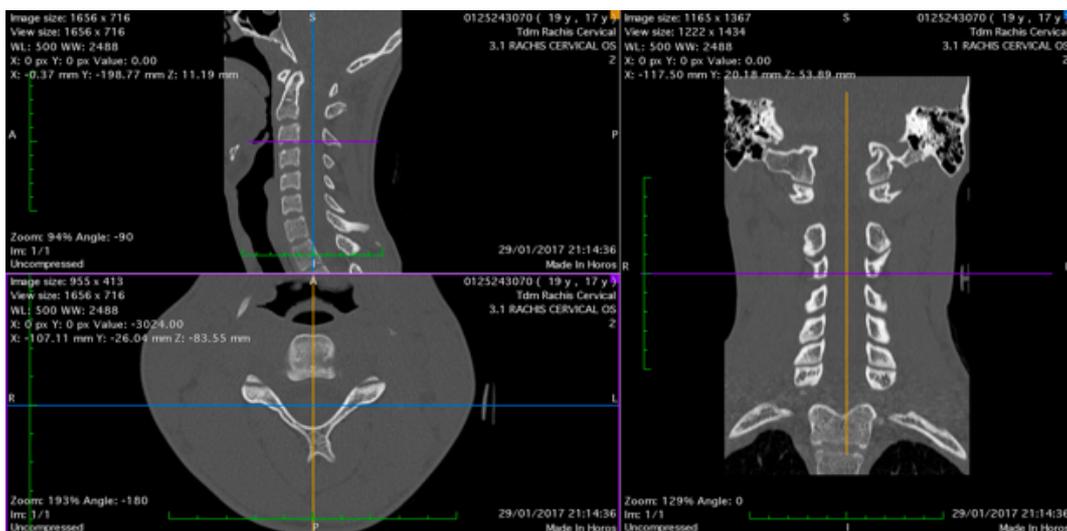
Toutes les autres mesures étaient des distances, enregistrées en millimètres (mm) avec une précision au millième grâce au logiciel « Horos ».

Ces mesures étaient reportées dans un tableur Excel préétabli dans lequel étaient précisés l'identification anonyme du patient, l'appartenance à la population « asymptotique » ou « névralgique », le niveau étudié, les paramètres relatifs aux disque intervertébraux, le statut des foramens (« sain » ou « sténosé ») et les paramètres relatifs aux foramens.

2. Méthodologie des mesures

Une fois les « DICOM » reconnues et lues par le logiciel « Horos », la première étape consistait à sélectionner le « viewer » 3D MPR (« 3 Dimensions Multiplanar Reconstruction ») qui permettait d'obtenir des plans orthogonaux simultanés dans les coupes de reconstruction axiales, sagittales et coronales.

Figure 16 : plans orthogonaux sur le viewer 3D MPR du logiciel Horos



A. Mesure de l'angulation locale/discale (AD)

Pour chaque niveau étudiée, l'angulation locale était mesurée. Pour cela nous sélectionnions le mode de calcul « angle entre deux droites », nous placions la première droite de l'angle parallèle au plateau inférieur de la vertèbre sous-jacente au disque intervertébral et la deuxième droite parallèle au plateau supérieur de la vertèbre sus-jacente au disque. Nous calculions alors un angle en degrés qui était négatif si le niveau était lordosé, positif s'il était cyphosé.

B. Mesure de la hauteur discale (HD)

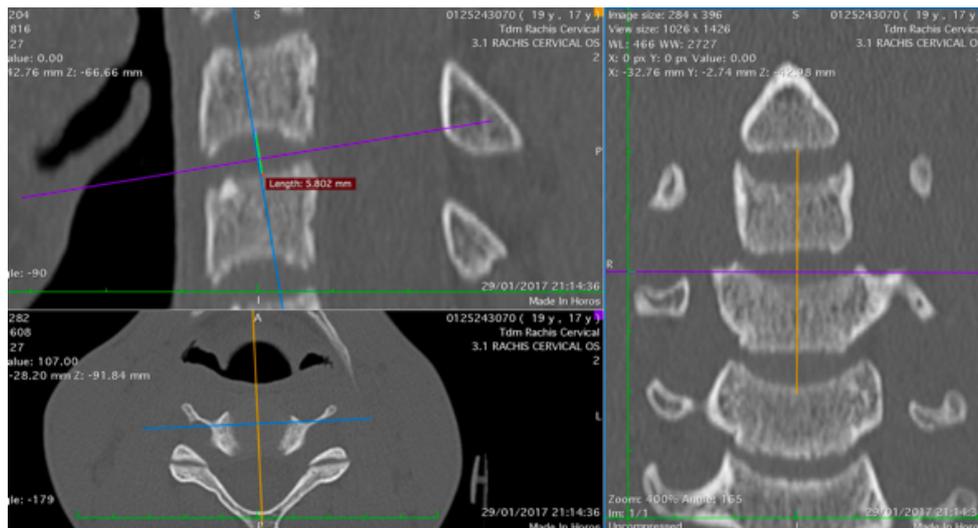
La première étape consistait à placer le curseur du plan orthogonal au centre du disque intervertébral sur la reconstruction sagittale. Le plan orthogonal était ensuite incliné dans l'axe sagittal du disque.

Sur les reconstructions axiales, on vérifiait la bonne position du centre du plan orthogonal au centre du disque puis on contrôlait la rotation. En plaçant d'abord le vecteur antéropostérieur du plan orthogonal dans l'axe donné par le centre du bord antérieur des corps vertébraux sus et sous-jacents et par les apophyses épineuses, puis en plaçant le vecteur transversal tangent et parallèle aux apophyses transverses.

Enfin, sur les reconstructions coronales on contrôlait l'inclinaison latérale en disposant le plan orthogonal parallèle aux plateaux vertébraux (plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente et plateau supérieur de la vertèbre sous-jacente) et perpendiculaire aux corps vertébraux adjacents.

On contrôlait une dernière fois la bonne position du plan orthogonal sur la reconstruction sagittale, et on mesurait la hauteur discale (**HD**) au centre du disque le long du vecteur crânio-caudal.

Figure 17 : mesure de la hauteur discale (HD)



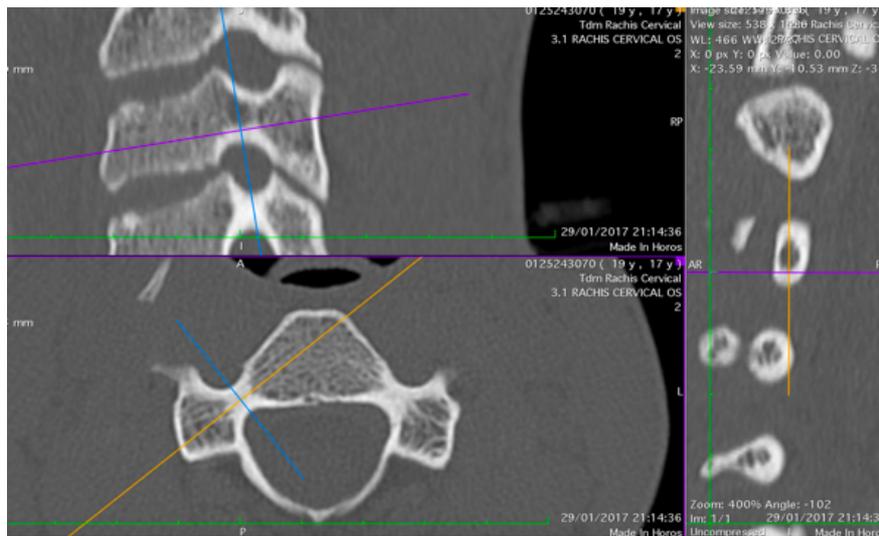
C. Détermination du plan du foramen intervertébral

Pour les mesures des paramètres foraminaux, nous conservions le plan sagittal du disque déterminé précédemment (déterminé à chaque étage évidemment).

Il fallait ensuite déterminer le plan du foramen étudié.

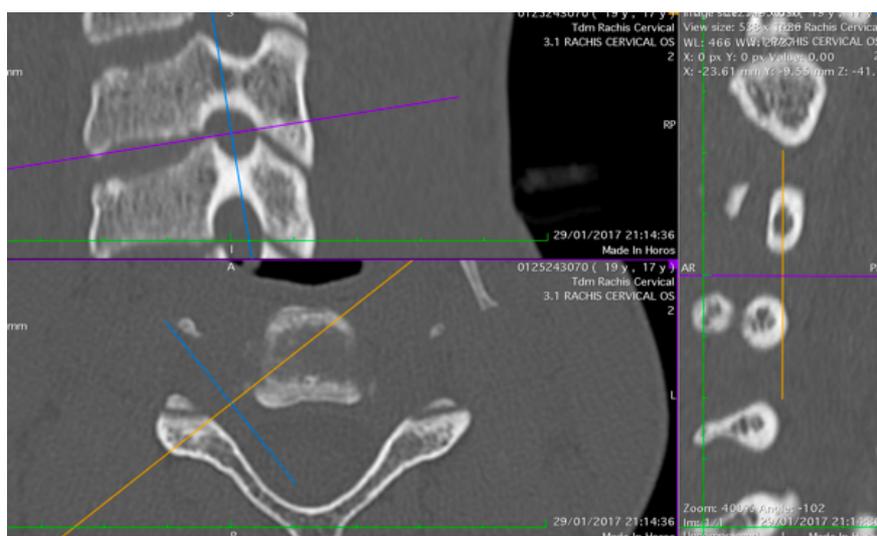
La première étape consistait à placer sur les reconstructions axiales le centre du plan orthogonal au centre du pédicule sus-jacent au foramen intervertébral.

Figure 18 : détermination du plan du foramen intervertébral, repérage du centre du pédicule sus-jacent



Puis, toujours sur les reconstructions axiales, le plan orthogonal était disposé dans l'axe du foramen.

Figure 19 : détermination du plan du foramen intervertébral, axe du canal de conjugaison



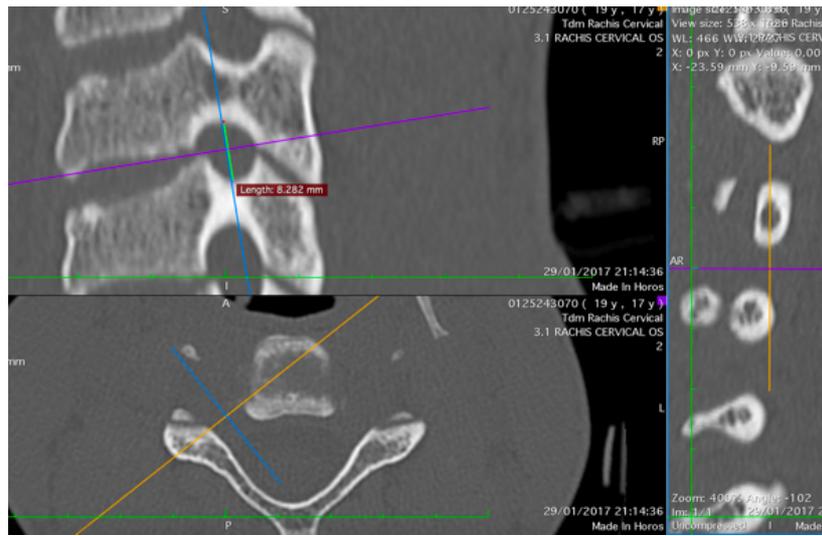
Cette procédure était répétée pour chaque foramen (droit et gauche) à chaque étage pour les mesures des paramètres foraminaux.

D. Mesure de la hauteur foraminale (HF)

La détermination du plan précédemment décrit nous permettait d'obtenir sur les reconstructions sagittales un plan dans l'axe du disque intervertébral et dans l'axe du foramen situé au centre du « canal de conjugaison ».

Nous pouvions alors mesurer la hauteur du foramen (HF) le long de l'axe cranio-caudal du plan orthogonal sur la reconstruction sagittale.

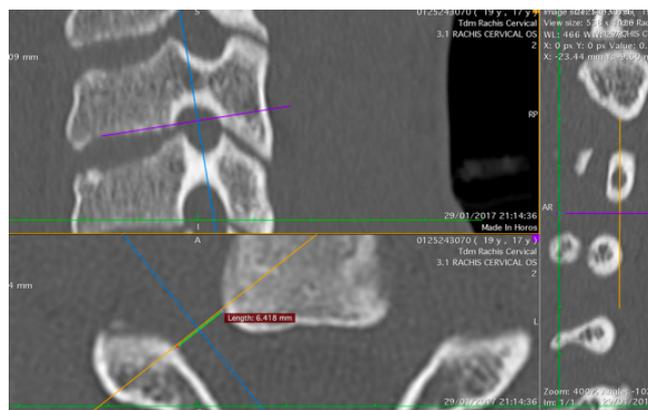
Figure 20 : mesure de la hauteur foraminale (HF)



E. Mesure des largeurs au centre du foramen intervertébral

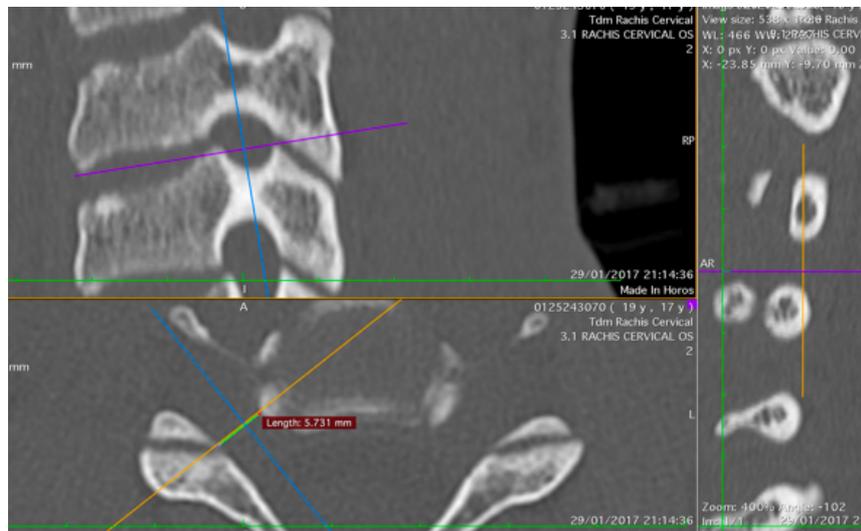
Le même plan du foramen précédemment utilisé était conservé. Sur les reconstructions sagittales on plaçait le vecteur antéropostérieur du plan orthogonal en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente. Sur les reconstructions axiales, on pouvait alors mesurer le long du vecteur perpendiculaire à l'axe du foramen (grâce au plan orthogonal) la largeur au centre du foramen en regard du plateau inférieur (IfPi). Cette largeur s'étendait du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente à l'articulaire inférieure du massif des zygapophysys articulaires postérieures.

Figure 21 : mesure de la IfPi



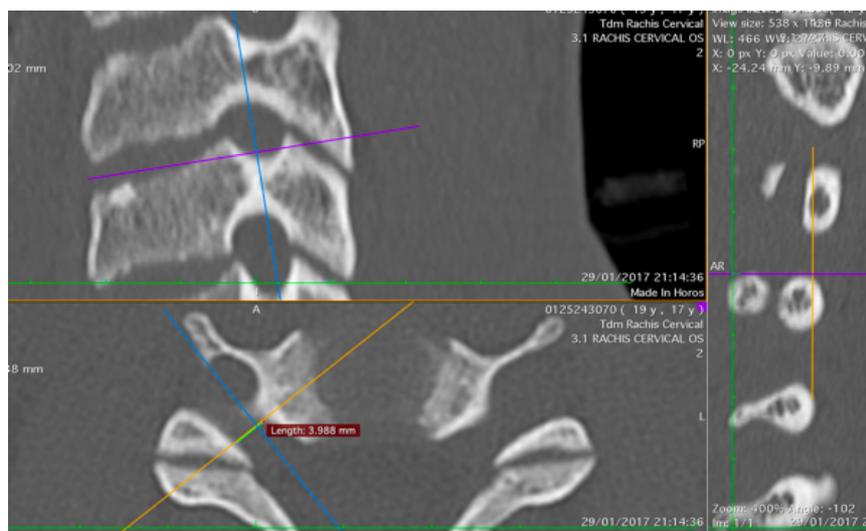
Nous répétons la même procédure en se plaçant en regard du haut de l'uncus de la vertèbre sous-jacente en regard du disque intervertébral sur les reconstructions sagittales. Nous pouvions alors mesurer la **lfsu** qui s'étendait généralement du haut de l'uncus à l'interligne articulaire des zygapophyses postérieures.

Figure 22 : mesure de la lfsu



Enfin, la troisième largeur au centre du foramen était mesurée selon la même méthodologie en plaçant le vecteur antéropostérieur du plan orthogonal en regard de la base de l'uncus sur les reconstructions sagittales. Nous mesurons alors la **lfbu** qui s'étendait de la base de l'uncus à l'articulaire supérieure du massif des zygapophyses articulaires postérieures.

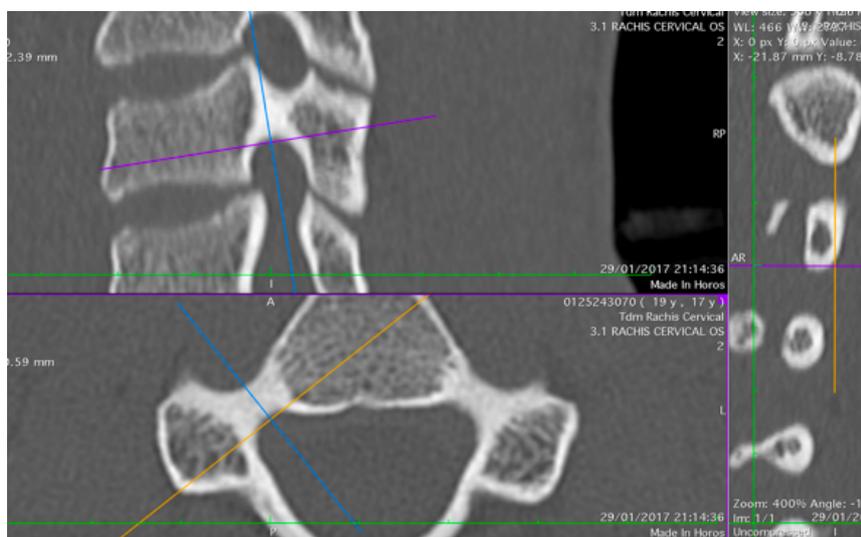
Figure 23 : mesure de la lfbu



F. Mesure des largeurs à l'entrée médiale du foramen intervertébral

Pour réaliser ces mesures dans l'espace qu'on pourrait nommer « le récessus du foramen intervertébral cervical », il était nécessaire de trouver le plan adéquat. Nous conservions le plan du foramen précédemment décrit, mais, sur les reconstructions axiales nous déplaçons le centre du plan orthogonal au bord médial du pédicule sus-jacent au foramen étudié. Cette manipulation nous permettait de se placer dans un plan aisément reproductible à l'entrée du foramen intervertébral.

Figure 24 : repérage du bord médial du pédicule sus-jacent pour se placer dans le récessus du foramen intervertébral cervical



Ce plan ainsi déterminé, nous pouvions alors mesurer les 3 largeurs en regard du « récessus » du foramen étudié en utilisant la même méthodologie que pour les 3 largeurs mesurées au centre du foramen (IfPi, Ifsu, Ifbu).

Nous mesurons alors la **lrPi**,

Figure 25 : mesure de la lrPi



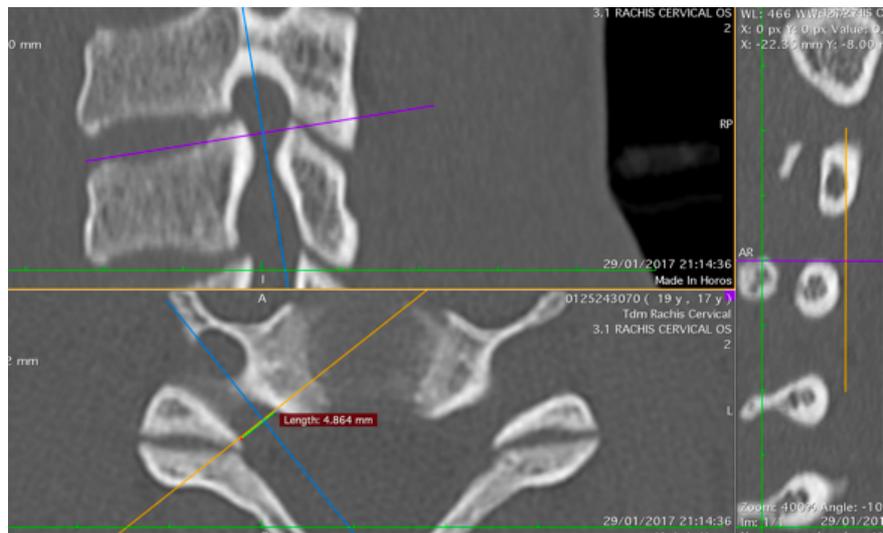
la **Irsu**,

Figure 26 : mesure de la **Irsu**



et la **Irbu**.

Figure 27 : mesure de la **Irbu**

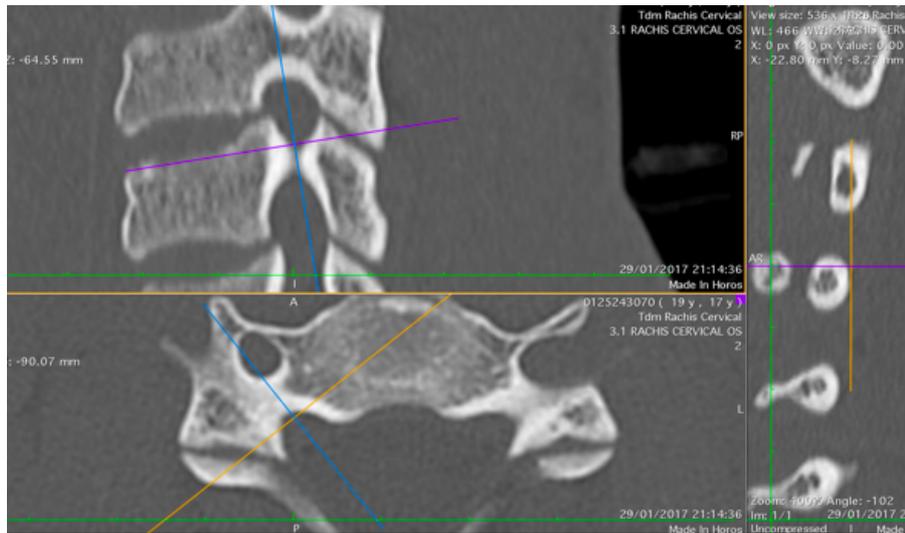


G. Mesure de la longueur du foramen

Le dernier paramètre étudié par foramen était sa longueur dans sa portion strictement pédiculaire (« canal de conjugaison »).

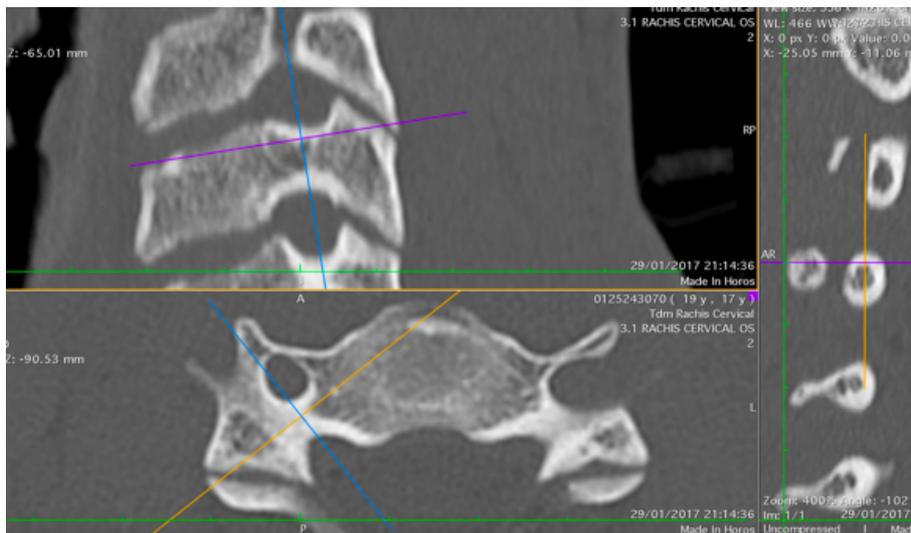
Pour cela, nous conservons le plan du foramen précédemment décrit. Sur les reconstructions sagittales nous identifions l'entrée médiale du « canal »

Figure 28 : mesure de la longueur du foramen (LF), identification de l'entrée médiale du canal de conjugaison



puis la sortie latérale de ce même « canal ».

Figure 29 : mesure de la longueur du foramen (LF), identification de la sortie latérale du canal de conjugaison



Cette technique nous permettait de reporter sur la coupe axiale un point d'entrée et un point de sortie du « canal » et de mesurer la distance entre ces deux points le long de l'axe du foramen.

Ces mesures ont ainsi été réalisées deux fois par chaque observateur chez les sujets de la population « asymptotique » et de la cohorte « névralgique ». Il a également été demandé aux observateurs de préciser la présence ou non d'ostéophytes développés aux dépens du massif des zygapophysys articulaires postérieures dans les foramens « sténosés » étudiés.

3. Calcul du volume de la portion pédiculaire du foramen intervertébral

Une étude volumique du foramen intervertébral nous a paru intéressante. Le logiciel utilisé ne nous permettait pas de réaliser un calcul volumique de cette structure anatomique par contourage sur reconstructions en trois dimensions.

Nous avons donc considéré que la portion pédiculaire du foramen intervertébral cervical était un cylindre à base elliptique renversé, c'est à dire ne reposant pas sur sa base.

Le calcul du volume de cette figure géométrique était réalisable selon la formule suivante : $V_f = \text{aire de l'ellipse} \times \text{hauteur du cylindre}$.

V_f représentait le volume du foramen.

L'aire de l'ellipse était calculée selon la formule suivante : $\pi \times a \times b$, où « $2a$ » était la diamètre crânio-caudal le plus long de l'ellipse donc la hauteur foraminale (HF), et « $2b$ » était la moyenne des diamètres transversaux de l'ellipse soit la moyenne des 3 largeurs foraminales mesurées (lfPi, lfsu et lfbu).

La hauteur du cylindre était la longueur du foramen (LF).

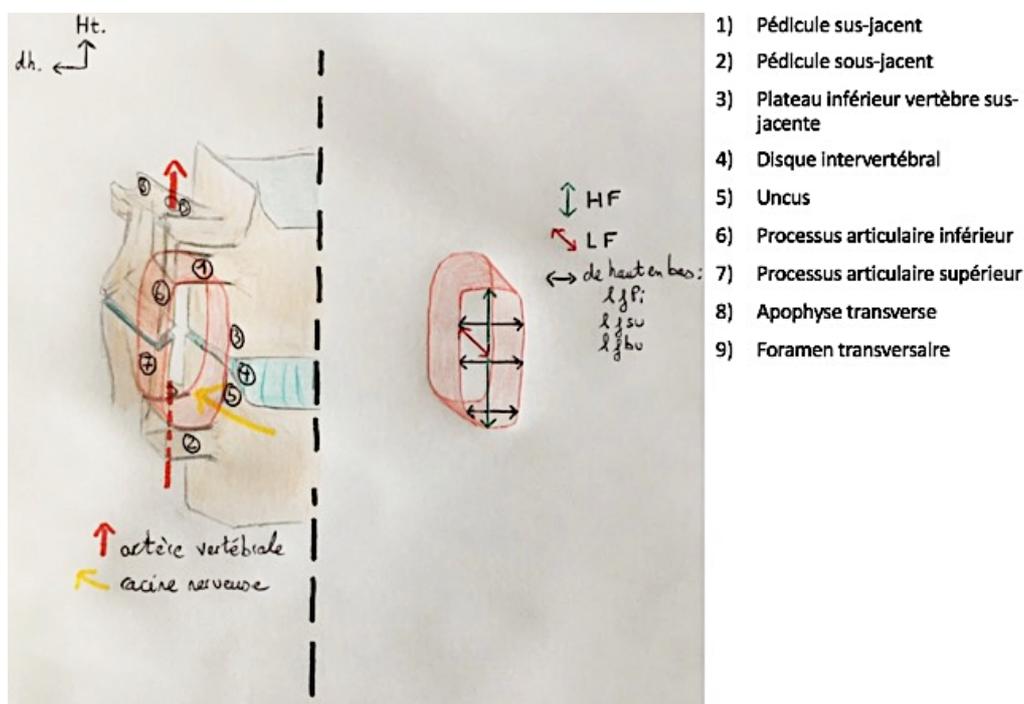
Nous obtenions donc la formule suivante :

$$V_f = (\pi \times (HF/2) \times ((lfPi + lfsu + lfbu) / 3) / 2) \times LF$$

Toutes les mesures étaient en millimètre, ainsi le volume du foramen était calculé en mm³.

Nous représentons ci-dessous dans un schéma le volume de la portion pédiculaire du foramen intervertébral et ses rapports anatomiques.

Figure 30 : représentation du volume de la portion pédiculaire du foramen intervertébral cervical et rapports anatomiques adjacents. Vue endocanalaire d'un foramen intervertébral droit du rachis cervical inférieur.



NB : pour une meilleure visibilité et compréhension, les lames et les apophyses épineuses n'ont pas été dessinées, le trajet de l'artère vertébrale en avant du foramen n'était pas représenté.

III. Analyse statistique

Notre travail avait plusieurs objectifs.

Nous devons d'abord nous assurer de la reproductibilité de nos mesures effectuées selon une procédure précise détaillée précédemment.

Une fois la reproductibilité étudiée, nous avons réalisé une première analyse concernant la cohorte « patients sains ». Le but de cette analyse était de déterminer des dimensions moyennes des différentes mesures par niveau cervical dans la population saine. Nous avons également étudié différentes corrélations au sein de cette population asymptomatique.

Après l'analyse de la cohorte « patients sains », nous l'avons utilisé comme « groupe témoin » pour étudier les différences entre les foramens intervertébraux sains de la « population asymptomatique » et les foramens sténosés de la « population névralgique ».

Enfin une dernière analyse, similaire à la précédente, étudiait les différences des paramètres entre les foramens intervertébraux sains et sténosés de la « population névralgique ».

A. Analyse de la reproductibilité des mesures

Comme expliqué précédemment, pour s'assurer de la reproductibilité des mesures, ces dernières étaient effectuées deux fois et par deux observateurs différents (il s'agissait de deux chirurgiens travaillant dans deux structures différentes, maîtrisant le logiciel « Horos », et ayant reçu les explications orales et écrites de la procédure de mesure des paramètres).

Ainsi, il pouvait être vérifié si la prise de mesures par un observateur était précise (estimation de la variabilité intra-observateur) et si les résultats étaient stables entre deux observateurs prenant les mesures (estimation de la variabilité inter-observateur).

Le coefficient de corrélation intra-classe (ICC) était utilisé pour prouver la reproductibilité. Ce coefficient utilise un calcul basé sur une ANOVA (« analysis of variance » : analyse de la variance) à un facteur pour estimer le degré d'association entre notre mesure et un facteur (59). Nous estimions ce coefficient pour le facteur « expérimentateur » (variabilité inter-observateur) et pour le facteur de répétition de la mesure (variabilité intra-observateur). Ce coefficient varie de 0 à 1 et détermine la valeur de la reproductibilité (60) : faible (0-0,2), passable (0,21-0,4), moyenne (0,41-0,6), importante (0,61-0,8) et presque parfaite (0,81-1).

B. Analyse de la cohorte « population asymptomatique »

Une fois la reproductibilité analysée, nous avons étudié la « population asymptomatique » qui constituait le groupe témoin pour le reste de l'étude.

Nous avons d'abord déterminé des moyennes des différents paramètres mesurés par étage cervical. Ces valeurs étaient déterminées en utilisant des écart-types. Ce travail nous permettait d'obtenir une « cartographie tomodensitométrie osseuse » des foramens intervertébraux cervicaux du rachis cervical inférieur.

Puis nous avons étudié par des tests statistiques (tests de corrélation de Pearson) les éventuelles corrélations qu'il pouvait exister. Nous avons ainsi travaillé sur les corrélations entre les paramètres eux même et par niveau, sur les corrélations liées aux facteurs morphologiques (taille, poids, IMC) et sur les corrélations liées au genre (homme, femme).

C. Analyse comparative

Après avoir analysé la cohorte « population asymptomatique » nous avons, en suivant la même méthodologie, déterminé des moyennes des paramètres étudiés dans la cohorte « population névralgique » en les distinguant, comme dans la cohorte précédente, par niveau cervical, et également selon le statut du foramen (« sain » ou « sténosé »).

Nous avons ainsi comparé les « foramens sténosés de la population névralgique » avec les « foramens de la population asymptomatique » et les « foramens sténosés de la population névralgique » avec les « foramens sains de la population névralgique ».

Des tests statistiques étaient effectués afin de déterminer s'il existait des différences significatives entre les valeurs des paramètres de nos groupes. La première condition était qu'il fallait au minimum deux patients dans chaque groupe afin d'obtenir une moyenne qu'on pouvait ensuite comparer. Cela n'a pas été le cas pour tous les niveaux cervicaux étudiés, nous avons ainsi pu comparer les foramens aux étages C4C5, C5C6 et C6C7.

Le test de comparaison de moyennes le plus courant est un test de Student pour des échantillons indépendants. Or, il y a deux conditions à respecter afin d'utiliser ce test.

Il fallait d'abord s'assurer de la normalité des résultats, c'est à dire qu'ils suivent la répartition d'une loi normale. Pour cela, un test de Shapiro a été utilisé.

Il fallait également vérifier que les variances de nos groupes n'étaient pas significativement différentes à l'aide d'un F-test.

Si le test de Shapiro ne nous permettait pas d'affirmer que les valeurs étaient normales, un test de Wilcoxon était effectué pour comparer les moyennes.

Si les valeurs étaient normales, c'est à dire si la p-value du test de Shapiro était inférieure à 0,05, nous testions l'égalité des variances.

Si les variances étaient significativement différentes, c'est à dire si la p-value du F-test était supérieure à 0,05, un test de Welch était effectué.

Ainsi, si les mesures suivaient une répartition normale selon le test de Shapiro et que leurs variances étaient égales selon le F-test, un test de Student était utilisé.

Pour les trois tests (Student, Wilcoxon et Welch), l'hypothèse nulle était que la moyenne du groupe 1 était égale à la moyenne du groupe 2. Ces tests calculent une probabilité de se tromper si on rejette l'hypothèse nulle nommée p-value.

Ainsi, lorsque la p-value du test était inférieure à 0,05, l'hypothèse était rejetée et il était possible d'affirmer avec 95% de chances de ne pas se tromper que les moyennes des deux groupes étaient différentes.

RESULTATS

I. Populations étudiées

A. Description de la cohorte « patients asymptomatiques »

La cohorte était composée de 10 patients asymptomatiques (cf. critères d'inclusion et d'exclusion dans la partie « MATERIEL ET METHODES »).

Les sujets étaient âgés de 18 à 30 ans.

La cohorte était composée de 5 hommes et 5 femmes.

Nous présentons ces éléments ainsi que les paramètres morphologiques et ethniques recensés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : description de la population asymptomatique (sexe, âge, IMC, poids, taille, origine ethnique)

Sexe	F (n=5)	M (n=5)	Total (n=10)
Age (année)	24,2±3,9 (20 ;30)	24,2±4,5 (18 ;30)	24±4 (18 ;30)
IMC (kg.m-2)	20,76±1,6 (18,7 ;23,1)	23.30±3,4 (19,8 ;28,7)	22,03±2,8 (18,7 ;28,7)
Poids (kg)	55±6,2 (48 ;63)	71±9,1 (56 ;80)	63±11,2 (48 ;80)
Taille (cm)	162.7±6,4 (153 ;170)	174.9±8,9 (167 ;185)	168,7±9,8 (153 ;185)
Origine ethnique	Caucasienne (n=5)	Caucasienne (n=5)	Caucasienne (n=10)

Au total nous avons analysé 5 étages cervicaux par patient, soit un total de 50 disques intervertébraux (hauteur discale et angulation mesurées pour chaque disque) et 100 foramens intervertébraux cervicaux considérés comme « sains » (20 par niveau cervical sur lesquels étaient mesurés les paramètres foraminaux décrits dans « MATERIEL ET METHODES »).

B. Cohorte « patients névralgiques »

Pour cette population, les paramètres morphologiques et ethniques n'ont pas été recensés, l'objectif était de comparer les mesures tomodensitométriques avec celles de la « population asymptomatique » qui était considérée comme un échantillon d'une population jeune et asymptomatique.

Cette cohorte était composée de 5 femmes d'un âge moyen de 53,8 ans, et de 5 hommes d'un âge moyen de 49,4 ans. Ces résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : description selon l'âge et le sexe de la population névralgique

Sexe	F (n=5)	M (n=5)	Total (n=10)
Age (année)	53,8 (49 ; 61)	49,4 (43 ; 57)	51,6 (43 ; 61)

Nous avons, comme pour la « population asymptomatique », analysé 5 étages cervicaux par patient, soit un total de 50 disques intervertébraux et de 100 foramens intervertébraux. Parmi ces foramens, 23 étaient « sténosés » et 77 « sains ». Le tableau ci-dessous résume le nombre de foramens intervertébraux étudiés selon leur statut (« sains » ou « sténosé ») et selon le niveau cervical concerné.

Tableau 3 : nombre de foramens intervertébraux étudiés dans la population névralgique selon leur statut et selon l'étage cervical concerné

Étage cervical	Foramens "sténosés" (n)	Foramens "sains" (n)	Total (n)
C3C4	2	18	20
C4C5	4	16	20
C5C6	10	10	20
C6C7	7	13	20
C7T1	0	20	20
Ensemble	23	77	100

Il est à noter que lors de l'analyse tomodensitométrique nous n'avons recueilli aucun ostéophyte en regard du foramen intervertébral ou du récessus développé aux dépens des zygapophysies articulaires postérieures.

II. Reproductibilité des mesures

Le premier objectif de notre travail était de s'assurer de la reproductibilité de nos mesures afin de donner du sens à nos analyses ultérieures.

Nous avons donc étudié la répétabilité qui correspond à la reproductibilité intra-observateur, et la reproductibilité qui au sens premier correspond à la reproductibilité inter-observateur.

Nous présentons ci-dessous les coefficients intra-classe calculés pour cette analyse.

Tableau 4 : Reproductibilité intra et inter-observateur (au dixième de millimètre pour les distances mesurées et au degré pour l'angulation locale) des mesures tomodensitométriques représentée par les coefficients intra-classe (ICC)

	HF	LF	lfPi	lfsu	lfbu
ICC obs. A	0,98960	0,97498	0,99625	0,99614	0,96722
ICC obs. B	0,98988	0,98153	0,99651	0,99524	0,96126
ICC inter obs.	0,99040	0,97856	0,99650	0,99579	0,96711

	lrPi	lrsu	lrbu	HD	AD
ICC obs. A	0,99708	0,99360	0,99154	0,99593	0,96846
ICC obs. B	0,99714	0,99265	0,99036	0,99534	0,99767
ICC inter obs.	0,99746	0,99325	0,99189	0,99557	0,97633

Cette analyse nous permettait d'affirmer que nos mesures sont répétables et reproductibles à 0,1 près (au dixième de millimètre) et ainsi de valider la fiabilité de notre protocole de mesures.

III. Résultats de l'étude de la cohorte « patients asymptomatiques »

Nous allons présenter ci-dessous les résultats de l'étude concernant la « population asymptomatique ».

Nous rappelons que l'objectif de ce travail était de définir, d'après nos mesures tomodensitométriques, les dimensions anatomiques osseuses et le volume des foramens intervertébraux du rachis cervical inférieur (de l'étage C3C4 à l'étage C7T1) ainsi que deux paramètres liés au disque intervertébral à chaque étage (la hauteur discale et l'angulation locale) au sein d'un échantillon représentatif de la population adulte jeune et asymptomatique.

A. Résultats concernant les mesures des foramens intervertébraux

1. Hauteur du foramen intervertébral (HF)

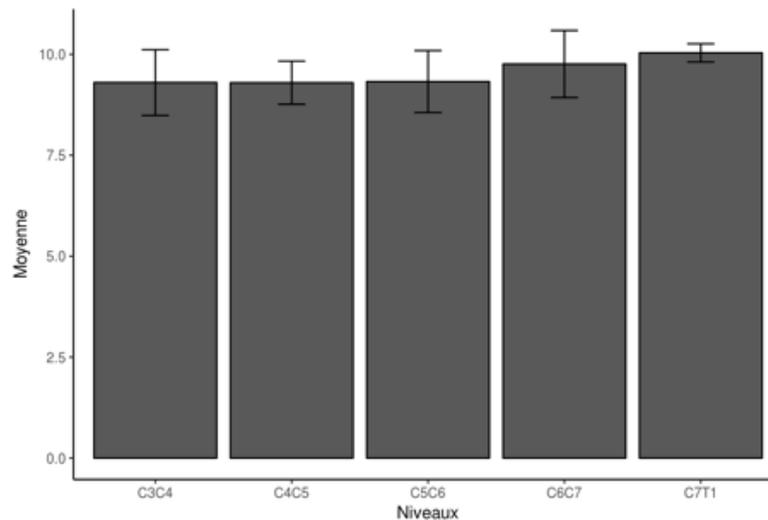
Les résultats concernant la hauteur du foramen mesurée en son centre, sont résumés dans le tableau et le graphique ci-dessous.

Tableau 5 : dimensions moyennes des hauteurs du foramen intervertébral (HF) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne HF (mm)	Écart-type HF (mm)
C3C4	9,301	0,814
C4C5	9,297	0,534
C5C6	9,325	0,767
C6C7	9,760	0,831
C7T1	10,036	0,225

On retrouvait une hauteur foraminale sensiblement similaire (9,3mm) pour les trois premiers étages cervicaux (C3C4, C4C5 et C5C6) et une hauteur plus grande pour les deux derniers niveaux (9,8mm pour C6C7 et 10 mm pour C7T1).

Graphique 1 : illustration de la hauteur (en mm) du foramen intervertébral (HF) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)



2. Longueur du foramen intervertébral (LF)

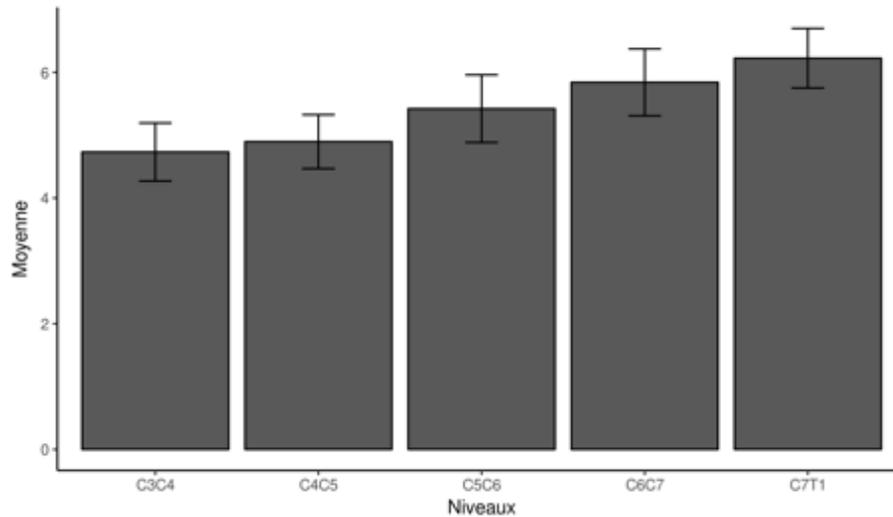
Les résultats concernant la longueur de la portion pédiculaire du foramen intervertébral cervical sont résumés dans le tableau et le graphique ci-dessous.

Tableau 6 : dimensions moyennes des longueurs du foramen intervertébral (LF) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne LF (mm)	Écart-type LF (mm)
C3C4	4,732	0,462
C4C5	4,897	0,429
C5C6	5,421	0,538
C6C7	5,841	0,532
C7T1	6,224	0,474

On constatait une augmentation progressive de ce paramètre plus on se rapprochait de la charnière cervico-thoracique (4,7mm pour C3C4 versus 6,2mm pour C7T1).

Graphique 2 : illustration de la longueur (en mm) du foramen intervertébral (LF) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)



3. Largeurs mesurées au centre du foramen intervertébral

Les résultats concernant ces trois paramètres (lfPi, lfsu, lfbu) sont résumés dans chaque sous partie correspondante sous la forme d'un tableau et d'un graphique.

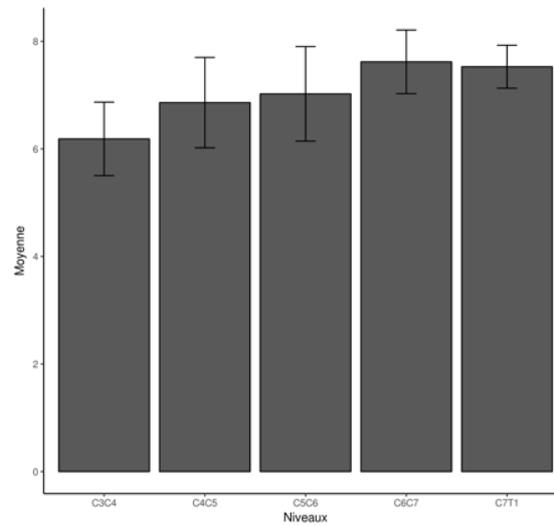
a) Largeur en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente (lfPi)

Tableau 7 : dimensions moyennes des largeurs en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente des foramens intervertébraux (lfPi) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne lfPi (mm)	Écart-type lfPi (mm)
C3C4	6,186	0,684
C4C5	6,861	0,840
C5C6	7,024	0,879
C6C7	7,619	0,592
C7T1	7,528	0,399

On constatait une lfPi plus faible pour le niveau C3C4 (6,2mm) par rapport aux autres niveaux. On retrouvait des valeurs proches pour la lfPi de C4C5 et C5C6 (6,9 et 7mm respectivement) ainsi que pour les niveaux C6C7 et C7T1 (7,6 et 7,5mm respectivement).

Graphique 3 : illustration de la largeur (en mm) en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente du foramen intervertébral (IfPi) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)



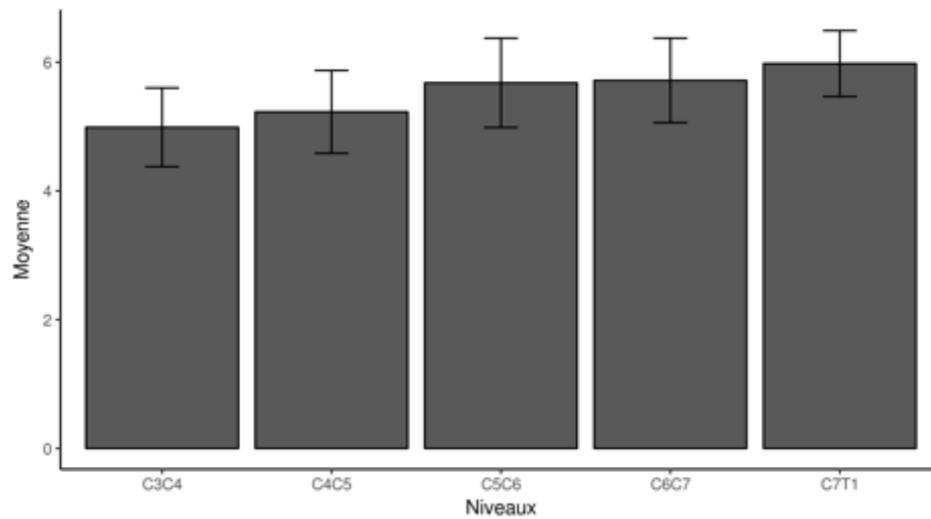
b) Largeur en regard du haut de l'uncus au niveau du disque intervertébral (Ifsu)

Tableau 8 : dimensions moyennes des largeurs en regard du haut de l'uncus des foramens intervertébraux (Ifsu) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne Ifsu (mm)	Écart-type Ifsu (mm)
C3C4	4,989	0,612
C4C5	5,229	0,643
C5C6	5,679	0,694
C6C7	5,717	0,656
C7T1	5,979	0,512

On constatait des valeurs plus basses pour les niveaux C3C4 et C4C5 (respectivement 5 et 5,2mm) que pour les autres niveaux (5,7mm pour C5C6 et C6C7 et 6mm pour C7T1).

Graphique 4 : illustration de la largeur (en mm) en regard du haut de l'uncus du foramen intervertébral (lfsu) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)



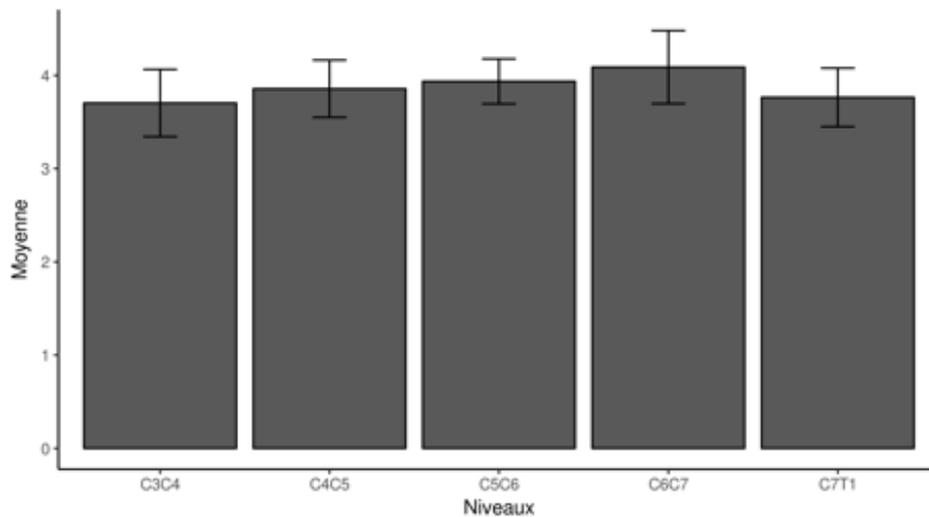
c) Largeur en regard de la base de l'uncus (lfbu)

Tableau 9 : dimensions moyennes des largeurs en regard de la base de l'uncus des foramens intervertébraux (lfbu) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne lfbu (mm)	Écart-type lfbu (mm)
C3C4	3,704	0,361
C4C5	3,857	0,306
C5C6	3,936	0,241
C6C7	4,088	0,392
C7T1	3,764	0,314

On constatait des valeurs à peu près similaires pour tous les niveaux (entre 3,7 et 4,1mm).

Graphique 5 : illustration de la largeur (en mm) en regard de la base de l'uncus du foramen intervertébral (Ifbu) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)



4. Largeurs mesurées à l'entrée médiale (récessus) du foramen intervertébral

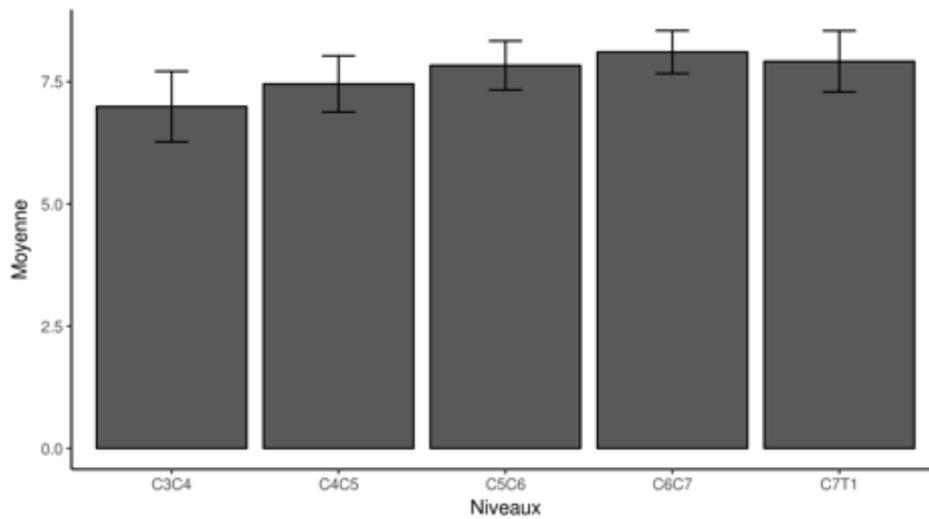
Les résultats concernant ces trois paramètres (I_rPi, I_rsu, I_rbu) sont résumés dans chaque sous partie correspondante sous la forme d'un tableau et d'un graphique. Les valeurs de ces dimensions étaient globalement plus grandes lorsqu'on se rapprochait de la charnière cervico-thoracique.

a) Largeur en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente (I_rPi)

Tableau 10 : dimensions moyennes des largeurs en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente des récessus des foramens intervertébraux (I_rPi) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne I _r Pi (mm)	Écart-type I _r Pi (mm)
C3C4	6,992	0,721
C4C5	7,454	0,575
C5C6	7,834	0,501
C6C7	8,107	0,438
C7T1	7,917	0,626

Graphique 6 : illustration de la largeur (en mm) en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente du récessus du foramen intervertébral (IrPi) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)

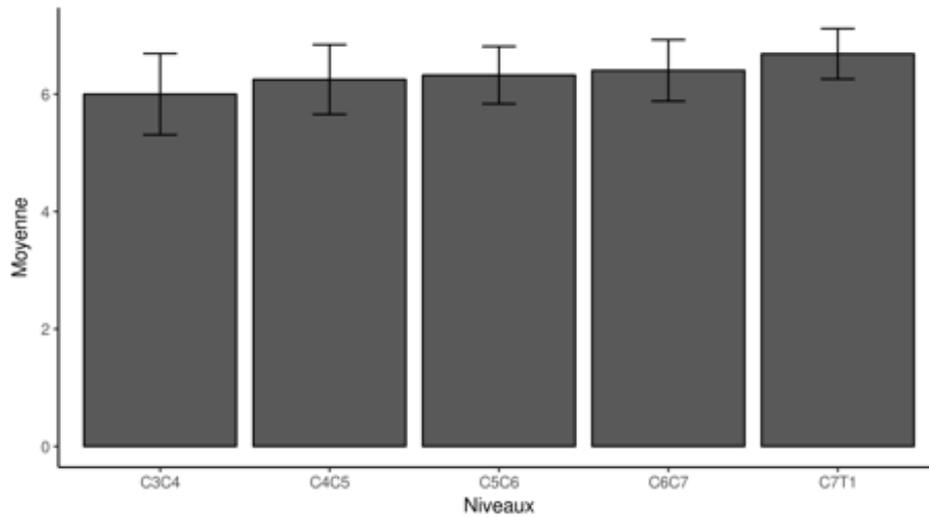


b) Largeur en regard du haut de l'uncus au niveau du disque intervertébral (Irsu)

Tableau 11 : dimensions moyennes des largeurs en regard du haut de l'uncus des récessus des foramens intervertébraux (Irsu) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne Irsu (mm)	Écart-type Irsu (mm)
C3C4	5,999	0,692
C4C5	6,250	0,593
C5C6	6,324	0,489
C6C7	6,403	0,523
C7T1	6,686	0,429

Graphique 7 : illustration de la largeur (en mm) en regard du haut de l'uncus du récessus du foramen intervertébral (Irsu) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)

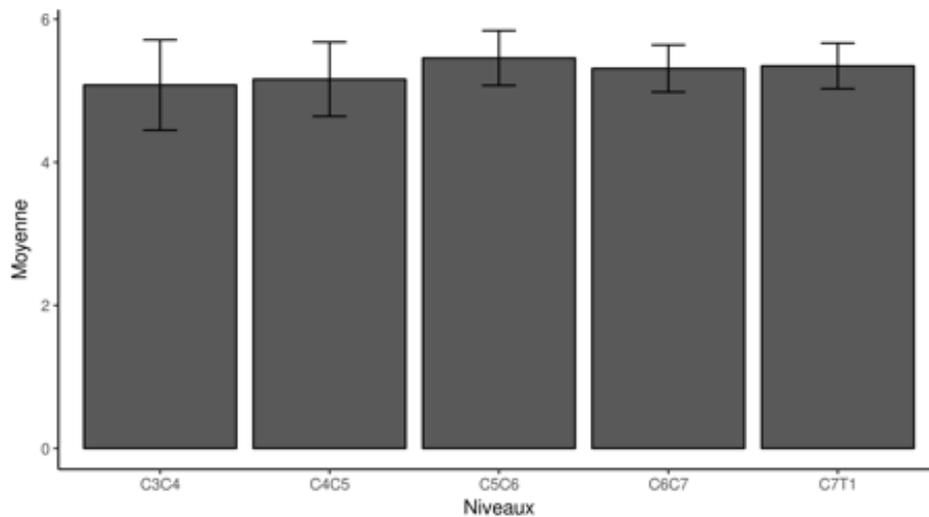


c) Largeur en regard de la base de l'uncus (Irbu)

Tableau 12 : dimensions moyennes des largeurs en regard de la base de l'uncus des récessus des foramens intervertébraux (Irbu) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne Irbu (mm)	Écart-type Irbu (mm)
C3C4	5,080	0,631
C4C5	5,161	0,519
C5C6	5,457	0,383
C6C7	5,311	0,329
C7T1	5,347	0,318

Graphique 8 : illustration de la largeur (en mm) en regard de la base de l'uncus du récessus du foramen intervertébral (lrbu) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)



B. Résultats concernant les mesures des paramètres liés au disque intervertébral

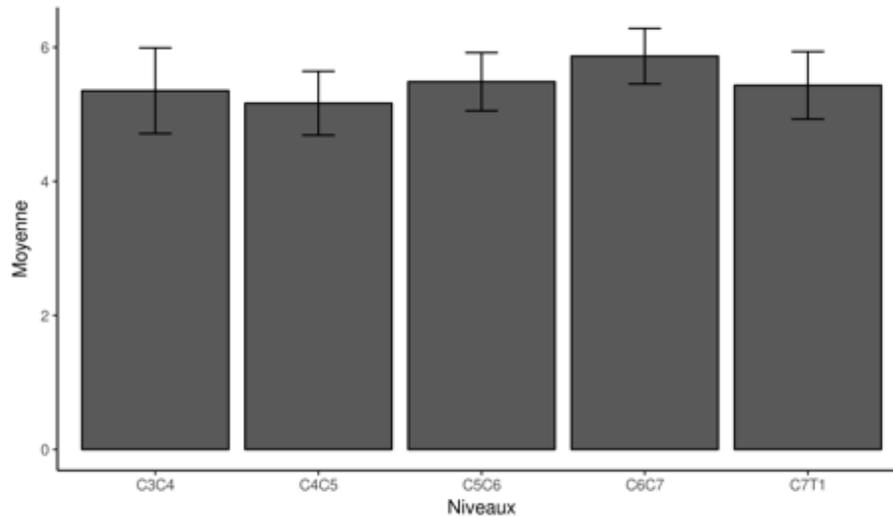
1. Hauteur du disque intervertébral (HD)

Les résultats concernant la hauteur du disque intervertébral selon le niveau cervical sont résumés dans le tableau et le graphique ci-dessous. Nous constatons des valeurs proches à tous les niveaux, néanmoins le disque C6C7 était plus haut que les autres.

Tableau 13 : dimensions moyennes des hauteurs discales (HD) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en millimètres)

NIVEAU	Moyenne HD (mm)	Écart-type HD (mm)
C3C4	5,352	0,639
C4C5	5,165	0,477
C5C6	5,486	0,434
C6C7	5,867	0,414
C7T1	5,432	0,504

Graphique 9 : illustration de la hauteur (en mm) du disque intervertébral (HD) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)



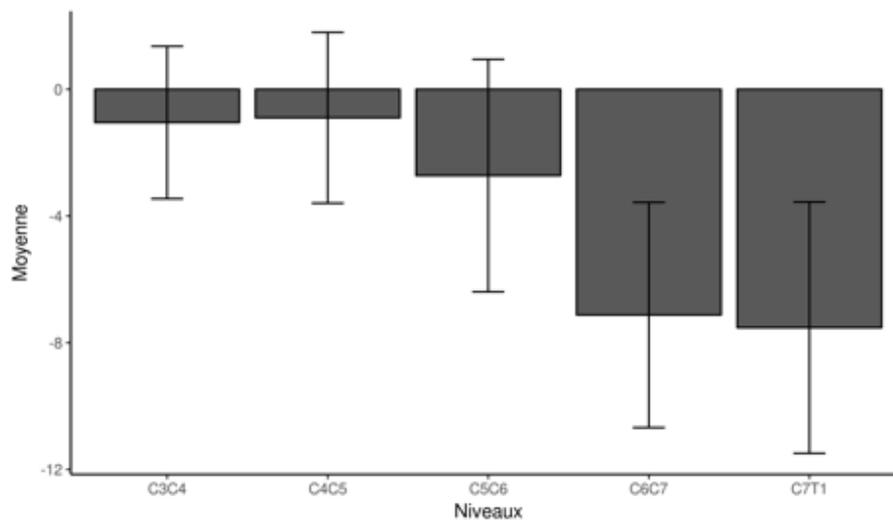
2. Angulation locale / discale (AD)

Les résultats concernant l'angulation locale selon le niveau cervical sont résumés dans le tableau et le graphique ci-dessous. Nous constatons une lordose plus importante aux étages inférieurs.

Tableau 14 : valeurs moyennes des angulations locales (AD) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en degrés), plus la valeur est négative plus la lordose est importante

NIVEAU	Moyenne AD (degrés)	Écart-type AD (degrés)
C3C4	-1,050	2,406
C4C5	-0,900	2,696
C5C6	-2,725	3,668
C6C7	-7,125	3,554
C7T1	-7,525	3,966

Graphique 10 : illustration de l'angulation locale (en degrés) du disque intervertébral (AD) du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types), , plus la valeur est négative plus la lordose est importante



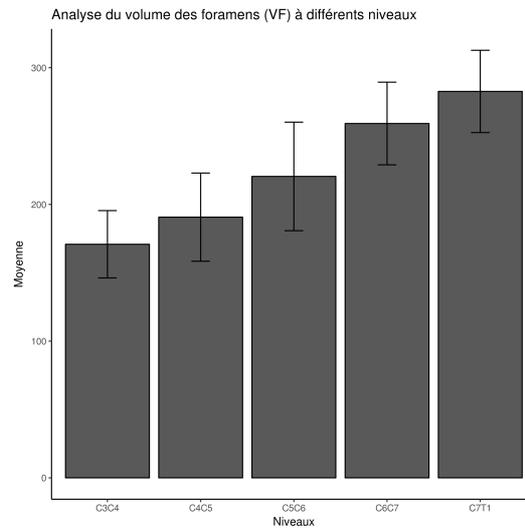
C. Résultats concernant le volume des foramens intervertébraux (VF)

Les résultats concernant le volume foraminal selon le niveau cervical sont résumés dans le tableau et le graphique ci-dessous. Nous constatons une augmentation harmonieuse du volume plus nous nous rapprochons de la charnière cervico-thoracique.

Tableau 15 : valeurs moyennes du volume des foramens intervertébraux du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (les moyennes et les écart-types sont donnés en mm³)

NIVEAU	Moyenne VF (mm ³)	Écart-type VF (mm ³)
C3C4	170,836	24,617
C4C5	190,685	32,246
C5C6	220,459	39,694
C6C7	259,159	30,235
C7T1	282,620	30,081

Graphique 11 : illustration du volume (en mm³) des foramens intervertébraux du rachis cervical inférieur selon le niveau concerné (moyennes et écart-types)



D. Résultats concernant les corrélations étudiées

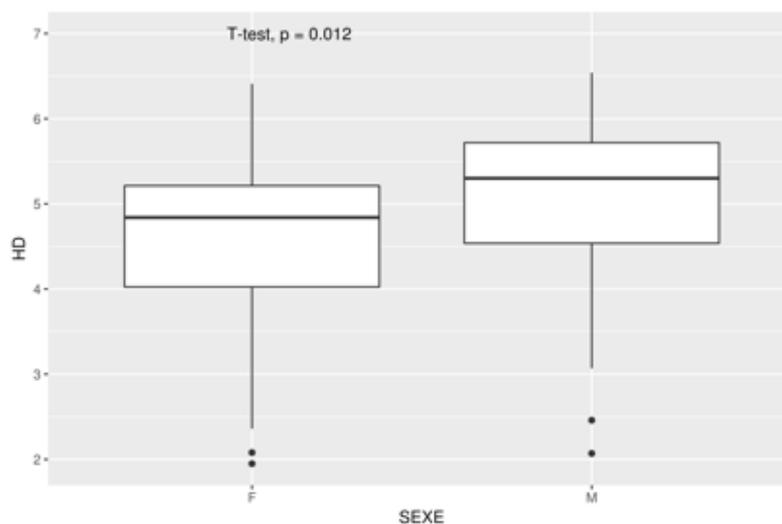
1. Corrélations liées au sexe

Nous retrouvons une corrélation liée au sexe significative concernant 3 paramètres : la hauteur discale (HD), la hauteur du foramen (HF) et la longueur du foramen (LF). Pour ces 3 paramètres, les valeurs étaient significativement plus grandes chez les hommes que chez les femmes.

Nous illustrons ces corrélations ci-dessous sous forme de « box-plot » (boîte à moustaches ou diagramme en boîte).

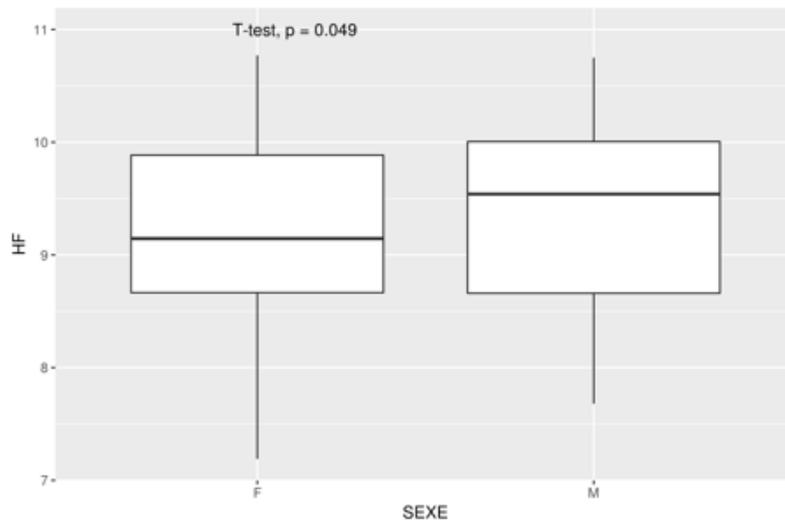
a) Concernant la hauteur discale (HD)

Graphique 12 : étude de la corrélation au genre de HD



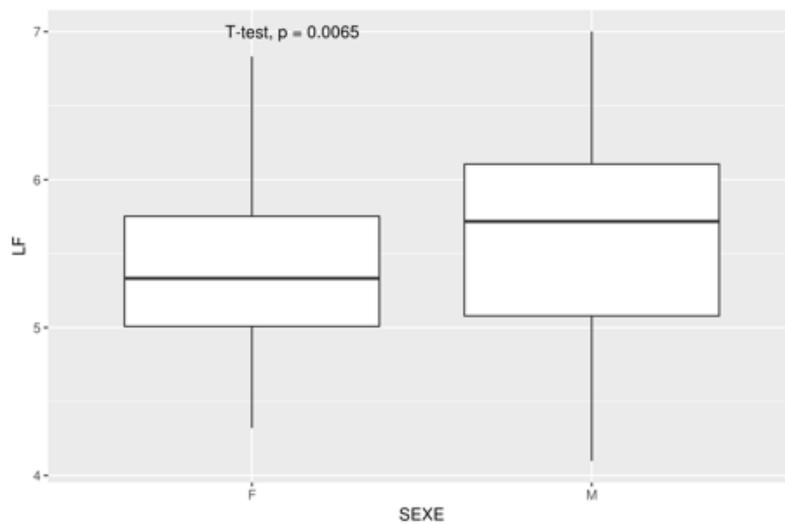
b) Concernant la hauteur du foramen (HF)

Graphique 13 : étude de la corrélation au genre de HF



c) Concernant la longueur du foramen (LF)

Graphique 14 : étude de la corrélation au genre de LF



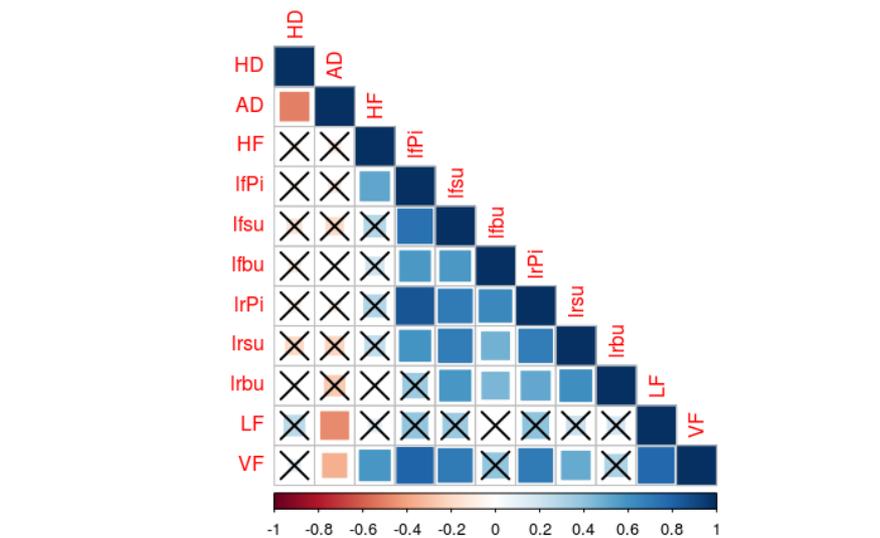
2. Corrélations liées au paramètres morphologiques

Il n'était pas retrouvé de corrélation significative liée aux différents paramètres morphologiques (poids, taille, IMC) recueillis dans la « population asymptotique ».

3. Corrélations entre les paramètres

Les résultats des corrélations entre les facteurs mesurés et le volume foraminal sont représentés sous forme d'un histogramme. Les cases marquées d'une croix sont non significatives. Les couleurs bleues représentent les corrélations positives (*si le facteur a augmente, le facteur b augmente*) et les couleurs rouges représentent les corrélations négatives (*si le facteur a augmente, le facteur b diminue*). Les tableaux de l'analyse statistique sont donnés en « Annexes ».

Graphique 15 : étude des corrélations entre les facteurs



a) Concernant les corrélations positives

Nous constatons que la hauteur discale n'était pas corrélée significativement aux dimensions foraminales. La hauteur foraminale n'était pas, d'une façon générale (sauf avec la IfPi), corrélée significativement aux autres dimensions foraminales mesurées. La longueur foraminale n'était pas corrélée significativement aux autres paramètres mesurés. Les différentes largeurs mesurées (IfPi, Ifsu, Ifbu, IrPi, Irsu, Irbu) étaient, d'une façon générale (sauf IfPi et Irbu), corrélées positivement significativement entre elles.

Le volume foraminal (VF) était un paramètre calculé à partir de certains facteurs mesurés (HF, LF, IfPi, Ifsu, Ifbu). Les corrélations entre VF et les facteurs ayant servi à son calcul n'ont donc pas de valeur statistique.

b) Concernant les corrélations négatives

Il existait une corrélation négative significative entre HD et AD. Ce résultat signifie que si HD augmente, AD diminue (tend vers des valeurs d'angle négatives) et inversement. En raisonnement pratique nous constatons donc que si la hauteur discale était plus importante le niveau était plus lordosé et si elle était plus faible le niveau était moins lordosé.

Il existait la même corrélation négative entre VF et AD.

IV. Résultats de l'étude « foramens sténosés de la population névralgique » versus « foramens de la population asymptotomatique »

On rappelle que dans la population asymptotomatique tous les foramens étaient considérés comme « sains ».

Nous rappelons également qu'il fallait un minimum de deux patients dans chaque groupe afin d'obtenir une moyenne qu'on pouvait ensuite comparer. Ainsi nous avons pu réaliser cette analyse comparative pour les niveaux C4C5, C5C6 et C6C7.

Nous allons présenter ces résultats ci-dessous à l'aide de graphiques. Les tableaux statistiques associés aux graphiques sont répertoriés en « Annexes ».

Pour la lecture des histogrammes nous présentons la p-value sous la forme suivante :

-* : p-value inférieure à 0,05

-** : p-value inférieure à 0,01

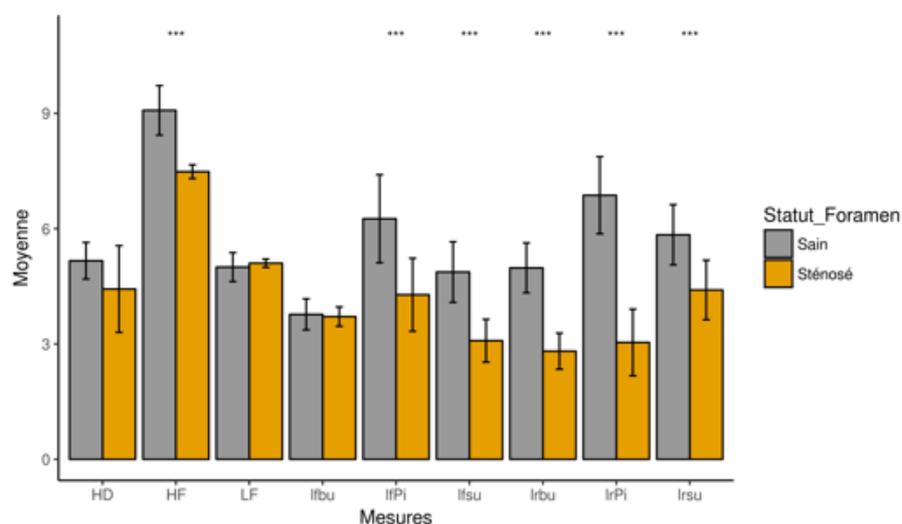
-*** : p-value inférieure à 0,001

A. Analyse du niveau C4C5

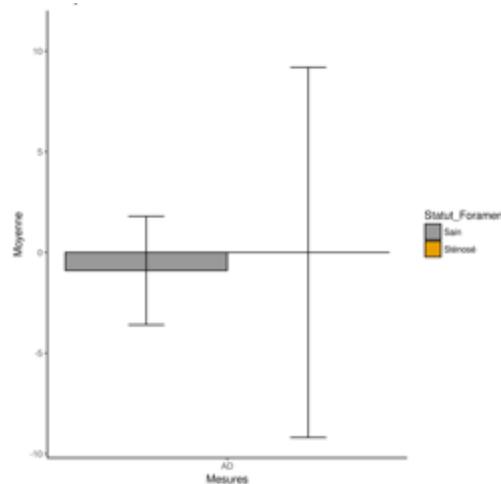
Cette analyse a comparé quatre foramens « sténosés » de la cohorte « patients névralgiques » aux vingt foramens du même niveau C4C5 de la cohorte « patients asymptotomatiques ».

Les paramètres liés au disque intervertébral ont également été comparés dans cette analyse.

Graphique 16: comparaison des mesures tomодensitométriques liées aux foramens intervertébraux et de la hauteur discale au niveau C4C5 entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptotomatique » (les paramètres sont donnés en abscisse et leur valeur est donnée en mm en ordonnée)



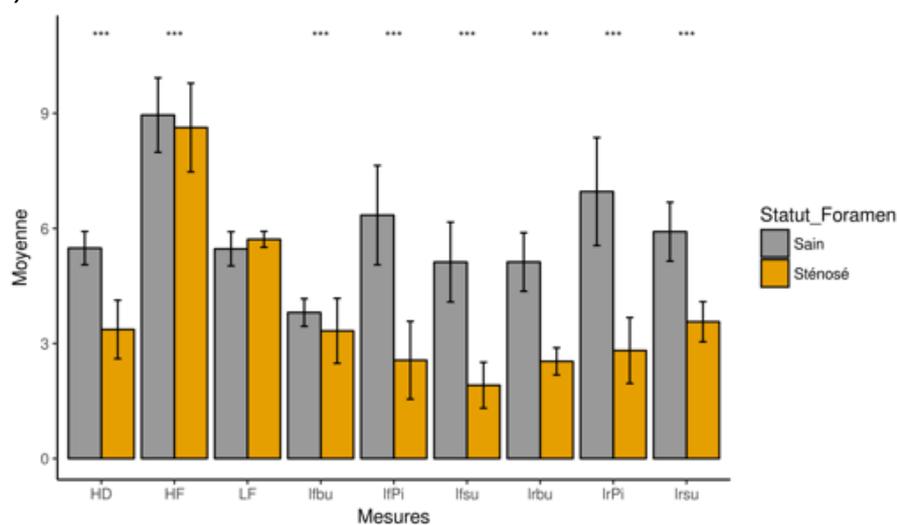
Graphique 17 : comparaison de la mesure tomodensitométrique de l'angulation locale au niveau C4C5 entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique » (AD est donné en abscisse et la valeur est donnée en degrés en ordonnée)



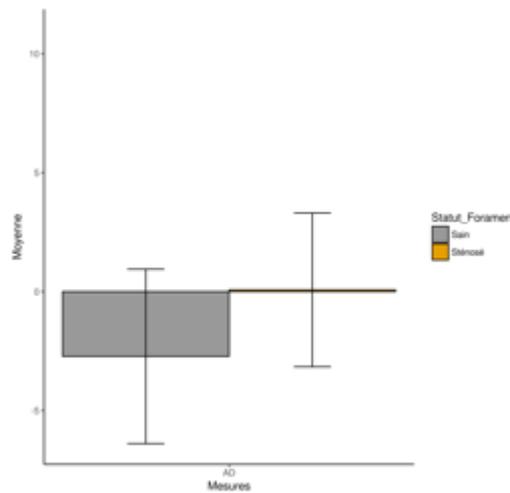
B. Analyse du niveau C5C6

Cette analyse a comparé dix foramens « sténosés » de la cohorte « patients névralgiques » aux vingt foramens du même niveau C5C6 de la cohorte « patients asymptomatiques ». Les paramètres liés au disque intervertébral ont également été comparés dans cette analyse.

Graphique 18 : comparaison des mesures tomodensitométriques liées aux foramens intervertébraux et de la hauteur discale au niveau C5C6 entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique » (les paramètres sont donnés en abscisse et leur valeur est donnée en mm en ordonnée)



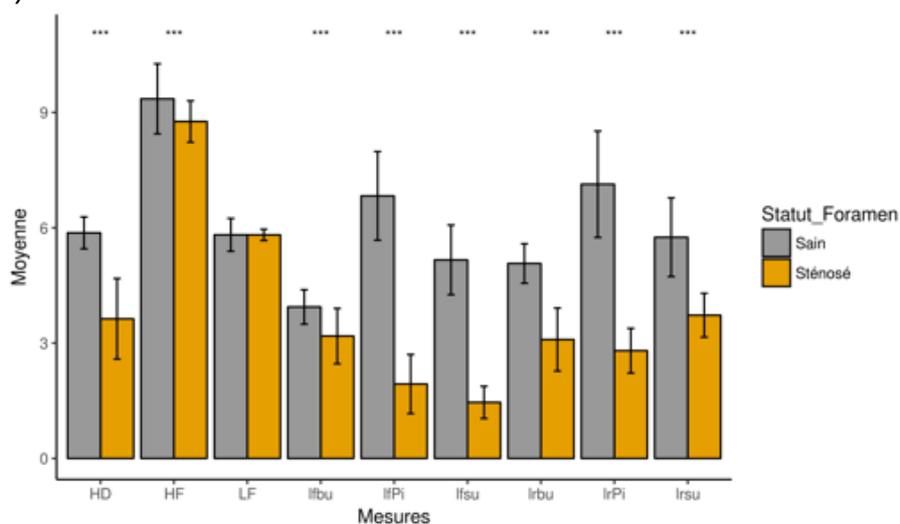
Graphique 19 : comparaison de la mesure tomodensitométrique de l'angulation locale au niveau C5C6 entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique » (AD est donné en abscisse et la valeur est donnée en degrés en ordonnée)



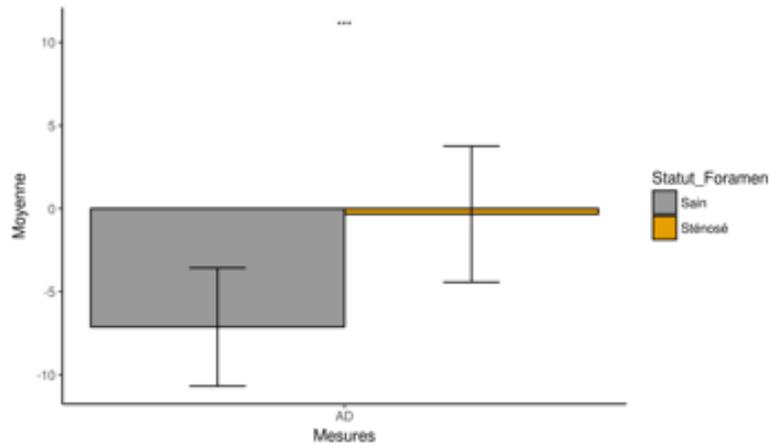
C. Analyse du niveau C6C7

Cette analyse a comparé sept foramens « sténosés » de la cohorte « patients névralgiques » aux vingt foramens du même niveau C5C6 de la cohorte « patients asymptomatiques ». Les paramètres liés au disque intervertébral ont également été comparés dans cette analyse.

Graphique 20 : comparaison des mesures tomodensitométriques liées aux foramens intervertébraux et de la hauteur discale au niveau C6C7 entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique » (les paramètres sont donnés en abscisse et leur valeur est donnée en mm en ordonnée)

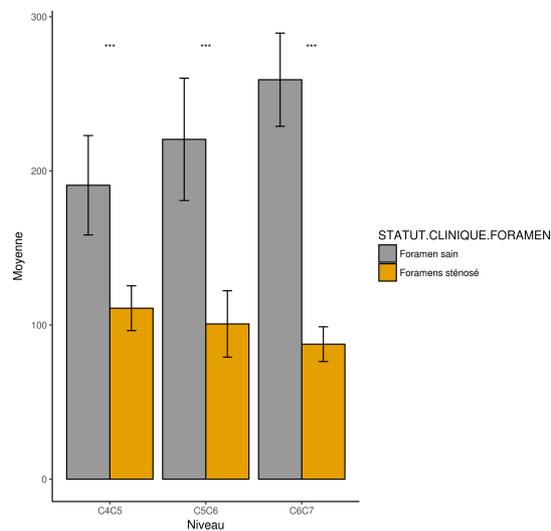


Graphique 21 : comparaison de la mesure tomodensitométrique de l'angulation locale au niveau C6C7 entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique » (AD est donné en abscisse et la valeur est donnée en degrés en ordonnée)



D. Comparaison du Volume foraminaux

Graphique 22 : comparaison des volumes des foramens intervertébraux aux étages C4C5, C5C6 et C6C7 entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique » (les étages cervicaux sont donnés en abscisse et la valeur est donnée en mm3 en ordonnée)



V. Résultats de l'étude « foramens sténosés de la population névralgique » versus « foramens sains de la population névralgique »

Pour les mêmes raisons qu'énoncées précédemment, nous avons pu réaliser cette analyse comparative pour les niveaux C4C5, C5C6 et C6C7.

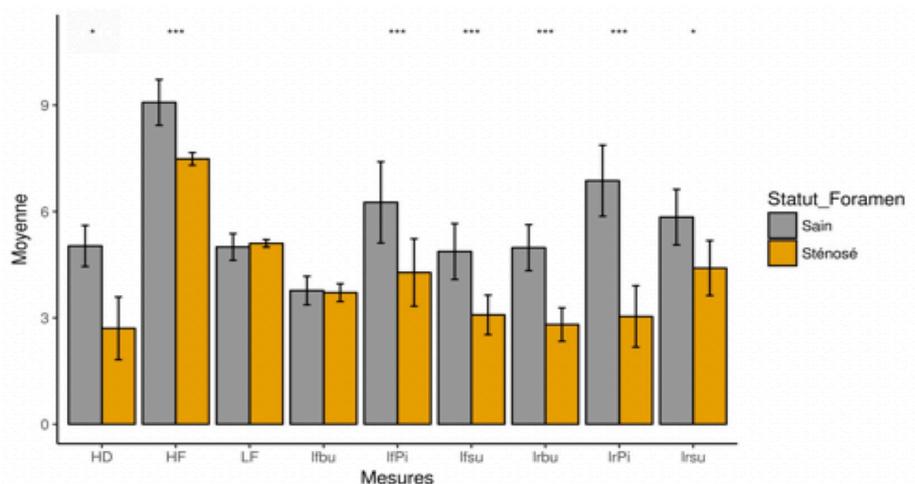
Les résultats seront présentés selon la même forme que dans la sous-partie précédente (graphiques ci-dessous et tableaux statistiques correspondants en « Annexes »).

A. Analyse du niveau C4C5

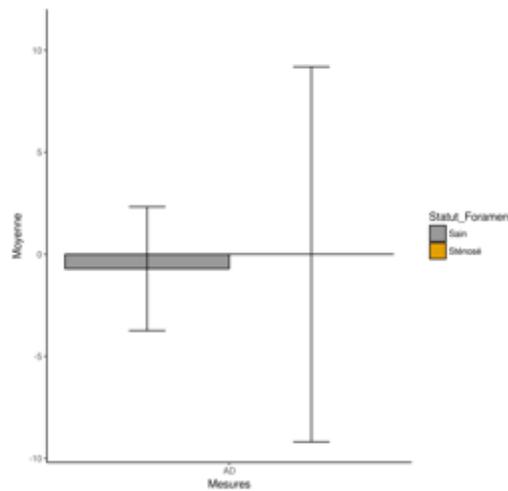
Au sein de la cohorte « patients névralgiques », cette analyse a comparé quatre foramens « sténosés » à seize foramens « sains ».

Les paramètres liés au disque intervertébral ont également été comparés dans cette analyse.

Graphique 23 : comparaison des mesures tomodensitométriques liées aux foramens intervertébraux et de la hauteur discale au niveau C4C5 entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique » (les paramètres sont donnés en abscisse et leur valeur est donnée en mm en ordonnée)



Graphique 24 : comparaison de la mesure tomodensitométrique de l'angulation locale au niveau C4C5 entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique » (AD est donné en abscisse et la valeur est donnée en degrés en ordonnée)

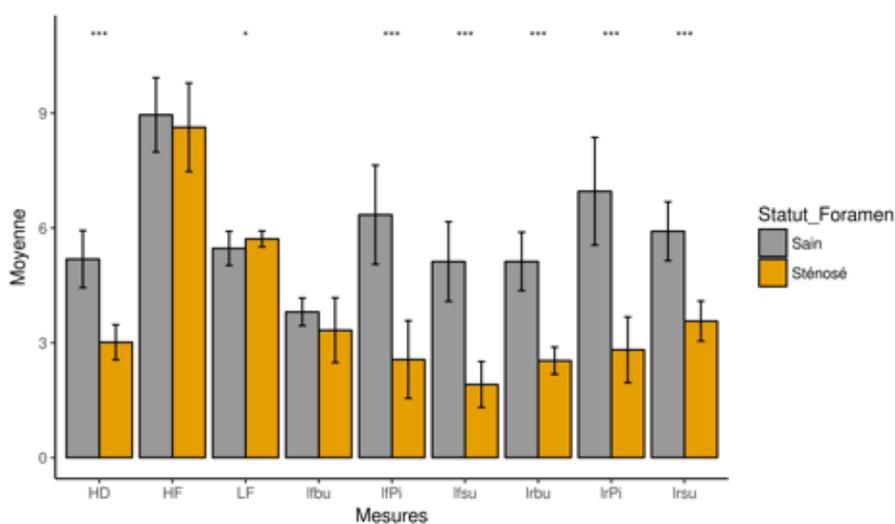


B. Analyse du niveau C5C6

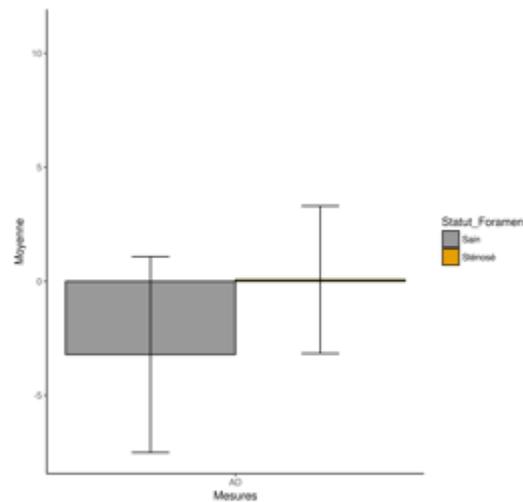
Au sein de la cohorte « patients névralgiques », cette analyse a comparé dix foramens « sténosés » à dix foramens « sains ».

Les paramètres liés au disque intervertébral ont également été comparés dans cette analyse.

Graphique 25 : comparaison des mesures tomodensitométriques liées aux foramens intervertébraux et de la hauteur discale au niveau C5C6 entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique » (les paramètres sont donnés en abscisse et leur valeur est donnée en mm en ordonnée)



Graphique 26 : comparaison de la mesure tomodensitométrique de l'angulation locale au niveau C5C6 entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique » (AD est donné en abscisse et la valeur est donnée en degrés en ordonnée)

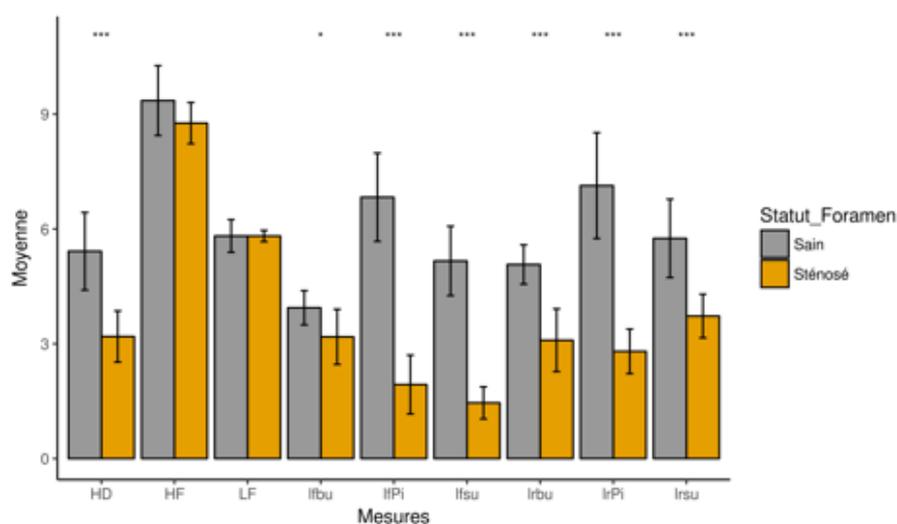


C. Analyse du niveau C6C7

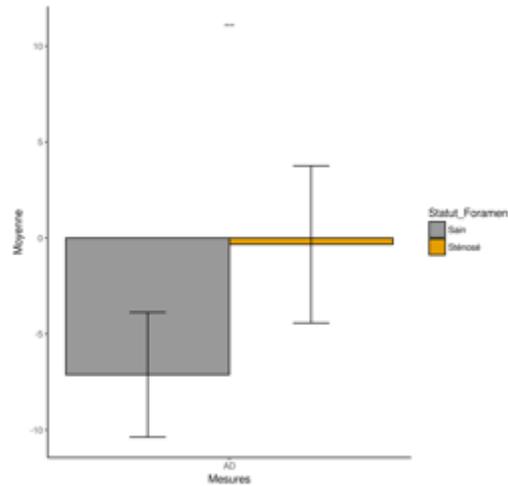
Au sein de la cohorte « patients névralgiques », cette analyse a comparé sept foramens « sténosés » à treize foramens « sains ».

Les paramètres liés au disque intervertébral ont également été comparés dans cette analyse.

Graphique 27 : comparaison des mesures tomodensitométriques liées aux foramens intervertébraux et de la hauteur discale au niveau C6C7 entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique » (les paramètres sont donnés en abscisse et leur valeur est donnée en mm en ordonnée)

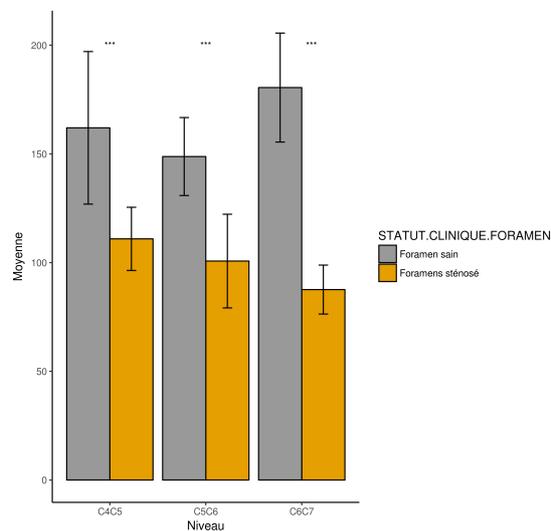


Graphique 28 : comparaison de la mesure tomodensitométrique de l'angulation locale au niveau C6C7 entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique » (AD est donné en abscisse et la valeur est donnée en degrés en ordonnée)



D. Comparaison du Volume foraminal

Graphique 29 : comparaison des volumes des foramens intervertébraux aux étages C4C5, C5C6 et C6C7 entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique » (les étages cervicaux sont donnés en abscisse et la valeur est donnée en mm3 en ordonnée)



DISCUSSION

Cette étude anatomique, de par son originalité méthodologique, nous a permis de cartographier ce véritable canal de conjugaison qu'est la portion pédiculaire du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur. Ce travail nous a permis de connaître les dimensions des foramens dans les différents plans de l'espace, ainsi que le volume de ce « canal », selon les niveaux concernés et d'étudier les corrélations qu'il pouvait exister selon les données morphologiques des patients, le sexe, et entre les différents paramètres étudiés. Un apport non négligeable de ce travail, était l'étude et la comparaison à la cohorte asymptomatique des foramens sténosés (cliniquement significatifs), permettant de mieux comprendre la pathologie dégénérative du rachis cervical, et aidant le chirurgien à planifier les chirurgies et les gestes de décompression.

I. Concernant la méthodologie de nos mesures

Le choix du scanner comme support d'analyse était motivé par le fait qu'il est généralement admis que la tomодensitométrie est l'examen de référence pour l'analyse des tissus osseux, l'IRM lui étant supérieure pour l'analyse des parties molles. L'inconvénient principal du scanner est l'irradiation. Cela n'était pas une limite éthique à notre étude puisqu'elle était rétrospective. Une publication récente (61) a démontré sur une série de 34 patients la non-infériorité de la séquence « Zero-Echo Time » en IRM par rapport à la tomодensitométrie pour l'analyse des sténoses ostéophytiques des foramens intervertébraux cervicaux. Néanmoins nous ne connaissons pas la disponibilité des machines permettant la réalisation de cette séquence.

Le protocole de nos mesures, détaillé dans la partie « Matériel et méthodes », était très précis et minutieux. Son application nous a permis d'obtenir une très bonne reproductibilité des paramètres mesurés.

Néanmoins, nous pouvons critiquer cette procédure quant à sa difficulté technique et à la dépense de temps impartie à sa réalisation. En effet, il a été demandé aux deux observateurs d'estimer le temps nécessaire pour réaliser les mesures sur un étage cervical en suivant drastiquement le protocole. Un observateur a indiqué avoir eu besoin de 45 minutes, le second 50 minutes.

Cette donnée rend difficile l'extrapolation de ce protocole à une cohorte de patients plus importante et au chirurgien lorsqu'il planifie une intervention chirurgicale.

Cette critique, n'est en revanche pas une limite quant au sujet de notre travail qui était l'étude précise et la cartographie osseuse de la portion pédiculaire du foramen intervertébral cervical.

Une composante importante de notre méthodologie était l'utilisation de plans orthogonaux sur le logiciel permettant de se positionner parfaitement dans le plan du foramen intervertébral sur toutes les reconstructions et durant toute la procédure. À ce propos, Shim J.H. et al (62) ont montré, par l'étude IRM de 43 patients, qu'une acquisition orientée perpendiculairement à l'axe du foramen intervertébral cervical permettait de meilleures sensibilités, spécificités et précisions dans le diagnostic des sténoses foraminales cervicales.

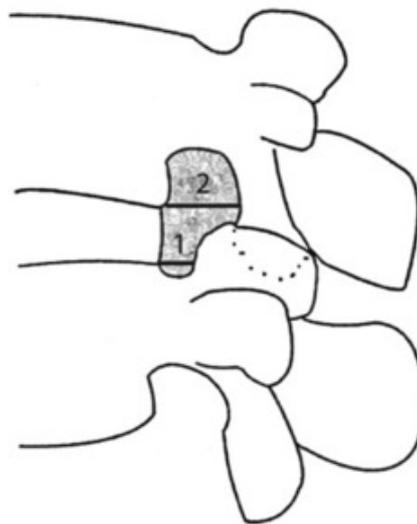
Nous retrouvons l'axe du foramen par l'utilisation des plans orthogonaux sans nécessité de calculer l'angle d'orientation du canal de conjugaison. Ainsi l'axe du foramen était

perpendiculaire aux pédicules. Cette méthodologie était confortée par les travaux anatomiques de Tanaka et al (18) qui déterminaient que la longueur et la direction du foramen intervertébral variait avec la largeur et la direction (axe) des pédicules.

Notre travail de recherche bibliographique a retrouvé de nombreuses études concernant les foramens lombaires mais peu s'intéressant aux foramens cervicaux. L'immense majorité étaient des études anatomiques sur cadavres ou os secs (anthropologie). Certains auteurs nous ont influencé quant à la détermination des mesures à réaliser sur les scanners que nous avons étudiés. La mesure de la hauteur foraminale dans le plan sagittal était un paramètre très fréquemment retrouvé.

Concernant les largeurs foraminales, il était important de considérer que le foramen intervertébral se situe anatomiquement dans l'axe traversé par le segment mobile de Junghanns. Ainsi nous pouvions séparer le foramen en 2 parties, comme cela a déjà été fait notamment par Cinotti et al (63) lors d'une étude anatomique des foramens lombaires, la partie supérieure du foramen était donc distinguée de la partie inférieure. Nous nous sommes inspiré des travaux de Rühli et al (64) et avons mesuré une largeur en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente et une en regard du plateau supérieur de la vertèbre sous-jacente au foramen intervertébral.

Figure 31 : foramen intervertébral lombaire et largeurs foraminales selon Rühli et al (64) ; 1 : largeur foraminale en regard du plateau supérieur de la vertèbre sous-jacente ; 2 : largeur foraminale en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente



A la différence de ces auteurs, l'apport du scanner et de nos reconstructions nous ont permis de mesurer les largeurs perpendiculairement à l'axe du foramen sur les reconstructions axiales. Nous avons également mesuré une troisième largeur en haut de l'uncus en regard du milieu du disque intervertébral, c'est à dire au plus proche de l'axe du segment mobile rachidien. Ainsi l'exploration des largeurs foraminales étaient plus précise dans notre travail.

La longueur de la portion pédiculaire foraminale était mesurée, s'inspirant des travaux d'Ebraheim et al (17) et Tanaka et al (18) qui définissaient différentes portions foraminales depuis le canal rachidien central jusqu'à l'extrémité latérale de l'apophyse transversaire. L'apport de la tomодensitométrie dans la mesure de ce paramètre était la possibilité

d'identifier grâce au déroulement des reconstructions sagittales les zones d'entrée et de sortie du « tunnel pédiculaire ». Une fois encore le scanner nous apportait plus de précision.

II. Étude de la reproductibilité et de la répétabilité des mesures

Nous retrouvons de très bonnes reproductibilités et répétabilités ($ICC > 0,9$) des mesures tomodensitométriques. Néanmoins nous pouvons critiquer humblement ce résultat.

Comme nous l'avons décrit précédemment, le protocole de mesure était extrêmement précis et rigoureux. Cette rigueur technique est la raison principale de la reproductibilité que nous retrouvons.

Néanmoins il paraît honnête de préciser que les 2 observateurs étaient entraînés à ce protocole de mesures puisque fruit de leur conception. La réalisation de ces mêmes mesures par un observateur non entraîné à ce protocole entraînerait peut-être une reproductibilité moins bonne.

Le haut niveau de reproductibilité était forcément influencé par le faible nombre d'observateurs, une analyse inter-observateur concernant plus d'investigateurs influencerait certainement négativement notre reproductibilité.

Le « zoom » nécessaire sur le programme Horos pour la bonne conduite du protocole amenait le logiciel à mesurer automatiquement les distances avec une précision au millième de millimètre. Cette précision était forcément gage de reproductibilité. Nous pouvons peut-être nous interroger sur la réalité et la fiabilité de cette précision informatique.

Nous avons calculé des coefficients intra-classe (ICC) étudiant la reproductibilité au dixième de millimètre pour les distances mesurées alors que les valeurs brutes étaient données avec une précision au millième. Ce choix était motivé par le fait qu'une précision à 0,1mm paraissait suffisante alors qu'une précision à 0,001mm n'était pas pertinente. Nous pouvons critiquer ainsi nos résultats et extrapoler en supposant que des ICC calculés pour une reproductibilité au millième auraient été moins élevés.

Un autre élément ayant favorisé la reproductibilité était que les mesures réalisées correspondaient à des distances (sauf pour AD qui était un angle). Une distance entre un point A et un point B est une mesure plus facile à réaliser et donc plus fiable en termes de reproductibilité qu'une autre mesure plus difficile techniquement.

La qualité des coupes infra-millimétriques en fenêtrage osseux des examens analysés était excellente et la tomodensitométrie est l'examen de référence pour l'analyse des tissus osseux. Ainsi le placement du curseur de mesure à la limite endocanalaire des corticales osseuses était aisé. La qualité des examens d'imagerie a donc favorisé la précision de nos mesures et influencé positivement la reproductibilité.

Cette très bonne reproductibilité n'était pas discordante par rapport aux données de la littérature. Nous ne retrouvons pas d'étude similaire à la nôtre analysant l'anatomie osseuse tomodensitométrique du foramen intervertébral, mais d'un point de vue méthodologique plusieurs publications trouvaient d'excellentes reproductibilités de différentes mesures réalisées sur scanner. Nous pouvons citer Brett A Freedman et al (65) qui étudiaient des mesures tomodensitométriques osseuses du foramen vertébral cervical chez des patients souffrant de myélopathie. Les auteurs trouvaient une excellente reproductibilité de leurs mesures avec des ICC aux alentours de 0,9. Dans une étude

tomodensitométrie d'odontologie, Pegah Naji et al (66) retrouvaient des ICC supérieurs à 0,95 concernant les reproductibilités intra et inter-observateur de leurs mesures. Nous pouvons également citer un travail concernant la dyskinésie de l'omoplate où Jin-Young Park et al (67) mesuraient des angles sur des reconstructions tomodensitométriques en trois dimensions. Les auteurs retrouvaient des ICC de 0,981 et 0,988 pour la reproductibilité inter et intra-observateur de leurs mesures.

III. Étude de la population « asymptotique »

La recherche bibliographique a conforté la réalisation de notre travail, en effet nous n'avons pas retrouvé de publication décrivant avec précision l'anatomie osseuse tomodensitométrique de la portion pédiculaire du foramen intervertébral du rachis cervical inférieur. Il était donc difficile de comparer nos résultats avec la littérature existante en raison du faible nombre d'articles traitant le sujet, et devant les différences méthodologiques (populations étudiées, étude cadavérique, étude in vivo, analyse macroscopique, analyse par imagerie ; etc....) qu'il existait entre notre travail et les études retrouvées.

A. Concernant les paramètres relatifs aux foramens intervertébraux

Nous pouvons, pour les mesures réalisées, proposer le tableau suivant.

Tableau 16 : moyennes des paramètres (avec écarts-type) relatifs aux foramens intervertébraux selon les étages du rachis cervical inférieur dans la population asymptotique

	HF (mm)	LF (mm)	lfPi (mm)	lfsu (mm)	lfbu (mm)	lrPi (mm)	lrsu (mm)	lrbu (mm)
C3C4	9,3 +/-0,8	4,7 +/-0,5	6,2 +/-0,7	5,0 +/-0,6	3,7 +/-0,4	7,0 +/-0,7	6,0 +/-0,7	5,1 +/-0,6
C4C5	9,3 +/-0,5	4,9 +/-0,4	6,9 +/-0,8	5,2 +/-0,6	3,9 +/-0,3	7,4 +/-0,6	6,2 +/-0,6	5,2 +/-0,5
C5C6	9,3 +/-0,8	5,4 +/-0,5	7,0 +/-0,9	5,7 +/-0,7	3,9 +/-0,2	7,8 +/-0,5	6,3 +/-0,5	5,5 +/-0,4
C6C7	9,8 +/-0,8	5,8 +/-0,5	7,6 +/-0,6	5,7 +/-0,7	4,1 +/-0,4	8,1 +/-0,4	6,4 +/-0,5	5,3 +/-0,3
C7T1	10,0 +/-0,2	6,2 +/-0,5	7,5 +/-0,4	6,0 +/-0,5	3,8 +/-0,3	7,9 +/-0,6	6,7 +/-0,4	5,3 +/-0,3

Le premier constat est la croissance globale, mais en proportion faible, des dimensions foraminales plus on se rapproche de la charnière cervico-thoracique.

L'étude de ces résultats confirment la forme « ovoïde » (hauteur plus importante que la largeur) des foramens cervicaux. Cette spécificité anatomique est connue et montrée par de nombreux travaux dont notamment ceux de Czervionke et al en 1988 (68) dans une étude IRM sur cadavres et sujets volontaires sains.

Concernant la hauteur foraminale (HF), ce paramètre a été mesuré au centre du canal de conjugaison (en regard du milieu du pédicule sus-jacent, cf « matériel et méthodes ») dans notre travail. Nous retrouvons des valeurs aux alentours de 9mm pour les étages C3C4, C4C5, C5C6 et de 10mm pour les deux derniers étages (C6C7 et C7T1).

La longueur foraminale (LF) mesurée augmentait également plus le foramen était caudal. Ainsi nous retrouvons une valeur moyenne de 4,7mm en C3C4 et 6,2mm en C7T1.

En ce qui concerne les différentes largeurs, elles augmentaient toutes en se rapprochant de C7T1 sauf pour les largeurs mesurées à la base de l'uncus qui étaient globalement similaires quelque-soit le niveau. Nous notions également que les largeurs mesurées au niveau du « récessus » étaient plus grandes que celles au centre du foramen.

Dans une étude très complète, où les foramens cervicaux étaient analysés par scanner et IRM chez 7 cadavres humains frais (de 44 à 85 ans), Sohn H.M et al (69) déterminaient différentes mesures.

Les auteurs retrouvaient une hauteur foraminale moyenne de 11,08 +/-1,88mm et une largeur moyenne de 5,69 +/-1,91mm, la longueur n'était pas mesurée.

Ces résultats peuvent paraître éloignés des nôtres, mais plusieurs éléments méthodologiques sont à intégrer.

Les mesures étaient réalisées sur des rachis disséqués. Ces segments étaient désolidarisés du reste du corps et des parties molles cervicales. Ainsi, l'action des muscles érecteurs du rachis cervical postérieur et la nécessité de supporter le poids de la tête étaient supprimées, ce qui pouvait modifier les dimensions foraminales par rapport à une étude in vivo comme la nôtre. Nous notons également que les écarts-types étaient bien plus importants que les nôtres. Ainsi nos résultats ne paraissent pas discordants par rapport à ce travail.

Nous pouvons également de nouveau citer le travail d'Ebraheim et al (17). Les auteurs, dans une étude cadavérique sur 14 sujets, définissaient plusieurs portions du foramen intervertébral cervical (cf. « Rappels Anatomiques »). Une portion proche de celle que nous nommons portion pédiculaire était étudiée et plusieurs mesures réalisées. Ils mesuraient des hauteurs et des largeurs maximales pour chaque foramen, ainsi il apparait logique de comparer leurs largeurs avec la lfPi dans notre étude.

Tableau 17 : comparaison de HF et lfPi avec l'étude d'Ebraheim et al (17) (HmaxF et lmaxF sont respectivement les hauteurs et largeurs maximales foraminales mesurées par les auteurs cités)

	HmaxF (mm)	HF (mm)	lmaxF (mm)	lfPi (mm)
C3C4	7,4 +/- 1,1	9,3 +/-0,8	4,5 +/-0,8	6,2 +/-0,7
C4C5	7,4 +/- 1,1	9,3 +/-0,5	5,2 +/-1,4	6,9 +/-0,8
C5C6	8,2 +/-0,9	9,3 +/-0,8	5,9 +/-0,9	7,0 +/-0,9
C6C7	8,6 +/-1,4	9,8 +/-0,8	6,0 +/-0,9	7,6 +/-0,6
C7T1	8,6 +/-1,0	10,0 +/-0,2	7,0 +/-1,1	7,5 +/-0,4

Nous constatons que nos mesures sont légèrement plus grandes. Plusieurs facteurs l'expliquent et nous confortent dans la probité de nos résultats.

Tout d'abord les sujets cadavériques étudiés étaient âgés de 62 à 78 ans, donc probablement atteints de cervicarthrose.

Deuxièmement, les colonnes étudiées étaient positionnées en lordose cervicale (30°) ce qui n'est pas le cas des patients étudiés dans notre travail (puisque lors du scanner, les sujets en position allongée ont une courbure cervicale moins importante, ce qui était confirmé par les angulations locales (AD) mesurées).

Lors des mesures sur ces sujets cadavériques, les structures capsulo-ligamentaires étaient préservées. Connaissant l'épaisseur non négligeable de ces tissus, il apparaît normal que les mesures des auteurs soient moins grandes que les nôtres. Enfin, les écarts-types de cette étude étaient plus importants que les nôtres.

Dans ce travail anatomique, les auteurs mesuraient également la longueur d'une portion foraminale (« medial zone length »), proche de la portion pédiculaire que nous définissons, de C2C3 à C6C7. Leurs résultats étaient très proches des longueurs foraminales (LF) que nous retrouvions.

Tableau 18 : comparaison de LF avec l'étude d'Ebraheim et al (17) (Lmz h et Lmz f sont respectivement les longueurs de la zone foraminale médiale chez les hommes et chez les femmes mesurées par les auteurs cités)

	Lmz h (mm)	Lmz f (mm)	LF (mm)
C3C4	4,7 +/-0,9	4,9 +/-0,6	4,7 +/-0,5
C4C5	5,5 +/-1,0	5,1 +/-0,9	4,9 +/-0,4
C5C6	5,9 +/-1,4	5,6 +/-0,9	5,4 +/-0,5
C6C7	6,2 +/-0,9	5,0 +/-1,0	5,8 +/-0,5

Dans un autre travail anatomique, Rühli F.J et al (64) étudiaient 71 pièces anatomiques (41 hommes et 30 femmes) et s'intéressaient particulièrement à l'anatomie osseuse du foramen intervertébral. Les « vertèbres de transition » (11,70,71) étaient étudiées, à savoir C3, C7, T1, T6, T10, L1 et L5. Les auteurs mesuraient 2 largeurs par foramen intervertébral : une en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente (IFWca) très proche de la IrPi que nous avons mesuré, et une en regard du plateau supérieur de la vertèbre sous-jacente (IFWcr) très proche de notre Irbu. Ainsi nous pouvons comparer leurs résultats concernant IFWca de C3 correspondant à IrPi C3C4, IFWcr de C7 correspondant à Irbu C6C7 et IFWca de C7 correspondant à IrPi C7T1. Nous choisissons de comparer par rapport à nos mesures effectuées dans le « récessus » et non pas au centre du foramen car les auteurs réalisaient les mesures en regard de l'entrée médiale du foramen comme on peut l'observer sur la figure ci-dessous.

Figure 32 : Vues latérale et supérieure d'une vertèbre avec représentation de IFWcr (a) et IFWca (b) selon Rühli et al (64)

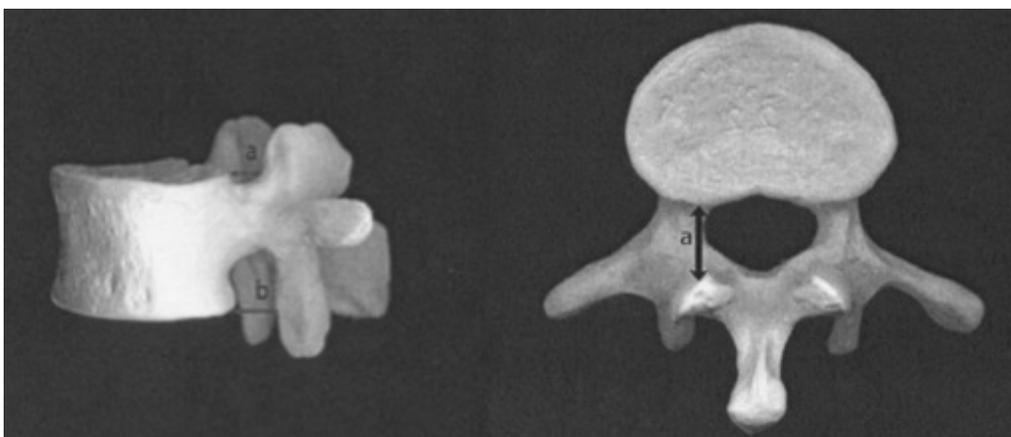


Tableau 19 : comparaison de IrPi avec l'étude de Rühli et al (64) (IFWca h et IFWca f étaient respectivement les mesures des auteurs chez les hommes et chez les femmes)

	IFWca h (mm)	IFWca f (mm)	IrPi (mm)
C3C4	8,2 +/-1,3	à gauche: 8,3 +/-1,2 ; à droite: 8,1 +/-1,3	7,0 +/-0,7
C7T1	à gauche: 10,1 +/-1,5 ; à droite: 10,1 +/-1,2	à gauche: 10,0 +/-1,3 ; à droite: 9,8 +/-1,1	7,9 +/-0,6

Tableau 20 : comparaison de Irbu avec l'étude de Rühli et al (64) (IFWcr h et IFWcr f étaient respectivement les mesures des auteurs chez les hommes et chez les femmes)

	IFWcr h (mm)	IFW cr f (mm)	Irbu (mm)
C6C7	à gauche: 6,3 +/-0,9 ; à droite: 6,6 +/-0,7	à gauche: 6,6 +/- 0,8 ; à droite: 6,8 +/-0,8	5,3 +/-0,3

Deux raisons principales expliquaient les différences observées. Dans l'article cité, l'axe de mesure des largeurs foraminales était l'axe du plan sagittal (cf figure ci-dessus), alors que nos mesures étaient réalisées dans un axe, prédéfini par l'utilisation de plans orthogonaux, perpendiculaire à l'axe du foramen (dans l'axe du pédicule). Nous retrouvions également des écarts-types plus importants chez ces auteurs que dans notre travail. Ainsi, en comparaison à ces auteurs et pour les raisons évoquées ci-dessus nos résultats ne paraissent pas discordants. Nous pouvions également comparer les mesures selon le niveau cervical. Chez les auteurs IFWca de C3 était inférieure à IFWca de C7, dans notre travail la IrPi était également plus grande en C7T1 qu'en C3C4.

Considérant la portion pédiculaire du foramen étudiée dans notre travail, il paraissait intéressant de comparer nos résultats avec une étude s'intéressant aux pédicules cervicaux. Effectivement, il paraît logique d'imaginer que la longueur de cette portion foraminale (LF) correspond à la largeur des pédicules encadrant ce canal. Dans un article publié en 2008, Ruofu et al (72) ont étudié différentes mesures pédiculaires par analyse tomodensitométrique du rachis cervical chez 60 patients. Parmi les paramètres étudiés, celui qui nous intéressait était la largeur des pédicules cervicaux. Les auteurs retrouvaient des largeurs pédiculaires de 5,4 +/-0,6mm en C3, 5,3 +/-0,6mm en C4, 5,6 +/-0,6mm en C5, 5,8 +/-0,6mm en C6 et 6,7 +/-0,7mm en C7. Respectivement, dans notre travail la longueur foraminale (LF) était de 4,7 +/-0,5mm en C3C4, 4,9 +/-0,4mm en C4C5, 5,4 +/-0,5mm en C5C6, 5,8 +/-0,5mm en C6C7 et 6,2 +/-0,5mm en C7T1. Nous constatons que nos résultats étaient en accord avec ceux des auteurs concernant la valeur des mesures et également vis à vis de la variation selon les niveaux étudiés : la longueur du foramen « pédiculaire » augmentait plus on se rapprochait de la charnière cervico-thoracique. Cette comparaison nous montre également une similitude concernant ce paramètre (largeur pédiculaire pour les auteurs, longueur du foramen pédiculaire dans notre travail) dans deux séries démographiquement très différentes (une population chinoise pour les auteurs et une population européenne dans notre étude). Cette similitude a été confirmée dans une revue de la littérature publiée en 2010 (73) ayant inclue 33 études avec les mesures de 1311 rachis cervicaux, les auteurs ne concluaient pas à une différence significative concernant la largeur des pédicules selon les origines ethniques. Les travaux de Tanaka et al (18) montraient que la longueur des foramens intervertébraux variait avec la largeur des pédicules.

Enfin, notre travail tirait une originalité quant aux mesures des largeurs foraminales dans deux plans différents. Une première série de mesures était effectuée au centre du foramen (lfPi, lfsu et lfbu), une deuxième série était réalisée plus médialement dans l'espace que nous avons nommé le « récessus » du foramen intervertébral. Cette notion de « récessus » cervical n'est pas réellement décrite dans la littérature. Néanmoins le canal rachidien cervical a une forme triangulaire à base antérieure, cette anatomie lui confère donc un prolongement latéral en forme d'entonnoir à base médiale jusqu'à l'entrée du canal de conjugaison intervertébral. Cette spécificité anatomique est également confirmée et impliquée dans la physiopathologie des névralgies cervico-brachiales communes. En effet on distingue principalement deux étiologies principales : la « hernie discale molle » qui dans la majorité des cas, comprime les racines en dedans de l'uncus (ce dernier protégeant le canal de conjugaison intervertébral du disque) et la « hernie discale dure » qui correspond à la dégénérescence arthrosique des structures encadrant le foramen intervertébral (uncus et plateaux vertébraux notamment) et entraînant une sténose ostéophytique des racines dans cet espace (74). Nous n'avons pas retrouvé dans la littérature de travaux étudiant les dimensions du foramen intervertébral cervical dans ces deux plans. Nos résultats confirmaient l'anatomie détaillée ci-dessus car nous retrouvions des largeurs plus grandes dans le « récessus » (surtout dans la partie inférieure : lrbu) qu'au centre du foramen.

B. Concernant les paramètres relatifs aux disques intervertébraux

Nous pouvons, pour les mesures réalisées, proposer le tableau suivant.

Tableau 21 : moyennes des paramètres (avec écarts-types) relatifs aux disques intervertébraux selon les étages du rachis cervical inférieur dans la population asymptomatique (pour AD, un angle négatif signifie une lordose)

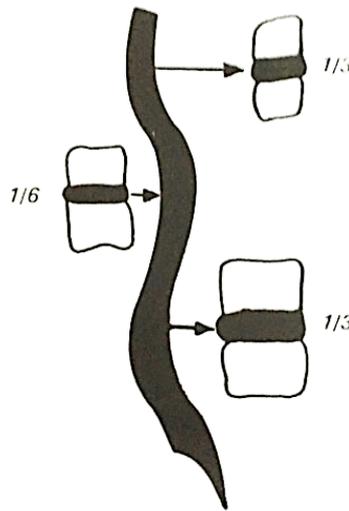
	HD (mm)	AD (degrés)
C3C4	5,4 +/-0,6	-1 +/-2,4
C4C5	5,2 +/-0,5	-0,9 +/-2,7
C5C6	5,5 +/-0,4	-2,7 +/-3,5
C6C7	5,9 +/-0,4	-7,1 +/-3,5
C7T1	5,4 +/-0,5	-7,5 +/-4,0

Concernant la hauteur du disque intervertébral (HD), nous constatons peu de différence selon le niveau étudié, le disque C6C7 était le plus haut dans notre série.

Les valeurs de nos mesures étaient cohérentes avec les hauteurs discales intervertébrales cervicales décrites dans la littérature. Selon Moore (75) la hauteur moyenne du disque intervertébral du rachis cervical inférieur varie de 5 à 6mm.

Nous pouvons rappeler qu'au niveau cervical, le disque intervertébral occupe une proportion importante de la longueur de ce segment rachidien. Le rapport disco-corporéal, d'1/3 pour Gilad (76), de 2/5 pour Kapandji (77), l'illustre parfaitement. Cette hauteur relative est donc le témoin de la mobilité plus importante de la colonne cervicale par rapport aux autres segments rachidiens. Cette mobilité, indispensable à la vie de l'être humain, est aussi responsable de la dégénérescence plus rapide du rachis cervical

Figure 33 : Rapport disco-corporal selon le niveau rachidien d'après Vital JM, Sénégas J, Lavignolle B. Anatomie descriptive et fonctionnelle de la colonne vertébrale. Éditions Bergeret. 2013: p95.



Concernant l'angulation locale (AD), ce paramètre était secondaire dans notre analyse. En effet, les scanners ayant été réalisés en position allongée, avec certainement des différences d'appui occipitaux selon les malades et la table d'examen, le but n'était pas de déterminer des angles normaux de lordose cervicale. Nous avons mesuré ce paramètre afin de l'intégrer à l'étude des corrélations pour savoir s'il y avait un impact sur les dimensions foraminales selon l'angulation du niveau cervical. Nous ne retrouvons de corrélations significatives ($p < 0,05$) qu'entre AD et HD et entre AD et VF. Ces corrélations étaient des corrélations négatives. Ainsi ce résultat montrait que la hauteur discale et le volume foraminal étaient plus élevés plus la lordose était importante (angle négatif).

C. Concernant le volume foraminal (VF)

Le calcul du volume de la portion pédiculaire du foramen intervertébral était un atout original dans notre travail.

En effet grâce aux nombreuses dimensions mesurées nous avons suffisamment de données pour pouvoir proposer le calcul du volume selon la formule détaillée dans « matériel et méthodes ». Nous pouvons proposer le tableau suivant.

Tableau 22 : moyennes des volumes (avec écarts-types) de la portion pédiculaire des foramens intervertébraux selon les étages du rachis cervical inférieur dans la population asymptotique

	VF (mm ³)
C3C4	171 +/-25
C4C5	191 +/-32
C5C6	220 +/-40
C6C7	259 +/-30
C7T1	283 +/-30

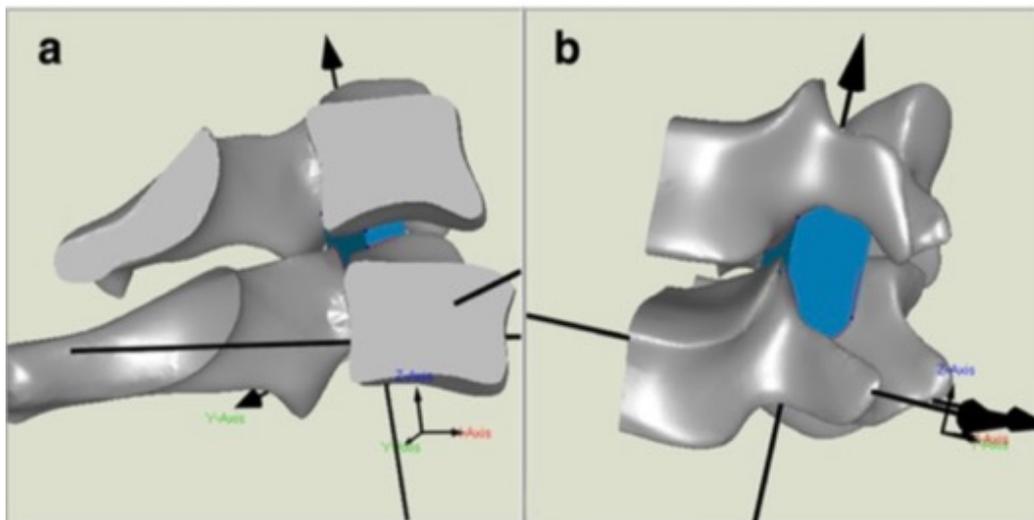
Nous constatons une augmentation harmonieuse des volumes depuis le haut du rachis cervical inférieur vers la charnière cervico-thoracique.

C'est finalement peut être le résultat le plus intéressant de notre travail, car à notre connaissance une seule étude ayant analysé ce paramètre n'a été retrouvée dans la littérature. La discussion de ces résultats est donc très difficile.

Yang et al (78) ont effectivement analysé le volume du foramen intervertébral cervical dans une étude publiée en 2018. Les auteurs étudiaient l'influence de la taille des greffons intersomatiques sur le volume et l'aire du foramen. Ils ont pour cela utilisé un scanner laser tridimensionnel qui leur permettait d'identifier un point au centre du foramen puis l'aire à l'entrée médiale et celle à la sortie latérale du canal. Ensuite les auteurs considéraient que le tunnel entre ces 2 aires représentait le foramen intervertébral et ils pouvaient calculer le volume via un logiciel. Notre méthodologie était évidemment plus rudimentaire et moins précise, néanmoins l'étude citée conforte notre travail car dans les deux cas le volume calculé était celui d'un cylindre à base elliptique.

Le travail de ces auteurs s'est concentré sur 6 pièces anatomiques cadavériques du segment cervical C5C6. Il apparaît donc pertinent de reproduire un travail similaire in vivo. Cela permettrait de déterminer les volumes des foramens dans plusieurs populations (jeunes, âgées, d'hommes, de femmes, d'ethnies différentes, symptomatiques, asymptomatiques...), d'étudier les facteurs les influençant, d'analyser les résultats post-opératoires des chirurgies cervicales et de corrélérer les résultats cliniques, de planifier les chirurgies en préopératoire, de travailler à la conception d'implants intersomatiques sur mesure et bien d'autres idées encore.

Figure 34 : Mesure du volume du foramen intervertébral C5C6 selon Yang et al (78)



Certains auteurs se sont intéressés à l'aire du foramen intervertébral.

Nous pouvons citer Lentell et al (79), dans une étude IRM chez 20 patients volontaires sains, ont étudié l'aire des foramens intervertébraux en position neutre et en flexion du rachis cervical. Les auteurs concluaient à une absence de différence significative des aires foraminales entre ces 2 positions. Nous pouvons critiquer ce résultat quant à la méthodologie des postures et au fait de ne pas avoir mesuré les paramètres en extension pour étudier les

différences aux 2 positions extrêmes de l'axe du mouvement antéro-postérieur. Néanmoins les auteurs ne retrouvaient pas dans leur résultat d'augmentation des aires foraminales selon le gradient cranio-caudal.

Dans une autre étude, Kitagawa et al (23) étudiaient la variation des dimensions foraminales, dont l'aire, en flexion et extension du rachis cervical à partir de mesures tomodensitométriques. Les auteurs concluaient à une différence significative ($p < 0,01$) de ces paramètres (augmentés en flexion et diminués en extension). De nouveau les auteurs ne retrouvaient pas des aires foraminales plus importantes plus le niveau étudié était bas.

Nous pouvons citer également un article récent (80) où Knapick DM et al ont étudié une importante série de squelettes jeunes, des deux sexes et de différentes origines ethniques. Les auteurs retrouvaient des aires foraminales significativement ($p < 0,01$) croissantes de C4C5 à C6C7.

Dans une étude, Ahmed SH et al (81) retrouvaient une aire foraminale significativement plus grande pour les foramens C5C6 et C6C7 par rapport aux foramens C3C4 et C4C5 dans une population asymptomatique.

La discussion de notre résultat concernant le volume du foramen est donc difficile. Même si certaines études ne retrouvent pas de différence des aires foraminales selon les niveaux étudiés, notre résultat ne paraît pas incohérent pour la raison suivante : par rapport à l'aire, le volume du foramen prend en compte une donnée supplémentaire, la longueur foraminale (LF) et nous avons vu plus haut que la LF grandissait selon les étages depuis le haut vers le bas du rachis cervical inférieur. Ainsi cela pourrait expliquer l'augmentation des volumes et non des aires foraminales plus on se rapproche de C7T1.

La principale critique que nous pouvons porter à notre travail est le faible nombre de sujets étudiés. Une analyse sur une série plus importante pourrait confirmer nos résultats. Nous pouvons également émettre des réserves quant au fait que les volumes soient calculés et non mesurés, néanmoins aux vues de la reproductibilité de nos mesures et de la fiabilité de la formule mathématique utilisée nos résultats nous paraissent cohérents. Comme suggéré plus haut, il apparaît pertinent de proposer un travail futur sur le volume 3D mesuré, et non calculé, des foramens intervertébraux.

D. Analyse des corrélations

Dans notre travail, nous retrouvons une corrélation significative ($p < 0,05$) relative au sexe pour 3 paramètres mesurés : la hauteur discale (HD), la hauteur foraminale (HF) et la longueur foraminale (LF).

En effet ces 3 dimensions étaient significativement plus grandes chez les hommes que chez les femmes.

Nous restons prudents vis à vis de ce résultat car le nombre de sujets étudiés dans notre série n'était pas très important et les résultats bibliographiques étaient aléatoires.

Nous retrouvons dans la littérature des articles traitant les relations entre la démographie et l'anatomie osseuse vertébrale. Néanmoins très peu d'études concernant le foramen intervertébral étaient retrouvées.

Nous pouvons citer les travaux d'Ezra D. et al (82) qui ont étudié les dimensions osseuses sur pièces anatomiques des vertèbres cervicales et du foramen rachidien central selon les origines ethniques et le genre. Les auteurs retrouvaient des dimensions significativement supérieures chez les hommes. Il est intéressant de noter qu'ils concluaient également à une modification de la forme des corps vertébraux avec l'âge, à savoir des corps plus larges dans le plan transversal et dans l'axe antéro-postérieur mais moins hauts (comme s'ils étaient tassés par le vieillissement), en revanche les dimensions du foramen central n'étaient pas influencées par l'âge. Cette notion nous permettait de rappeler que les sténoses dégénératives sont bien en rapport avec les éléments du segment mobile de Junghanns (disques intervertébraux, articulaires postérieures, articulations unco-vertébrales et structures ligamentaires).

Rühli et al (83) dans un autre travail sur pièces anatomiques, où les auteurs ont recherché des différences morphologiques osseuses intergénérationnelles en étudiant des sujets nés entre 1772 et 1934, ne retrouvait pas de différence significative des largeurs et hauteurs foraminales selon le sexe.

Nous pouvons citer de nouveau le travail de Knapick DM et al (80) dans lequel les auteurs ne retrouvaient pas de différence significative selon le sexe concernant l'aire foraminale dans une étude analysant les foramens intervertébraux C3C4, C4C5, C5C6 et C6C7 sur 100 pièces osseuses.

Dans une autre étude, déjà citée plus haut, alliant mesures macroscopiques sur cadavres et mesures radiographiques (radiographie et tomodensitométrie) sur sujets sains volontaires et sujets symptomatiques, Ahmed SH et al (81) retrouvaient une diminution significative ($p < 0,01$) de 6% des mesures foraminales (hauteur, largeur, aire), chez les femmes par rapport aux hommes.

Concernant la longueur foraminale nous pouvons de nouveau citer Ruofu et al (72) et leur travail tomodensitométrique sur les pédicules cervicaux. Les auteurs retrouvaient des largeurs pédiculaires significativement inférieures chez les femmes en C3 et en C4, pour les autres étages il existait une tendance à des largeurs moindres.

Ebraheim et al (17) ne retrouvaient pas de différences significatives selon le sexe concernant la longueur de la zone médiale que nous pouvons comparer à la portion pédiculaire que nous étudions.

Nous n'avons pas retrouvé dans la littérature d'étude montrant une corrélation liée au sexe concernant la hauteur du disque intervertébral.

Nous pensons qu'il est donc difficile de statuer sur une réelle corrélation liée au genre des dimensions anatomiques des foramens intervertébraux du rachis cervical car nos données concernent un faible nombre de patients et les résultats de la littérature sont pluriels.

Nous avons également étudié les corrélations entre les différents paramètres (cf graphique dédié dans la partie « résultats »).

Concernant le volume (VF), nous pensons qu'il n'est pas justifié de discuter ses corrélations car ce paramètre a été calculé à partir des mesures et non mesuré. Dès lors sa corrélation avec les autres paramètres était forcément importante.

Les largeurs mesurées étaient corrélées positivement significativement entre elles. Nous pensons que ce résultat est logique car chez les sujets jeunes asymptomatiques étudiés il n'existait aucun signe ostéoarticulaire de dégénérescence arthrosique lors de la lecture des images tomodensitométriques. Ainsi les foramens intervertébraux reflétaient une morphologie harmonieuse se rapprochant de la forme ovoïde qu'on leur confère.

Nous pensons qu'un résultat intéressant de cette analyse concerne le rapport entre la hauteur du disque (HD) et les autres paramètres mesurés. Nous notions en effet qu'il n'existait pas de corrélation entre la valeur de la hauteur discale et la valeur des paramètres relatifs au foramen. Effectivement, le foramen intervertébral se trouvant dans le plan du segment mobile rachidien, nous pourrions imaginer que sa hauteur et ses dimensions suivraient parallèlement celles du disque. Nos résultats indiquent que ce n'est pas le cas. Nous savons que la physiopathologie des sténoses foraminales dégénératives débute par la discarthrose. Ainsi dans le vieillissement, l'altération du disque est directement reliée aux réductions du calibre des foramens. Nous pouvons citer l'étude de Lu, Ebraheim et al (84) dans laquelle les auteurs étudiaient les relations entre la dégénérescence du disque et la taille des foramens par un travail anatomique sur cadavres. Les auteurs retrouvaient une corrélation significative entre la perte de hauteur discale et la réduction de l'aire du foramen. Ainsi ils décrivaient de façon significative une réduction de l'aire du foramen de 20 à 30 % après perte de hauteur discale de 1mm, de 30 à 40 % après une perte de hauteur de 2mm et de 35 à 45 % si la hauteur discale était diminuée de 3mm, ils définissaient alors une sténose sévère dans ce dernier cas.

Pour Sohn et al (69) et leur étude IRM et tomodensitométrique sur cadavres, la dégénérescence discale (perte de hauteur du disque) était significativement corrélée à la diminution de la largeur et de l'aire du foramen intervertébral cervical mais pas à la hauteur foraminale.

Par extrapolation nous pouvons donc penser que le disque intervertébral ne peut au cours de la vie, qu'avoir un effet inducteur des sténoses par son vieillissement. En revanche il ne détermine pas par sa taille native les dimensions foraminales. Cela peut prendre du sens dans un axe de réflexion embryologique (85) car l'ontogénèse du disque intervertébral et des structures osseuses font intervenir des éléments différents : le disque intervertébral est issu majoritairement de la dégénérescence chordale, donc de l'ectoderme (feuillet embryonnaire primitif), les structures osseuses sont issues du mésoderme (autre feuillet embryonnaire primitif).

IV. Étude de la population « névralgique »

L'objectif principal de cette analyse était de comparer les paramètres mesurés entre les sujets avec sténose foraminale significative cliniquement et les foramens « sains » des 2 populations (la population jeune symptomatique à partir de laquelle nous avons cartographié les foramens et la population « névralgique »). Ainsi nous cherchions à savoir quelles étaient les dimensions foraminales atteintes par la dégénérescence arthrosique pour aider le chirurgien dans les chirurgies de décompression foraminale.

Le but de notre travail n'était pas de déterminer les valeurs des dimensions des foramens sténosés car la physiopathologie de la névralgie cervicobrachiale dégénérative combine à la fois les lésions de surcharge arthrosique et les lésions d'hypermobilité. Ainsi nous pouvons logiquement affirmer que par la combinaison de ces différents mécanismes, les patients ne sont pas égaux devant l'expression clinique (présence ou non d'une névralgie cervicobrachiale plus ou moins sévère) d'une sténose foraminale.

D'ailleurs, C. Pallis (86) décrit 75% de signes radiologiques chez des sujets asymptomatiques de plus de 50 ans. De Palma et Rothman (87) décrivent 86% de discarthrose au niveau C5C6 chez des sujets de plus de 70 ans. De Sèze (88) a décrit des images radiologiques de cervicarthrose chez 95% des sujets d'un groupe de personnes âgées de plus de 65 ans, alors même que le taux de symptômes restait très faible dans cette population.

A. Concernant les niveaux étudiés

Nous avons pu comparer les foramens aux niveaux C4C5, C5C6 et C6C7. En effet, dans notre étude nous ne retrouvons pas de patient avec sténose foraminale significative cliniquement au niveau C7T1 et il n'y avait qu'un seul patient avec sténose foraminale significative C3C4, nous ne l'avons donc pas inclus dans l'analyse.

Ceci peut être expliqué par le faible nombre de sujets que nous comptons dans notre travail. Néanmoins, d'après DW Polston (89), les 3 niveaux que nous étudions sont les plus atteints et les plus souvent symptomatiques.

D'après JM Vital (74), lors du vieillissement les lésions de surcharge conduisent à la diminution des dimensions du canal rachidien et du foramen intervertébral par dégénérescence du segment vertébral mobile et touchent principalement le rachis cervical bas (C5C6 et C6C7).

Sur une longue série de névralgies cervicobrachiales dégénératives, F Murphey (90) retrouve la prépondérance des radiculalgies C7 (393 cas) sur les névralgies C6 (171 cas), C8 (50 cas), C5 (26 cas) et T1 (14 cas).

Enfin les travaux de De Palma (87), Boijsen (91) et Friedenber (92), concluent que les phénomènes de dégénérescence arthrosique cervicale touchent principalement le niveau C5C6, puis C6C7 et enfin C4C5.

Notre série, malgré le faible nombre de patients n'est donc pas très éloignée de la réalité et s'accorde avec les données épidémiologiques connues.

B. Comparaison des niveaux C4C5, C5C6 et C6C7

1. Avec la population « asymptotique »

Nos résultats montraient une diminution très significative ($p < 0,001$) du volume foraminaux (VF), de la hauteur discale (HD) et de tous les paramètres relatifs aux foramens intervertébraux excepté la longueur foraminale (LF) en C5C6 et en C6C7, en C4C5 les résultats étaient similaires excepté l'absence de diminution significative de HD et lfbu.

Nous représentons ces différences dans le tableau ci-dessous.

Tableau 23 : diminutions significatives des paramètres étudiés par rapport à la population « asymptotique » selon le niveau cervical

	HD (mm)	HF (mm)	lfPi (mm)	lfsu (mm)	lfbu (mm)	lrPi (mm)	lrsu (mm)	lrbu (mm)	VF (mm ³)
C4C5		0,8	1,6	1,1		1,9	1,1	0,8	80
C5C6	2,5	0,9	3,2	2,7	0,5	3,8	2	1,9	120
C6C7	2,7	1	3,3	2,4	0,6	3,5	2	1,2	172

2. Au sein de la population « névralgique »

En C4C5 il existait une diminution très significative ($p < 0,001$) de VF, HF, lfPi, lfsu, lrbu et de lrPi. Une diminution significative ($p < 0,05$) était également retrouvée pour lrsu et HD. Il n'existait pas de diminution significative de lfbu.

En C5C6 nous retrouvons une diminution très significative ($p < 0,001$) de VF, HD, lfPi, lfsu, lrbu, lrPi et lrsu. Il n'existait pas de diminution significative de HF ni de lfbu.

En C6C7, une diminution très significative ($p < 0,001$) de VF, HD, lfPi, lfsu, lrbu, lrPi et lrsu était retrouvée. Il n'y avait pas non plus de diminution significative de HF, il existait une diminution significative ($p < 0,05$) de lfbu.

Nous représentons ces différences dans le tableau ci-dessous.

Tableau 24 : diminutions significatives des paramètres étudiés au sein de la population « névralgique » selon le niveau cervical

	HD (mm)	HF(mm)	lfPi (mm)	lfsu (mm)	lfbu (mm)	lrPi (mm)	lrsu (mm)	lrbu (mm)	VF (mm3)
C4C5	2,2	1,3	1,2	1,3		3,1	0,9	1,9	51
C5C6	1,2		2,4	2,1		2,4	1,5	1,9	48
C6C7	1,1		3,7	2,9	0,5	2,8	1	1,6	93

Nous avons décidé de ne pas discuter les résultats de l'angulation (AD), en effet ces derniers ne paraissent pas pertinents, certainement par le fait qu'au cours de l'acquisition tomographique les patients sont allongés. Ainsi l'étude d'angles dans ces conditions ne paraît pas logique.

3. Discussion de ces résultats

L'analyse de ces résultats nous apporte plusieurs éléments. Nous resterons évidemment prudents quant à nos conclusions car le nombre total de sujets dans l'étude n'était que de 20. Nous adopterons la même prudence quant au niveau C4C5 car uniquement 4 foramens sténosés significativement étaient analysés.

Même si l'analyse statistique montre un grand nombre de résultats significatifs également en C4C5 l'analyse des résultats pour C5C6 et C6C7 semble plus objective.

Nous retenons comme résultat principal que les mesures diminuées principalement dans les foramens intervertébraux sténosés significativement sont les largeurs en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente (lfPi et lrPi) et celles en regard du haut de l'uncus (lfsu et lrsu). Nous notons qu'en regard du plateau inférieur sus-jacent la réduction de la largeur était légèrement supérieure à celle en regard de l'uncus. Le volume foraminal (VF) était également très réduit.

La discussion de ce résultat est difficile car très peu d'articles comparables à notre étude étaient retrouvés.

Nous pouvons citer de nouveau l'étude anatomique de Tanaka et al (18). Les auteurs étudiaient sur cadavres le trajet des racines nerveuse cervicales dans les foramens

intervertébraux. Ils avaient au préalable, en s'inspirant du travail d'Ebraheim et al (17), défini une portion foraminale semblable à celle que nous étudions. Leurs conclusions affirmaient que les racines étaient sténosées dans cette portion pédiculaire foraminale très majoritairement par les remaniements arthrosiques de la région unco-vertébrale. Ils avaient également identifié les autres éléments comprimant les racines que nous présentons dans le tableau ci-dessous.

Tableau 25 : éléments anatomiques comprimant les racines nerveuses dans le foramen intervertébral cervical selon Tanaka et al (18)

NR	Compression Factors of NR				
	Protruded Discs	Osteophytes of UP	SAP	Ligaments of Flavum	PFT
C5 (n = 36)	1	2	–	1	1
C6 (n = 36)	5	3	1	3	–
C7 (n = 36)	5	3	1	3	1
C8 (n = 36)	–	1	–	–	2

NR = nerve roots; UP = uncinat process; SAP = superior articular process; PFT = periradicular fibrous tissues.

Leurs résultats sont en accord avec nos conclusions. Effectivement les protrusions discales et les ostéophytes unco-vertébraux étaient très majoritaires dans leurs résultats. En comparant à notre travail on note que ces structures compressives correspondent anatomiquement parfaitement avec la diminution de lfPi, lrPi, lfsu et lrsu.

Nous ne retrouvons pas d'ostéophytes compressifs développés aux dépens des articulaires postérieures dans notre étude, les auteurs cités ci-dessus n'en retrouvaient qu'une très faible proportion, cette différence mineure peut s'expliquer par le faible nombre de patients dans notre étude.

Enfin les tissus mous compressifs (ligament jaune et tissus fibreux péri-radicaux) ne pouvaient pas être identifiés par notre analyse tomodensitométrique en fenêtrage osseux.

Il est connu que dans le processus de dégénérescence arthrosique cervical induit par la dégénérescence première du disque (41,51,74,93), les structures mobiles antérieures (articulations unco-vertébrales) sont touchées avant les structures postérieures (articulaires postérieures) (94). Il n'était donc pas étonnant de ne pas retrouver d'ostéophyte des structures postérieures dans notre travail.

Concernant le volume du foramen intervertébral nous n'avons pas retrouvé d'étude permettant de comparer nos résultats.

Nous constatons que ce paramètre était très significativement diminué dans les foramens sténosés que nous avons étudiés, par rapport à la population jeune asymptomatique et également comparé aux patients plus âgés de la cohorte « névralgique ». La critique principale est que ce volume était calculé et non mesuré. Néanmoins VF apparaît comme le paramètre

le plus représentatif du foramen intervertébral cervical qui s'apparente à un tunnel (à la différence des foramens intervertébraux lombaires qui s'apparentent à des orifices). Nos réflexions nous encouragent donc à mesurer, dans des travaux ultérieurs, ce volume et ouvrent la voie à de nombreuses perspectives pertinentes pour une meilleure compréhension anatomique et physiopathologique.

Les principaux enjeux de la chirurgie cervicale antérieure des sténoses foraminales sont : la décompression de la racine et la stabilisation du niveau opéré.

Pour cela les chirurgiens de la colonne vertébrale utilisent des implants intersomatiques ou des greffons osseux autologues visant à fusionner les niveaux (dans le cas de l'arthrodèse).

La taille de l'implant intersomatique, par distraction, peut permettre d'augmenter indirectement la taille du foramen intervertébral. Néanmoins cette procédure a des limites. Yang et al (78) ont étudié l'influence de la taille d'un greffon intersomatique cervical sur les dimensions du foramen intervertébral. Leur travail, réalisé sur 6 segments cadavériques C5C6, a comparé le volume et l'aire du foramen intervertébral après mise en place de greffons de tailles différentes. Les auteurs concluaient à une augmentation des dimensions foraminales (aire et volume) jusqu'à une hauteur de greffon correspondant à 160% de la hauteur normale du disque. Néanmoins, ces mêmes dimensions foraminales diminuaient lorsque la hauteur du greffon était supérieure (190% de la hauteur normale du disque dans leur étude). Les auteurs expliquaient ce phénomène par une augmentation plus importante de la colonne antérieure que de la colonne postérieure à partir d'une certaine hauteur intersomatique, cela en raison de la tension des structures postérieures (capsules articulaires, ligament jaune, ligament longitudinal postérieur).

Ainsi nous comprenons que la décompression foraminale indirecte a ses limites, de plus il ne paraît pas logique de laisser en place les ostéophytes compressifs accessible à un geste de décompression.

La décompression foraminale apparaît donc indispensable lors de ces chirurgies par voie antérieure, et son association à un implant intersomatique de taille convenable semble être la meilleure procédure.

Selon nos résultats, la décompression foraminale doit associer un geste visant à régulariser les ostéophytes développés aux dépens de l'uncus et un geste décompressant le foramen en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente.

Figure 35 : gestes de décompression à la partie supérieure du foramen intervertébral cervical, en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente

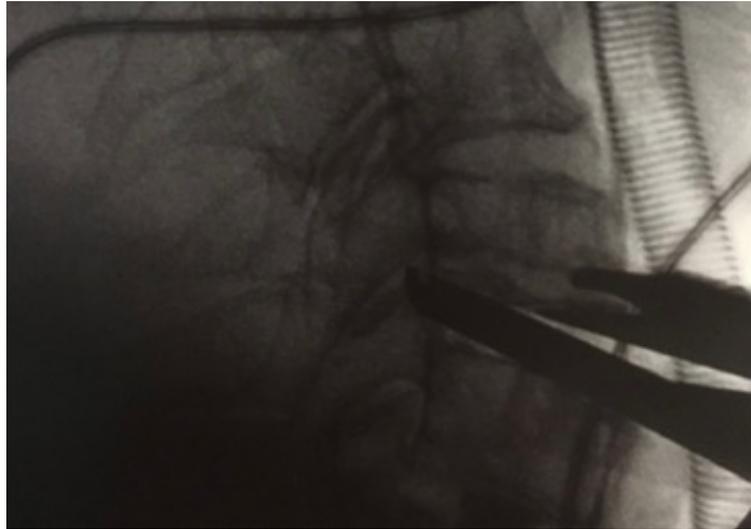
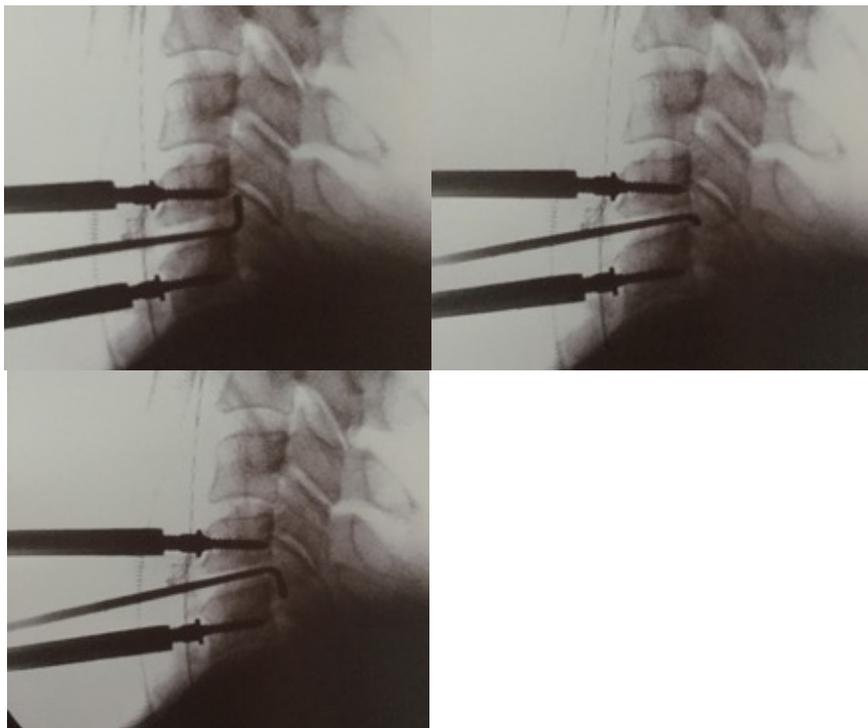


Figure 36 : vérification palpatoire peropératoire de la décompression du foramen intervertébral cervical à sa partie supérieure, moyenne et inférieure



CONCLUSION

Ce travail nous a donc permis d'affiner nos connaissances concernant l'anatomie normale et pathologique du rachis cervical inférieur.

A notre connaissance, il n'existait pas dans la littérature d'étude analysant avec précision l'anatomie osseuse du foramen intervertébral.

Aux vues de la fréquence des névralgies cervicobrachiales communes d'origine dégénérative (« hernies dures »), il paraissait donc important de décrire précisément l'ostéologie tomodensitométrique de la portion pédiculaire du foramen intervertébral. Le scanner étant un élément clef dans le diagnostic des sténoses foraminales dégénératives, l'utilisation de cet outil nous paraissait plus justifié qu'un travail sur cadavres et permettait une étude in vivo.

Ce travail nous a permis de décrire différentes mesures, reproductibles, et ainsi de cartographier le canal de conjugaison intervertébral.

Un des aspects originaux de notre étude était le calcul du volume du foramen intervertébral, paramètre retrouvé étudié dans un seul article à notre connaissance.

La comparaison des dimensions « normales » du foramen intervertébral avec celles des foramens sténosés significativement nous a permis de mieux comprendre les phénomènes de dégénérescence arthrosique de cette région anatomique.

Ainsi, nos analyses retrouvaient 5 paramètres particulièrement diminués significativement dans les sténoses foraminales dégénératives : lfPi, lrPi, lfsu, lrsu et VF.

L'extrapolation pratique de ces résultats nous encourage à penser que le volume foraminal est un paramètre primordial et certainement le plus représentatif des sténoses ostéophytiques. Effectivement, le foramen intervertébral cervical étant un véritable « tunnel », à la différence de ses homologues thoraciques et lombaires (qui sont des orifices), un volume semble être le paramètre le plus pertinent pour son analyse.

Nous souhaitons poursuivre par un travail volumique plus aboutit, avec une étude des volumes mesurés (et non calculés comme ici). Cette perspective ouvre le champ d'analyse à de nombreux sujets dont des études pré et post opératoires notamment (avec corrélations cliniques).

Nos résultats aident donc à la compréhension des sténoses foraminales, et peuvent également guider le chirurgien dans sa pratique. Effectivement, il apparaît important lors des décompressions foraminales cervicales de ne pas se contenter uniquement de la décompression en regard des uncus et de la décompression indirecte par la hauteur de l'implant intersomatique (qui a des limites comme nous l'avons vu dans la discussion), mais de décompresser également le foramen dans sa portion supérieure, en regard du plateau inférieur de la vertèbre sus-jacente car cette zone voit son calibre réduit très significativement par l'ostéophytose dégénérative.

ANNEXES

Tableau statistique, tests de Pearson (p-values) des corrélations entre facteurs

	HD	AD	HF	IfPi	lfSu	lfbu	lrPi	lrSu	lrbu	LF	VF
HD	0	0,017676636	0,639051348	0,398982876	0,350269071	0,217828119	0,330158909	0,2581753	0,585867627	0,195128566	0,859382579
AD	0,017676636	0	0,606983749	0,338741483	0,252072554	0,900949865	0,372778187	0,328821142	0,226287677	0,004180315	0,032875413
HF	0,639051348	0,606983749	0	0,04546974	0,29233096	0,563524632	0,279389957	0,413954637	0,777379679	0,528821006	0,044369729
IfPi	0,398982876	0,338741483	0,04546974	0	0,000223532	0,016571451	1,53E-05	0,003913316	0,102916858	0,1446321	0,000712048
lfSu	0,350269071	0,252072554	0,29233096	0,000223532	0	0,007986861	5,53E-05	0,000100219	0,005002852	0,173007764	0,006008462
lfbu	0,217828119	0,900949865	0,563524632	0,016571451	0,007986861	0	0,003560646	0,010724302	0,027940879	0,920756009	0,255500406
lrPi	0,330158909	0,372778187	0,279389957	1,53E-05	5,53E-05	0,003560646	0	0,000318675	0,016776842	0,188855276	0,006713109
lrSu	0,2581753	0,328821142	0,413954637	0,003913316	0,000100219	0,010724302	0,000318675	0	0,001310985	0,399886933	0,046497489
lrbu	0,585867627	0,226287677	0,777379679	0,102916858	0,005002852	0,027940879	0,016776842	0,001310985	0	0,485906988	0,241754989
LF	0,195128566	0,004180315	0,528821006	0,1446321	0,173007764	0,920756009	0,188855276	0,399886933	0,485906988	0	0,001748324
VF	0,859382579	0,032875413	0,044369729	0,000712048	0,006008462	0,255500406	0,006713109	0,046497489	0,241754989	0,001748324	0

Tableau statistique, tests de Pearson (valeurs des corrélations positives et négatives) des corrélations entre facteurs

	HD	AD	HF	IfPi	lfSu	lfbu	lrPi	lrSu	lrbu	LF	VF
HD	1	-0,505331591	-0,052527999	-0,057676049	-0,130744044	-0,084913172	-0,079510273	-0,192107455	-0,044840331	0,262515205	0,084257986
AD	-0,505331591	1	-0,088134462	-0,094261332	-0,181500499	0,00508573	-0,072740211	-0,210520825	-0,256326593	-0,470827673	-0,354874538
HF	-0,052527999	-0,088134462	1	0,527295841	0,28666937	0,199046255	0,295766593	0,246129335	-0,028463801	0,104781525	0,581947249
IfPi	-0,057676049	-0,094261332	0,527295841	1	0,742238029	0,573845547	0,85706102	0,593195328	0,369448122	0,394779557	0,801893795
lfSu	-0,130744044	-0,181500499	0,28666937	0,742238029	1	0,570389542	0,703375723	0,690626933	0,588495834	0,369650458	0,702916274
lfbu	-0,084913172	0,00508573	0,199046255	0,573845547	0,570389542	1	0,647895131	0,479144535	0,45134146	0,01368038	0,390671221
lrPi	-0,079510273	-0,072740211	0,295766593	0,85706102	0,703375723	0,647895131	1	0,691146547	0,517531136	0,409171383	0,701680412
lrSu	-0,192107455	-0,210520825	0,246129335	0,593195328	0,690626933	0,479144535	0,691146547	1	0,619944314	0,211263847	0,500048182
lrbu	-0,044840331	-0,256326593	-0,028463801	0,369448122	0,588495834	0,45134146	0,517531136	0,619944314	1	0,184631171	0,302250682
LF	0,262515205	-0,470827673	0,104781525	0,394779557	0,369650458	0,01368038	0,409171383	0,211263847	0,184631171	1	0,784379151
VF	0,084257986	-0,354874538	0,581947249	0,801893795	0,702916274	0,390671221	0,701680412	0,500048182	0,302250682	0,784379151	1

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C4C5 des paramètres tomodensitométriques liés aux foramens intervertébraux entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HF	0.00727070203277814	0.0721891152769237	Welch	0.00147378101443413	0.757
IfPi	0.160207688327333	0.2228309253075	Wilcoxon	0.000209519148693827	1.6
lfSu	0.0425536669221905	0.176070905847071	Welch	0.000102579389466631	1.0715
lfbu	0.175479694950063	0.111474635591029	Wilcoxon	0.329836481925867	0.185
lrPi	0.000103952774231029	6.02481590695448e-05	Student	2.52664827383352e-05	1.936
lrSu	0.0473195283656746	0.220437088252783	Welch	1.59935329656707e-05	1.1035
lrbu	0.0273263698593857	0.00358963278296037	Student	0.00504398536425362	0.7965
LF	0.00498084544885279	0.008767804887019	Student	0.336824570038896	-0.2261124999999

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C4C5 des paramètres tomodensitométriques liés au disque intervertébral entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HD	0.0248647689750475	0.19423189619654	Welch	0.141656356001398	2.46
AD	0.0849067316321722	0.0154980078147965	Wilcoxon	1	-0.9

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C5C6 des paramètres tomodensitométriques liés aux foramens intervertébraux entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HF	0.157320973744505	0.186500384878972	Wilcoxon	0.00682243186690814	0.903
lfPi	0.0253625138481249	0.0188897398025214	Student	3.55146975184264e-09	3.248
lfsu	0.00143337134491227	0.01625350366907	Student	1.33689556636429e-09	2.7195
lfbu	0.00685418350344134	5.12294567478323e-05	Student	0.00426630452694599	0.498
lrPi	0.00107546472772687	1.53912703814267e-05	Student	1.36155108181514e-10	3.8195
lrsu	0.00508744564551532	0.00676777562386674	Student	2.96129254049101e-09	1.9925
lrbu	0.000193731130388886	7.19873717264048e-06	Student	4.19329972130075e-07	1.961
LF	3.34812305880958e-05	1.98550019736565e-05	Student	0.104069421615855	-0.214975

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C5C6 des paramètres tomodensitométriques liés au disque intervertébral entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HD	0.0393373723750433	0.84851775779761	Welch	6.50382803577994e-08	2.47171428571429
AD	0.515637350739412	0.784443385252877	Wilcoxon	0.15552432441991	- 2.79642857142857

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C6C7 des paramètres tomodensitométriques liés aux foramens intervertébraux entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HF	0.121084538601476	0.166490798203508	Wilcoxon	0.000372852103374432	1.018
lfPi	0.000212695878389674	4.16608469735889e-06	Student	1.9298114633358e-07	3.2925
lfsu	0.000737128613473927	0.000977871738837999	Student	3.9506803662485e-07	2.4035
lfbu	0.0232471039292281	0.0725493905906792	Welch	0.0013412760329918	0.5605
lrPi	0.0005297618018437	6.45998940425512e-07	Student	3.77671828932219e-09	3.465
lrsu	0.0356159870184686	0.0406516611188949	Student	3.1027270437099e-10	2.0095
lrbu	0.00018933996394527	9.72195601172023e-06	Student	5.32627256208394e-05	1.172
LF	0.00693796387047926	7.92593535003938e-06	Student	0.700475691494422	0.048700000002

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C6C7 des paramètres tomodensitométriques liés au disque intervertébral entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HD	0.027149328465876	0.200043629154562	Welch	3.58067149010207e-05	2.677
AD	0.132139007718244	0.669443860921461	Welch	0.00766556112402914	-6.79166666666667

Tableau statistique de l'analyse comparative des volumes des foramens intervertébraux aux étages C4C5, C5C6 et C6C7 entre les patients au statut « foramen sténosé » de la « population névralgique » et les patients de la « population asymptomatique »

NIVEAU	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
C4C5	0.470318841015791	0.214180468018077	Test de Welch	1.28597945648384e-05	79.75415
C5C6	0.0811392297027341	0.0648906654215522	Test de Welch	2.40691730492558e-11	119.74375
C6C7	3.67692499078813e-05	0.0215786286014381	Test student	1.64166430281414e-17	171.559735714286

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C4C5 des paramètres tomodensitométriques liés aux foramens intervertébraux entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HF	0.0819461233849904	0.04847299511278	Wilcoxon	0.0028840572260222	1.32125
IfPi	0.138610225697822	0.98998458144351	Wilcoxon	0.0332996235428677	1.225625
Ifsu	0.0400594245947575	0.71654299048282	Welch	0.00713504086055	1.34
Ifbu	0.192026525001986	0.30314888243167	Wilcoxon	0.776345689809678	-0.05125
IrPi	0.0157170844267597	0.99321279364494	Welch	0.001537101271812	3.0975
Irsu	0.0373852221700623	0.66734991392016	Wilcoxon	0.0419663021599847	0.92625
Irbu	0.440530682851281	0.49571887532617	Welch	0.000279552713864	1.94
LF	5.76342950544288e-06	0.18112902482975	Welch	0.752651857059281	0.026671874999

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C4C5 des paramètres tomodensitométriques liés au disque intervertébral entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique »

Variables	p-value test de Shapiro	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HD	0.753737403435113	Wilcoxon	0.0444444444444444	2.155
AD	0.50405496438561	Wilcoxon	1	-0.46875

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C5C6 des paramètres tomodensitométriques liés aux foramens intervertébraux entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HF	0.0640134742270408	0.535390945691753	Wilcoxon	0.449521325767026	-0.4149999999
lfPi	0.705968434911007	0.573111446689054	Wilcoxon	4.33003528978761e-05	2.425
lfsu	0.286344687403956	0.86974963850355	Wilcoxon	0.000181651146091465	2.095
lfbu	0.973855541952943	0.0560982241786176	Wilcoxon	0.352681374353201	0.218
lrPi	0.786069152642197	0.965284229344439	Wilcoxon	1.0825088224469e-05	2.394
lrsu	0.377838021864503	0.9702368386134	Wilcoxon	4.33003528978761e-05	1.528
lrbu	0.0259835220327537	0.00959127897133372	Welch	5.02206012079016e-05	1.926
LF	0.0268210046246731	0.133124168359175	Welch	0.0593381382426981	-0.155625

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C5C6 des paramètres tomodensitométriques liés au disque intervertébral entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique »

Variables	p-value test de Shapiro	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HD	0.312301370388626	Wilcoxon	0.000666666666667	1.17238095238095
AD	0.17622845942995	Wilcoxon	0.3035889878769	-4.9047619047619

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C6C7 des paramètres tomodensitométriques liés aux foramens intervertébraux entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique »

Variables	p-value test de Shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HF	0.3585791254051	0.666008129657076	Wilcoxon	0.873838646479162	- 0.0350549450549451
lfPi	0.00403846905636352	0.423313787590978	Welch	6.59380862417903e-07	3.67956043956044
lfsu	0.00147601242810063	0.840320896916561	Welch	1.80614773912053e-09	2.85813186813187
lfbu	0.813917217802893	0.148927823117695	Wilcoxon	0.0408159961748657	0.532417582417582
lrPi	0.200848877127944	0.316212177750196	Wilcoxon	0.000353384689648718	2.83164835164835
lrsu	0.385380462784041	0.493890841168978	Wilcoxon	0.00072718291849209	1.02956043956044
lrbu	0.0789037709485319	0.199647327413964	Welch	0.00020289373840797	1.60945054945055
LF	0.00788767522048293	0.560421623987202	Welch	0.647526027004274	- 0.0354917582417578

Tableau statistique de l'analyse comparative au niveau C6C7 des paramètres tomodensitométriques liés au disque intervertébral entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique »

Variabes	p-value test de Shapiro	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
HD	0.531189899698784	Wilcoxon	0.0006452189485	1.1025
AD	0.617598364108688	Wilcoxon	0.000403241300489	-6.79166666666667

Tableau statistique de l'analyse comparative des volumes des foramens intervertébraux aux étages C4C5, C5C6 et C6C7 entre les patients au statut « foramen sténosé » et ceux au statut « foramen sain » de la « population névralgique »

NIVEAU	p-value test de shapiro	p-value F-test	Test à réaliser	Valeur du test	Différence
C4C5	0.0477844617966331	0.17216161519912	Test de Welch	0.000649544490679188	51.0759375
C5C6	0.517147784767996	0.593620043237712	Test de Wilcoxon	2.16501764489381e-05	48.0768
C6C7	0.0399312665472391	0.0607039356357615	Test student	1.37966932199099e-09	92.9266703296703

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Delmas A. Types rachidiens de statique corporelle. *Revue de morphophysiologie humaine* 1951;27-32.
2. Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, Dimnet J. Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. *Spine*. 1 févr 2005;30(3):346-53.
3. Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, Marty C. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. 1998;7(2):99-103.
4. Louis R. Spinal stability as defined by the three-column spine concept. *Anat Clin*. 1985;7(1):33-42.
5. Louis R. Unstable fractures of the spine. III. Instability. A. Theories concerning instability. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*. août 1977;63(5):423-5.
6. Junghanns H. 1933. Die anatomischen Besonderheiten des fünften Lendenwirbels und der letzten Lendenbandscheibe. *Arch Orthop Unfallchir* 33:260–278.
7. Vital JM, Sénégas J, Lavignolle B. Anatomie descriptive et fonctionnelle de la colonne vertébrale. Éditions Bergeret. 2013: p3.
8. Oh SH, Perin NI, Cooper PR. Quantitative three-dimensional anatomy of the subaxial cervical spine: implication for anterior spinal surgery. *Neurosurgery*. juin 1996;38(6):1139-44.
9. Dong Y, Hong MX, Jianyi L, Lin MY. Quantitative anatomy of the lateral mass of the atlas. *Spine*. 1 mai 2003;28(9):860-3.
10. Vital JM. Anatomie de la colonne vertébrale : nouveaux concepts. Chap 16 : les ligaments rachidiens. Sauramps Medical. 2016. p313-334.
11. Panjabi MM, Duranceau J, Goel V, Oxland T, Takata K. Cervical human vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy of the middle and lower regions. *Spine*. août 1991;16(8):861-9.
12. Vital JM. Anatomie fonctionnelle du rachis cervical : actualités. *Rev Fr Dommage Corp*. 2001;27(3):187-197.
13. Wackenheimer A. Roentgen diagnosis of the cranio vertebral region. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1994.
14. Pavlov H, Torg JS, Robie B, Jahre C. Cervical spinal stenosis: determination with vertebral body ratio method. *Radiology*. sept 1987;164(3):771-5.
15. Lee BC, Kazam E, Newman AD. Computed tomography of the spine and spinal cord. *Radiology*. juill 1978;128(1):95-102.
16. De Peretti F, Hovorka I, Ganansia P, Puch JM, Bourgeon A, Argenson C. The vertebral foramen: a report concerning its contents. *Surg Radiol Anat SRA*. 1993;15(4):287-94.
17. Ebraheim NA, An HS, Xu R, Ahmad M, Yeasting RA. The quantitative anatomy of the cervical nerve root groove and the intervertebral foramen. *Spine*. 15 juill 1996;21(14):1619-23.
18. Tanaka N, Fujimoto Y, An HS, Ikuta Y, Yasuda M. The anatomic relation among the nerve roots, intervertebral foramina, and intervertebral discs of the cervical spine. *Spine*. 1 févr 2000;25(3):286-91.

19. Rabischong P. Anatomie fonctionnelle du rachis et de la moelle. In : Manelfe C. Imagerie du rachis et de la moelle. Vigot, Paris. 1989: p109-34.
20. 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*. sept 2012;93(9):690-7.
21. Lazorthes G. Le système nerveux périphérique. Masson, Paris. 1971: p223-48.
22. Pech P, Daniels DL, Williams AL, Haughton VM. The cervical neural foramina: correlation of microtomy and CT anatomy. *Radiology*. avr 1985;155(1):143-6.
23. 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*. 15 déc 2004;29(24):2821-5.
24. Ebraheim NA, Liu J, Shafiq Q, Lu J, Pataparla S, Yeasting RA, et al. Quantitative analysis of changes in cervical intervertebral foramen size with vertebral translation. *Spine*. 1 févr 2006;31(3):62-65.
25. Louis R. Chirurgie du rachis. Anatomie chirurgicale et voies d'abord. Springer Verlag, Heidelberg 1982.
26. Kraan GA, Smit TH, Hoogland PVJM. Extraforaminal ligaments of the cervical spinal nerves in humans. *Spine J Off J North Am Spine Soc*. déc 2011;11(12):1128-34.
27. Gilbert KK, Brismée J-M, Collins DL, James CR, Shah RV, Sawyer SF, et al. 2006 Young Investigator Award Winner: lumbosacral nerve root displacement and strain: part 1. A novel measurement technique during straight leg raise in unembalmed cadavers. *Spine*. 15 juin 2007;32(14):1513-20.
28. Grimes PF, Massie JB, Garfin SR. Anatomic and biomechanical analysis of the lower lumbar foraminal ligaments. *Spine*. 15 août 2000;25(16):2009-14.
29. Lohman CM, Gilbert KK, Sobczak S, Brismée J-M, James CR, Day M, et al. 2015 Young Investigator Award Winner: Cervical Nerve Root Displacement and Strain During Upper Limb Neural Tension Testing: Part 2: Role of Foraminal Ligaments in the Cervical Spine. *Spine*. 1 juin 2015;40(11):801-8.
30. Kleinrensink GJ, Stoeckart R, Mulder PG, Hoek G, Broek T, Vleeming A, et al. Upper limb tension tests as tools in the diagnosis of nerve and plexus lesions. Anatomical and biomechanical aspects. *Clin Biomech Bristol Avon*. janv 2000;15(1):9-14.
31. Brismée J-M, Sizer PS, Dedrick GS, Sawyer BG, Smith MP. Immunohistochemical and histological study of human uncovertebral joints: a preliminary investigation. *Spine*. 20 mai 2009;34(12):1257-63.
32. Silberstein CE. The evolution of degenerative changes in the cervical spine and an investigation into the « joints of Iuschka ». *Clin Orthop*. juin 1965;40:184-204.
33. Browne KM. The anatomy, spatial relationships, and role of uncovertebral articulations as the source of posterolateral cervical cartilage sequestrations. *J Neurosurg Spine*. mars 2010;12(3):270-4.
34. Hartman J. Anatomy and clinical significance of the uncinat process and uncovertebral joint: A comprehensive review. *Clin Anat N Y N*. avr 2014;27(3):431-40.
35. MacNab I, McCulloch J. Neck ache and shoulder pain. Williams and Wilkins, Baltimore. 1994.
36. Hirsch C, Schajowicz R, Galante J. Structural changes in the cervical spine. A study on autopsy specimens in different age groups. *Acta Orthop Scand*. 1967;Suppl 109:7-77.
37. Mercer S, Bogduk N. The ligaments and annulus fibrosus of human adult cervical intervertebral discs. *Spine*. 1 avr 1999;24(7):619-26; discussion 627-628.

38. Milne N. The role of zygapophysial joint orientation and uncinata processes in controlling motion in the cervical spine. *J Anat.* oct 1991;178:189-201.
39. Kotani Y, McNulty PS, Abumi K, Cunningham BW, Kaneda K, McAfee PC. The role of anteromedial foraminotomy and the uncovertebral joints in the stability of the cervical spine. A biomechanical study. *Spine.* 15 juill 1998;23(14):1559-65.
40. Snyder JT, Tzermiadianos MN, Ghanayem AJ, Voronov LI, Rinella A, Dooris A, et al. Effect of uncovertebral joint excision on the motion response of the cervical spine after total disc replacement. *Spine.* 15 déc 2007;32(26):2965-9.
41. Wong JJ, Côté P, Quesnele JJ, Stern PJ, Mior SA. The course and prognostic factors of symptomatic cervical disc herniation with radiculopathy: a systematic review of the literature. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* 1 août 2014;14(8):1781-9.
42. Abbed KM, Coumans J-VCE. Cervical radiculopathy: pathophysiology, presentation, and clinical evaluation. *Neurosurgery.* janv 2007;60(1 Supp1 1):S28-34.
43. Radhakrishnan K, Litchy WJ, O'Fallon WM, Kurland LT. Epidemiology of cervical radiculopathy. A population-based study from Rochester, Minnesota, 1976 through 1990. *Brain J Neurol.* avr 1994;117 (Pt 2):325-35.
44. Takamiya Y, Nagata K, Fukuda K, Shibata A, Ishitake T, Suenaga T. Cervical spine disorders in farm workers requiring neck extension actions. *J Orthop Sci Off J Jpn Orthop Assoc.* mai 2006;11(3):235-40.
45. Tsirikos A, Papagelopoulos PJ, Giannakopoulos PN, Boscainos PJ, Zoubos AB, Kassetta M, et al. Degenerative spondyloarthropathy of the cervical and lumbar spine in jockeys. *Orthopedics.* juin 2001;24(6):561-4.
46. Hagberg M, Wegman DH. Prevalence rates and odds ratios of shoulder-neck diseases in different occupational groups. *Br J Ind Med.* sept 1987;44(9):602-10.
47. Battié MC, Videman T, Parent E. Lumbar disc degeneration: epidemiology and genetic influences. *Spine.* 1 déc 2004;29(23):2679-90.
48. Roh JS, Teng AL, Yoo JU, Davis J, Furey C, Bohlman HH. Degenerative disorders of the lumbar and cervical spine. *Orthop Clin North Am.* juill 2005;36(3):255-62.
49. Taylor TK, Melrose J, Burkhardt D, Ghosh P, Claes LE, Kettler A, et al. Spinal biomechanics and aging are major determinants of the proteoglycan metabolism of intervertebral disc cells. *Spine.* 1 déc 2000;25(23):3014-20.
50. Oda J, Tanaka H, Tsuzuki N. Intervertebral disc changes with aging of human cervical vertebra. From the neonate to the eighties. *Spine.* nov 1988;13(11):1205-11.
51. Singh K, Masuda K, Thonar EJ-MA, An HS, Cs-Szabo G. Age-related changes in the extracellular matrix of nucleus pulposus and anulus fibrosus of human intervertebral disc. *Spine.* 1 janv 2009;34(1):10-6.
52. Carette S, Fehlings MG. Clinical practice. Cervical radiculopathy. *N Engl J Med.* 28 juill 2005;353(4):392-9.
53. White AA, Panjabi MM. Biomechanical considerations in the surgical management of cervical spondylotic myelopathy. *Spine.* juill 1988;13(7):856-60.
54. Benzel EC. Biomechanics of spine stabilization. Rolling Meadows, IL: American Association of Neurological Surgeons Publications. 2001.
55. Mao H, Driscoll SJ, Li J-S, Li G, Wood KB, Cha TD. Dimensional changes of the neuroforamina in subaxial cervical spine during in vivo dynamic flexion-extension. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* 2016;16(4):540-6.

56. Chang V, Basheer A, Baumer T, Oravec D, McDonald CP, Bey MJ, et al. Dynamic measurements of cervical neural foramina during neck movements in asymptomatic young volunteers. *Surg Radiol Anat SRA*. oct 2017;39(10):1069-78.
57. Chakravorty BG. Arterial supply of the cervical spinal cord (with special reference to the radicular arteries). *Anat Rec*. juill 1971;170(3):311-29.
58. Yu W-R, Baptiste DC, Liu T, Odrobina E, Stanisz GJ, Fehlings MG. Molecular mechanisms of spinal cord dysfunction and cell death in the spinal hyperostotic mouse: implications for the pathophysiology of human cervical spondylotic myelopathy. *Neurobiol Dis*. févr 2009;33(2):149-63.
59. Wolak M. Facilitating estimation of the Intraclass Correlation Coefficient. *ICC Package*. 2015; 1-9.
60. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 1977; 33:159-74.
61. Argentieri EC, Koff MF, Breighner RE, Endo Y, Shah PH, Sneag DB. Diagnostic Accuracy of Zero-Echo Time MRI for the Evaluation of Cervical Neural Foraminal Stenosis. *Spine*. 01 2018;43(13):928-33.
62. Shim JH, Park CK, Lee JH, Choi JW, Lee DC, Kim DH, et al. A comparison of angled sagittal MRI and conventional MRI in the diagnosis of herniated disc and stenosis in the cervical foramen. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. août 2009;18(8):1109-16.
63. Cinotti G, De Santis P, Nofroni I, Postacchini F. Stenosis of lumbar intervertebral foramen: anatomic study on predisposing factors. *Spine*. 1 févr 2002;27(3):223-9.
64. Rühli FJ, Müntener M, Henneberg M. Human osseous intervertebral foramen width. *Am J Phys Anthropol*. févr 2006;129(2):177-88.
65. Freedman BA, Hoffler CE, Cameron BM, Rhee JM, Bawa M, Malone DG, Bent M, Yoon TS. A comparison of computed tomography measures for diagnosing cervical spinal stenosis associated with myelopathy: a case-control study. *Asian Spine J*. 2015 Feb;9(1):22-9.
66. Najji P, Alsufyani NA, Lagravère MO. Reliability of anatomic structures as landmarks in three-dimensional cephalometric analysis using CBCT. *Angle Orthod*. 2014 Sep;84(5):762-72.
67. Park JY, Hwang JT, Oh KS, Kim SJ, Kim NR, Cha MJ. Revisit to scapular dyskinesis: three-dimensional wing computed tomography in prone position. *J Shoulder Elbow Surg*. 2014 Jun;23(6):821-8.
68. Czervionke LF, Daniels DL, Ho PS, Yu SW, Pech P, Strandt J, et al. Cervical neural foramina: correlative anatomic and MR imaging study. *Radiology*. déc 1988;169(3):753-9.
69. Sohn HM, You JW, Lee JY. The relationship between disc degeneration and morphologic changes in the intervertebral foramen of the cervical spine: a cadaveric MRI and CT study. *J Korean Med Sci*. févr 2004;19(1):101-6.
70. Panjabi MM, Takata K, Goel V, Federico D, Oxland T, Duranceau J, et al. Thoracic human vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy. *Spine*. août 1991;16(8):888-901.
71. Panjabi MM, Goel V, Oxland T, Takata K, Duranceau J, Krag M, et al. Human lumbar vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy. *Spine*. mars 1992;17(3):299-306.

72. Ruofu Z, Huilin Y, Xiaoyun H, Xishun H, Tiansi T, Liang C, et al. CT evaluation of cervical pedicle in a Chinese population for surgical application of transpedicular screw placement. *Surg Radiol Anat SRA*. juill 2008;30(5):389-96.
73. Liu J, Napolitano JT, Ebraheim NA. Systematic review of cervical pedicle dimensions and projections. *Spine*. 15 nov 2010;35(24):E1373-1380.
74. Vital JM, Lavignolle B, Pointillart V, Gille O, De Sèze M. Cervicalgie commune et névralgies cervicobrachiales. *EMC-Rhumatologie-Orthopédie*. May 2004 ;1(3):196-217.
75. Moore KL, Dalley A, Beauthier J. Anatomie médicale, aspects fondamentaux et applications cliniques. De Boeck ed, 2001.
76. Gilad I, Nissan M. A study of vertebra and disc geometric relations of the human cervical and lumbar spine. *Spine*. mar 1986;11(2):154-7.
77. Kapandji IA. Le rachis cervical. Dans : Kapandji IA. *Physiologie articulaire 5e édition, Tome 3 Tronc et rachis*. Paris, Maloine ed, 1994.
78. Yang R, Ma M, Huang L, Ye J, Tang Y, Wang P, et al. Influences of different lower cervical bone graft heights on the size of the intervertebral foramen: multiple planar dynamic measurements with laser scanning. *Lasers Med Sci*. avr 2018;33(3):627-35.
79. Lentell G, Kruse M, Chock B, Wilson K, Iwamoto M, Martin R. Dimensions of the cervical neural foramina in resting and retracted positions using magnetic resonance imaging. *J Orthop Sports Phys Ther*. août 2002;32(8):380-90.
80. Knapik DM, Abola MV, Gordon ZL, Seiler JG, Marcus RE, Liu RW. Differences in Cross-Sectional Intervertebral Foraminal Area From C3 to C7. *Glob Spine J*. sept 2018;8(6):600-6.
81. Ahmed SH, El-Shaarawy E a. A, Ishaq MF, Moniem MHA. Morphological and radiometrical study of the human intervertebral foramina of the cervical spine. *Folia Morphol*. févr 2014;73(1):7-18.
82. Ezra D, Masharawi Y, Salame K, Slon V, Alperovitch-Najenson D, Hershkovitz I. Demographic aspects in cervical vertebral bodies' size and shape (C3-C7): a skeletal study. *Spine J Off J North Am Spine Soc*. 2017;17(1):135-42.
83. Rühli FJ, Henneberg M. Clinical perspectives on secular trends of intervertebral foramen diameters in an industrialized European society. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. déc 2004;13(8):733-9.
84. Lu J, Ebraheim NA, Huntoon M, Haman SP. Cervical intervertebral disc space narrowing and size of intervertebral foramina. *Clin Orthop*. janv 2000;(370):259-64.
85. Vital JM. Anatomie de la colonne vertébrale : nouveaux concepts. Chapitre 2 : embryologie du rachis (S. Pesenti, N. Philip, G. Bollini) ; Chapitre 3 : le rachis en croissance (A. Diméglio, F. Bonnel, F. Canavese). Sauramps Medical. 2016. p41-84.
86. Pallis C, Jones AM, Spillane JD. Cervical spondylosis; incidence and implications. *Brain J Neurol*. 1954;77(2):274-89.
87. De Palma AF, Rothman RH. *The intervertebral disc*. Philadelphia: WB Saunders, 1970.
88. De Sèze S. Les accidents de détérioration structurale du disque. *Semaine Hôp*, 1955, 31 : 1-24.
89. Polston DW. Cervical radiculopathy. *Neurol Clin*. mai 2007;25(2):373-85.
90. Murphey F, Simmons JC, Brunson B. Chapter 2. Ruptured cervical discs, 1939 to 1972. *Clin Neurosurg*. 1973;20:9-17
91. Boijesen E. The cervical spinal canal in intraspinal expansive processes. *Acta Radiol*. août 1954;42(2):101-15.

92. Friedenberɡ ZB, Miller WT. Degenerative disc disease of the cervical spine: a comparative study of asymptomatic and symptomatic patients. *J Bone Joint Surg Am.* sept 1963;45:1171-8.
93. Holt S, Yates PO. Cervical spondylosis and nerve root lesions. Incidence at routine necropsy. *J Bone Joint Surg Br.* août 1966;48(3):407-23.
94. Master DL, Toy JO, Eubanks JD, Ahn NU. Cervical endplate and facet arthrosis: an anatomic study of cadaveric specimens. *J Spinal Disord Tech.* oct 2012;25(7):379-82.

SERMENT D'HIPPOCRATE

Au moment d'être admis 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 patients 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 dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu 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 et méprisé si j'y manque.

ABSTRACT

Introduction

Common cervicobrachial neuralgia is a frequent disease that brings the surgeon to follow patients and operate them when medical conservative treatment results are in failure or in signs of neurological severity. The two main etiologies are soft disc herniation and more frequently the degenerative foraminal stenosis. The CT scan is an essential exam for the diagnosis and evaluation of foraminal stenosis, it is the most efficient for the analysis of the bone structure and the osseous part of roots compression.

To our knowledge, the bone tomography anatomy of the cervical intervertebral foramen has not been studied with precision.

The objectives of this study were to determine, through a protocol of measurements, the bone dimensions of the cervical intervertebral foramen of the lower cervical spine in a young and asymptomatic population, and to identify, by comparison with a neuralgic population, what were the most affected measurement by the cervical spondylotic disease.

Material and methods:

We conducted a descriptive retrospective study of two populations: an asymptomatic population who was less than 30 years old with a cervical spine CT scan in an extra-spinal indication and a population with a clinically significant degenerative foraminal stenosis who had a CT scan during the pre-operative assessment.

We determined a method allowing the realization of different tomography measurements (foraminal height (HF), foraminal length (LF), foraminal width opposite to the inferior cervical endplate (lfPi), foraminal width opposite to the top of the uncus (lfsu), foraminal width opposite to the base of the uncus (lfbu), these last 3 widths were also measured at the medial entrance of the foramen in the recess (lrPi, lrsu and lrbu), disc height (HD) and local angulation (AD)) in all cervical intervertebral foramen of the lower cervical spine (C3C4 to C7T1).

We also calculated the volume of the pedicle portion of the studied foramens (VF). Our statistical analysis determined averages and standards deviations of the foraminal dimensions measurements and volume in the asymptomatic population according to the cervical levels. We also studied the possible correlations according to the sex, the morphological parameters and between the studied factors. Intrarater and interrater reliability of our measurements was analyzed by the calculation of intraclass correlation coefficients (ICC). Then we compared the measurements between the asymptomatic population and the significant stenotic foramens of the neuralgic population in order to determine the significant differences.

Results:

We studied 100 foramens in 10 asymptomatic patients and 100 including 23 significant stenotic foramens, in 10 neuralgic patients. Our measurements were reliable (ICC>0,9) with a precision to the tenth of a millimeter. We determined the osseous dimensions and the volume of the intervertebral foramens at all cervical levels of the lower cervical spine into the asymptomatic population. Regarding foraminal length (LF), foraminal height (HF), and disc height (HD), we found a significant correlation ($p < 0.05$) related to the gender.

The comparison of the C4C5, C5C6 and C6C7 levels with the stenotic foramen of the neuralgic population showed several significant decreases ($p < 0.001$) of the measurements as well as a significant decrease ($p < 0.001$) of the VF. The most significant decreasing dimensions were lfPi, lfsu, lrPi, lrsu and VF.

Conclusion:

This study allowed us to determine the osseous cervical foraminal dimensions in a young, asymptomatic population before the beginning of the spondylotic disease.

This work also showed us that the most stenotic foraminal areas are those opposite to the top of the uncus and to the posterior edge of the inferior cervical endplate of the overlying vertebra.

These results, may help the surgeon to better decompress cervical roots in the intervertebral foramen. An interesting result of our study was VF: this parameter, not very well-known in the current literature, seems to be the most representative of the cervical intervertebral foramen. It seems important to continue this study with a dedicated work about the volume (measured and non-calculated) of the cervical intervertebral foramen.

KEYWORDS: intervertebral foramen, cervical spine, CT scan measurement, osseous dimensions, volume, stenosis, cervicobrachial neuralgia.

