

Faculté des sciences de la motricité

**Mesure post-mortem
systématique de largeur et
d'épaisseur de la moelle
spinale humaine**

Auteurs : DURY Antonin & VERSLYPE Théo

Promoteurs : JANKOVSKI A. ; BEHETS C. & GLAUDOT G.

Année académique 2022-2023

Master en kinésithérapie et réadaptation [60.0] – KINE2M

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier nos promoteurs, Aleksandar Jankovski, Catherine Behets et Guillaume Glaudot de nous avoir permis de travailler sur un sujet de mémoire hors des normes de ceux retrouvés dans le cursus de kinésithérapie ainsi que de nous avoir accordé leur temps et un soutien sans faille tout au long de l'avancement du projet.

Nous tenons également à remercier les prosecteurs du laboratoire d'anatomie humaine de l'UCLouvain de nous avoir permis un accès libre aux locaux nécessaires aux prises de mesures.

Enfin, nous tenons aussi à remercier tout notre entourage que ce soit les amis ou la famille de nous avoir soutenus et aidé en toutes circonstances.

Table des matières

I.	Introduction	4
I.1	Rappel sur la moelle spinale et les segments spinaux	4
I.2	Contexte de l'étude	5
II.	Matériel et méthode	7
II.1	Sujets.....	7
II.2	Matériel.....	7
II.3	Protocole expérimental	7
II.4	Paramètres et variables	9
II.5	Biais de mesure.....	10
II.6	Analyses statistiques	10
III.	Résultats	12
III.1	Variabilités inter-examineurs.....	12
III.2	Graphiques combinant les mesures régulières et segmentaires de largeur et d'épaisseur de la moelle spinale	12
III.2.1	Graphiques combinés moyens de l'échantillon.....	13
III.2.2	Graphiques combinés masculins et féminins	14
III.2.3	Graphiques combinés des trois sous-groupes de longueur.....	16
III.3	Maxima d'élargissement.....	19
III.4	Maxima d'épaississement.....	19
III.5	Minima d'élargissement et d'épaississement	19
III.6	Longueurs des segments	20
IV.	Discussion	23
IV.1	Graphiques combinant les mesures régulières et segmentaires de largeur et d'épaisseur de la moelle spinale	23
IV.2	Maxima d'élargissement.....	24
IV.3	Maxima d'épaississement.....	24
IV.4	Minima d'épaississement et d'élargissement	24
IV.5	Longueurs des segments	25
IV.6	Points forts et limites de l'étude	26
V.	Conclusion	28
VI.	Bibliographie.....	30

I. Introduction

I.1 Rappel sur la moelle spinale et les segments spinaux

Une base de connaissance théorique sur la structure anatomique de la moelle spinale humaine est importante pour la représentation et compréhension de cette étude.

La moelle épinière (ancienne nomenclature) ou moelle spinale (nouvelle nomenclature) est contenue à l'intérieur de la colonne vertébrale et fait partie du système nerveux central tout comme l'encéphale. La moelle spinale prolonge la moelle allongée appartenant au tronc cérébral et s'étend habituellement jusqu'à hauteur du disque intervertébral L1-L2. Elle est constituée de neurones et de cellules gliales et transmet l'information nerveuse du cerveau jusqu'au reste du corps.

La moelle spinale est divisée en plusieurs régions, de haut en bas : cervicale, thoracique, lombaire, sacrée et coccygienne. Les repères utilisés pour les localiser sont ceux des vertèbres de la colonne vertébrale. Ces régions au sein de la moelle spinale ne correspondent pas forcément aux repères osseux attribués à cause du phénomène d'allométrie.

Cette dernière est recouverte de trois méninges, qui de l'extérieur vers l'intérieur sont : la dure-mère, l'arachnoïde et la pie-mère qui se trouve au contact de la moelle. Elle possède une forme un peu aplatie dans le sens dorso-ventral et est parcourue par deux sillons : l'un sur la face ventrale (la fissure médiane) et l'autre sur la face dorsale (le sillon médian). La moelle spinale se termine en un tissu conjonctif descendant depuis l'apex du cône terminal nommé le filum terminal et qui provient de la pie-mère.

De la moelle se détachent 31 paires de nerfs spinaux : huit cervicales, 12 thoraciques, cinq lombaires, cinq sacrales et une coccygienne. L'origine des nerfs spinaux permet de définir 31 segments médullaires spinaux correspondants. Ces nerfs proviennent chacun de deux racines, une racine dorsale sensitive et une racine ventrale motrice, qui se réunissent et pour passer dans les foramens intervertébraux de la colonne vertébrale et se poursuivre en périphérie. En se regroupant, certains de ces nerfs forment deux plexus : un en cervical qui regroupe les nerfs innervant

les membres supérieurs, et un en lombaire qui regroupe les nerfs innervant les membres inférieurs.

I.2 Contexte de l'étude

Les récentes avancées technologiques ont permis le développement des méthodes non invasives d'imageries médicales concernant l'anatomie humaine. Ces méthodes font partie des outils principaux de diagnostic après trauma ou maladies neurologiques dont notamment l'imagerie à résonance magnétique (IRM) (Stroman et al., 2012) ; (Lundell et al., 2011).

Cependant, comme indiqué dans la partie théorique, les segments d'une moelle spinale ne sont en rien le parfait reflet des repères osseux de la colonne vertébrale. Une étude s'est intéressée à la croissance des nerfs spinaux par rapport aux repères osseux de la colonne vertébrale. Celle-ci indique qu'au cours de leur développement, les nerfs spinaux sont pourvus d'un cône de croissance axonale assurant la séparation des nerfs rachidiens des os vertébraux lorsque les axones s'étendent vers leurs cibles périphériques (Keynes, 2018). Ceci montre qu'un développement séparé de la moelle spinale et de la colonne vertébrale a bien lieu.

Les connaissances scientifiques de la segmentation et de la cartographie au niveau de la moelle spinale sont bien moindres comparées à d'autres parties du système nerveux central comme l'encéphale. Dans les atlas anatomiques classiques, la moelle spinale est représentée de manière standardisée sous sa forme anatomique avec des racines antérieures et postérieures émergeant symétriquement. Celles-ci se combinent dans les nerfs rachidiens au niveau du foramen intervertébral. Leijnse et D'Herde ont conclu que les racines antérieures présentent des différences morphologiques notables. De plus, ils ont suggéré que cette double vision de la moelle spinale soit ajoutée aux manuels d'anatomie pour contrebalancer la vision actuelle éventuellement biaisée d'une moelle segmentée (Leijnse & D'Herde, 2016). Dans une revue de la littérature de 11 études morphométriques, Frostell et al. ont repris les données extraites de ces différentes recherches pour pouvoir les combiner et les normaliser sur un même axe crânio-caudal afin de produire des estimations de populations significatives. Ces estimations pourraient être utiles dans la gestion des patients atteints de maladies neurodégénératives ainsi que pour la recherche clinique et les applications expérimentales visant la réparation

chirurgicale de la moelle spinale (Frostell et al., 2016). Cependant, les données utilisées de ces études ne semblent pas être uniformes quant aux méthodes employées. En effet, les mesures ne concernent à chaque fois qu'une partie de moelle. De plus, elles ont été obtenues via des méthodes d'examen variées (examen post-mortem, myélographie in vivo, IRM), par rapport à différents points de repère (neuronal ou vertébral), ou encore à partir d'une taille d'échantillon pouvant varier d'une étude à l'autre, allant de 14 à 152 sujets.

En tenant compte de cela, peut-on affirmer que les diagnostics ou opérations chirurgicales actuelles au niveau de la moelle spinale, se basant sur des imageries de colonnes vertébrales, soient aussi précis que ce que l'on pense ?

Le but de cette étude est de créer une base de données de mesures de largeur, d'épaisseur et de longueur de moelles spinales humaines prises à intervalles réguliers (tous les demi-centimètres) depuis le dernier segment sacré jusqu'au deuxième segment cervical. La suite du travail consistera à croiser ces mesures avec celles relatives à chaque segment (Nunes et al. 2023) afin de créer un modèle probabiliste de localisation dans la moelle, applicable aux dimensions collectées à l'IRM (ces dimensions correspondent aux mesures à intervalles réguliers dans cette étude). L'objectif de cette expérience est donc d'aider les cliniciens à localiser plus facilement un segment de moelle spinale à l'IRM.

II. Matériel et méthode

II.1 Sujets

L'étude comptait au départ un échantillon de 29 moelles spinales. Les critères d'inclusion des moelles étaient leur bon état de conservation et l'existence des données complètes de longueurs de leurs segments (Nunès et al., 2023). Au total, trois moelles ont été exclues de l'échantillon par manque de données de longueur segmentaire. Les 26 moelles retenues proviennent de corps légués au laboratoire d'anatomie de l'UCLouvain, dont l'âge moyen est de 86 ± 8 ans (moyenne \pm écart-type). Onze moelles sont issues de sujets masculins dont l'âge moyen est de 81 ± 7 ans et 15 de sujets féminins dont l'âge moyen est de 89 ± 6 ans. Tous les corps ont été embaumés au chlorure de zinc et, après prélèvement, leur moelle spinale a été conservée dans du formol durant plusieurs années.

II.2 Matériel

Les mesures ont été réalisées au laboratoire d'anatomie de l'UCLouvain. Le matériel utilisé comprenait des aiguilles de 0,6 millimètre (mm) de diamètre, un mètre ruban, un pied à coulisse électronique (précision à 0,01mm), du matériel de dissection et un appareil photo.

II.3 Protocole expérimental

Un tablier et des gants étaient portés lors de la manipulation des moelles.

Chaque moelle a été rincée à l'eau, puis étendue le plus droit possible sur une surface plane. Les segments ou intervalles étaient marqués à l'aide d'aiguilles avant de prendre les mesures. Pour chaque moelle, des mesures de largeur et d'épaisseur ont été prises tous les demi-centimètres à l'aide d'un pied à coulisse numérique. Les mesures commençaient au dernier segment sacré et se terminaient au deuxième segment cervical, le premier segment n'étant pas toujours identifiable. Des mesures de longueur, de largeur et d'épaisseur segmentaires avaient déjà été prises pour 19 des 26 moelles lors d'une précédente étude (Nunès et al., 2023). Par conséquent, il n'a fallu prendre ces mesures que pour sept d'entre elles. Chaque mesure a été prise une fois par un examinateur soit deux fois au total afin de permettre une collecte en double aveugle. Les mesures ont été reportées dans un cahier de laboratoire en mentionnant pour chaque moelle la date des manipulations, la référence de la moelle, les observations et les remarques éventuelles. Toutes les

données mesurées ont été encodées dans le logiciel Excel afin d'y réaliser des graphiques et analyses.

À partir de la moyenne des données des deux observateurs ainsi que des données récoltées dans l'étude précédente, des graphiques combinés ont été produits pour chaque moelle spinale. Chaque graphique combiné représente toutes les prises de mesures de largeur ou d'épaisseur de la moelle (en mm) tous les demi-centimètres et chaque segment. La longueur totale de la moelle représentée correspond au nombre d'intervalles de mesure (en cm) ou à la distance entre le dernier segment sacré et le deuxième segment cervical. Afin d'obtenir un graphique segmentaire équidistant à celui à intervalles réguliers (tous les demi-centimètres) et pour faciliter la représentation des graphiques combinés, une longueur forcée a été imposée pour chaque segment spinal, de sorte que la somme des longueurs de ces segments soit équivalente à la longueur de la moelle mesurée à intervalles réguliers. Par exemple, une moelle dont la somme des longueurs des segments mesure 41 cm et 42 cm pour les intervalles réguliers s'est vu imposer une longueur forcée de 42 cm pour la longueur des segments. Cette longueur forcée a respecté les proportions de chaque longueur de segment par rapport à la longueur totale initiale.

Sur chaque graphique, neuf repères ont été placés : C4, C6, C7, T2, L2, L3, L4, L5 et S2. Ces repères sont importants, car ils marquent les différents renflements médullaires. L'élargissement de la moelle spinale cervicale augmente fortement et significativement à partir de C4, culmine en C6 et C7, puis diminue fortement et significativement de plus d'un mm par segment jusqu'à T2. L'élargissement et l'épaississement lombaire présentent des limites communes crâniale et caudale respectivement en L2 et en S2. Les segments les plus larges et épais se trouvent en L3-L4-L5. Tous ces segments fournissent ainsi des points de repère à l'IRM. (Nunès et al., 2023)

Une fois les graphiques combinés produits pour chaque moelle, une moyenne de tout l'échantillon a été réalisée afin de pouvoir obtenir un modèle de la moelle moyenne de cet échantillon. Les données des moelles pouvant aller jusqu'à une longueur de 42 cm, la représentation de cette moelle moyenne a donc dû être fixée à cette longueur afin de pouvoir reprendre l'entièreté des données mesurées en un seul graphique.

Par la suite, les sujets ont été scindés en différents groupes, et des graphiques combinés ont été créés pour chacun d'eux. Tout d'abord, l'échantillon a été divisé selon le genre des sujets (F=15/H=11). La longueur de la moelle représentée était celle de la plus longue moelle de sexe féminin et masculin, soit 42 cm. Ensuite, l'échantillon de 26 moelles a été divisé en trois sous-groupes par ordre croissant de longueur. Le premier sous-groupe était composé de huit moelles uniquement issues de femmes (longueur entre 33 et 36cm), le second de 10 moelles (cinq moelles d'hommes et de femmes ; longueur entre 37 et 38cm) et le troisième de huit moelles (six moelles d'hommes et deux moelles de femmes ; longueur entre 39 et 42cm). Pour ces trois sous-groupes, des graphiques combinés ont à nouveau été créés.

L'étude s'est finalement focalisée sur les trois sous-groupes ainsi que sur la moyenne de l'échantillon. En effet, le premier sous-groupe est assez représentatif de la moelle spinale de sexe féminin tandis que le troisième sous-groupe représente plutôt la moelle spinale de sexe masculin. La comparaison de données obtenues pour le groupe femme et homme n'a alors plus été considérée dans le reste de l'étude.

Ensuite, l'étude s'est intéressée aux longueurs de groupements de segments médullaires, ainsi qu'aux proportions relatives qu'ils occupent par rapport à la longueur totale de la moelle spinale. La proportion de chaque segment au sein de chaque groupement a également été calculée. Les segments ont été regroupés en fonction des renflements en termes de largeur ou d'épaisseur. Les segments restants ne présentant aucune particularité ont été regroupés entre eux. Par conséquent, l'étude s'est également penchée sur les segments culminants d'élargissement et d'épaississement. Les segments les moins larges et les moins épais ont également été notés.

II.4 Paramètres et variables

Dans cette étude, les paramètres recherchés concernent la configuration tridimensionnelle de la moelle spinale humaine. Pour mettre en avant cette configuration, l'expérience s'est focalisée sur trois variables différentes à savoir la largeur, l'épaisseur et la longueur. Les mesures récoltées à partir de ces variables ont permis de développer des modèles probabilistes de moelle spinale humaine sous forme de graphiques combinés.

II.5 Biais de mesure

Les mesures ont été prises par deux observateurs différents. Par conséquent, de légères différences ont pu être observées dans la prise de mesure. Certains biais de mesure ont pu être rencontrés en raison de divers paramètres :

- L'utilisation du pied à coulisse : la précision étant au dixième de millimètres, des différences de valeurs entre les deux examinateurs étaient donc fréquentes.
- La répétition des prises de mesures sur les moelles a pu entraîner un biais de confirmation vis-à-vis des mesures auprès des examinateurs.
- La qualité de certaines moelles suite à leur manipulation successives lors des différentes études.
- Le rétrécissement des moelles spinales lors de leur fixation prolongée dans le formaldéhyde (pas valable pour les mesures prises tous les 5mm).

II.6 Analyses statistiques

Dans le but d'obtenir des résultats les plus fiables possibles et afin de réduire au maximum les biais de mesure, une moyenne des données récoltées par les deux examinateurs a été réalisée. Pour cela, un test de corrélation intraclass (ICC) a été réalisé pour les données de chaque variable mesurée (largeur et épaisseur tous les demi-cm et chaque segment). Les données peuvent être moyennées dans le cas où la valeur de l'ICC est supérieure ou égale à 0,8.

Des statistiques descriptives ont ensuite été réalisées pour les groupes de segments afin d'obtenir des écarts-types. Les écarts-types ont été calculés pour chaque sous-groupe, ainsi que pour l'ensemble de l'échantillon.

La normalité des groupes de segments a été validée. Pour vérifier si les données suivent une distribution normale, le test de normalité de Shapiro-Wilk, celui de Kolmogorov-Smirnov ou encore un graphique quantile-quantile (QQ-lot) peuvent être utilisés. Dans cette étude, la normalité a été vérifiée à l'aide des deux premiers tests. Lorsque les données suivent la normalité, on réalise des tests paramétriques. Si elles ne suivent pas la normalité, on réalise des tests non paramétriques.

Enfin, les moyennes de longueur entre les sous-groupes ont été testées par un test « t de Student » (statistiques paramétriques) ou un test de Wilcoxon-Mann-Whitney (statistiques non paramétriques).

III. Résultats

III.1 Variabilités inter-examineurs

Les résultats de ces ICC ont prouvé une fiabilité supérieure à 0,8 ce qui a donc permis de considérer la moyenne des données des deux examinateurs. Voici les différents résultats :

- ICC largeur tous les cm : 0,94
- ICC largeur tous les 0,5cm : 0,91
- ICC épaisseur tous les cm : 0,88
- ICC épaisseur tous les 0,5cm : 0,86
- ICC largeur tous les segments : 0,95
- ICC épaisseur tous les segments : 0,91

III.2 Graphiques combinant les mesures régulières et segmentaires de largeur et d'épaisseur de la moelle spinale

Dans l'ensemble des graphiques de moelles individuelles, l'allure des courbes de mesures à intervalles réguliers et de mesures de segments était relativement équivalente. Voici un exemple de la combinaison de ces mesures de largeur et d'épaisseur d'une des 26 moelles (*Figures 1 et 2*).

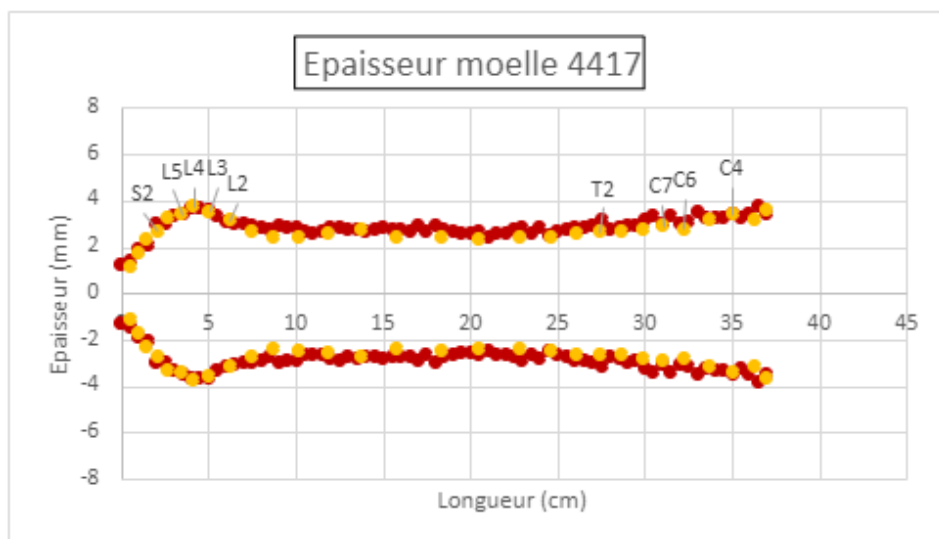


Fig. 1 : Graphique combiné d'épaisseur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0,5cm) et par segment d'une des 26 moelles, en l'occurrence ici la moelle 4417. En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

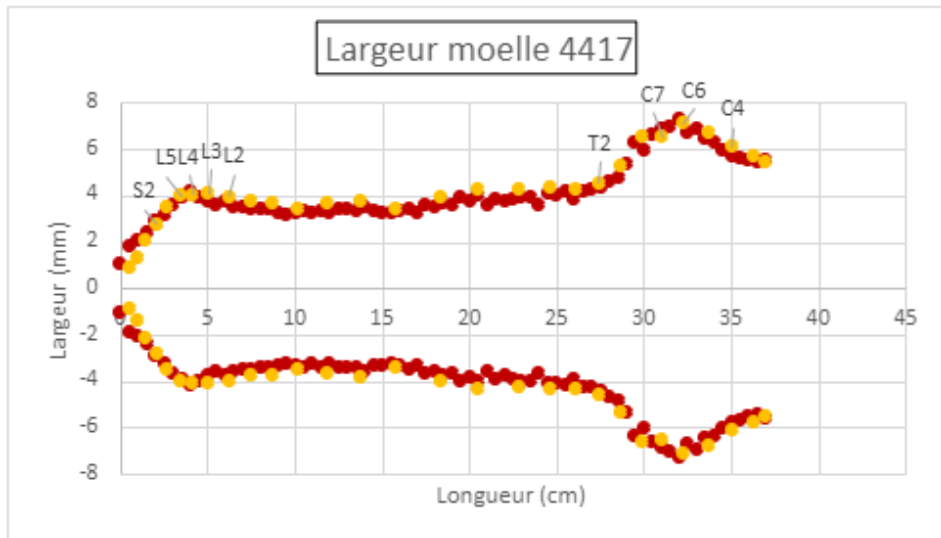


Fig. 2 : Graphique combiné de largeur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0,5cm) et par segment d'une des 26 moelles, en l'occurrence ici la moelle 4417. En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

III.2.1 Graphiques combinés moyens de l'échantillon

Comme précisé dans le chapitre méthodologique, les graphiques représentant les moyennes de largeur et d'épaisseur de l'ensemble de l'échantillon ont utilisé une longueur forcée de 42 cm. Les graphiques combinés représentant la moyenne de tout l'échantillon montrent un aplatissement de la courbe de largeur à intervalles réguliers au niveau de la région cervicale (Figure 3). Le renflement cervical est donc moins marqué sur le graphique à intervalles réguliers. De petites différences sont observables sur le graphique combiné de l'épaisseur, notamment au niveau des segments sacrés (Figure 4).

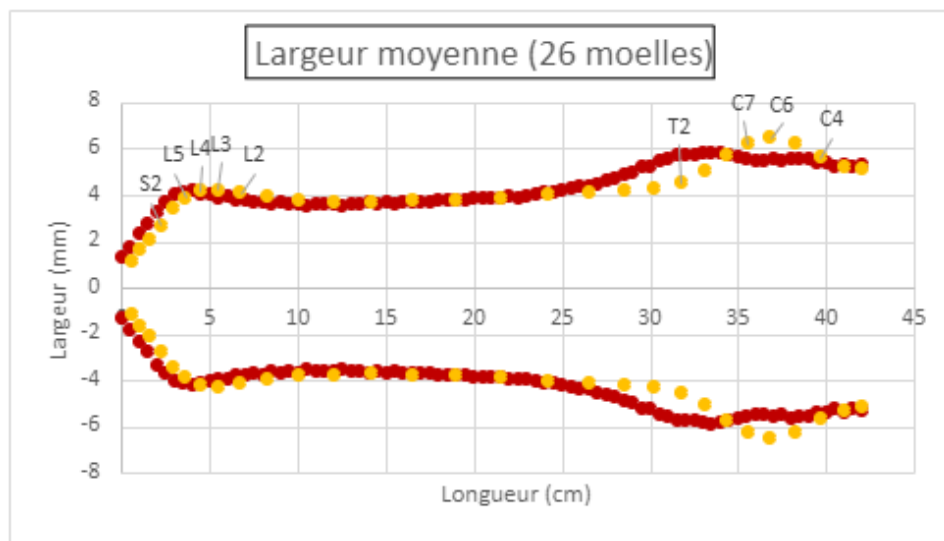


Fig. 3 : Graphique combiné de largeur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment de l'échantillon de 26 moelles. En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

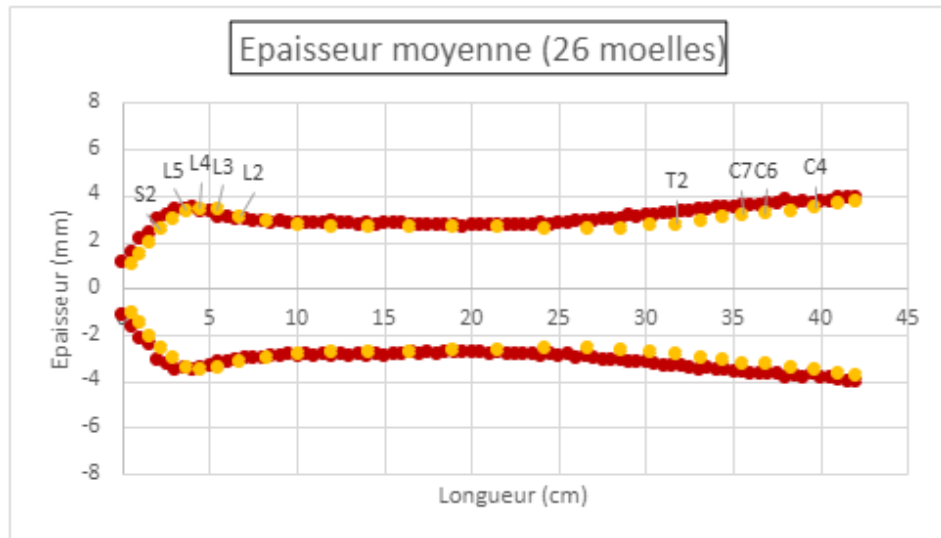


Fig. 4 : Graphique combiné d'épaisseur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment de l'échantillon de 26 moelles. En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

III.2.2 Graphiques combinés masculins et féminins

Dans la représentation graphique moyenne de la moelle de sujets féminins, une différence entre les deux courbes est à noter au niveau de l'élargissement cervical (*Figure 5*). Deux renflements sont observables sur le graphique de moelle à intervalles réguliers contre un pour le graphique représentant les segments. Ces différences sont nettement moins marquées chez l'homme, où seul un léger décalage entre les deux courbes est observable (*Figure 6*). A propos des graphiques d'épaisseur, on observe une meilleure superposition des courbes à la fois dans le groupe des moelles de sexe masculin et de sexe féminin (*Figures 7 et 8*).

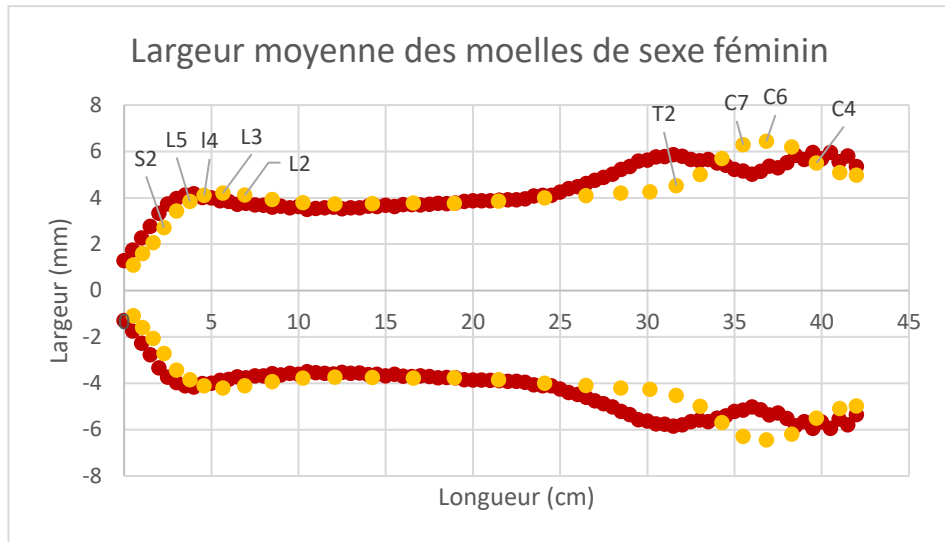


Fig. 5 : Graphique combiné de largeur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment des moelles de sexe féminin (15). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

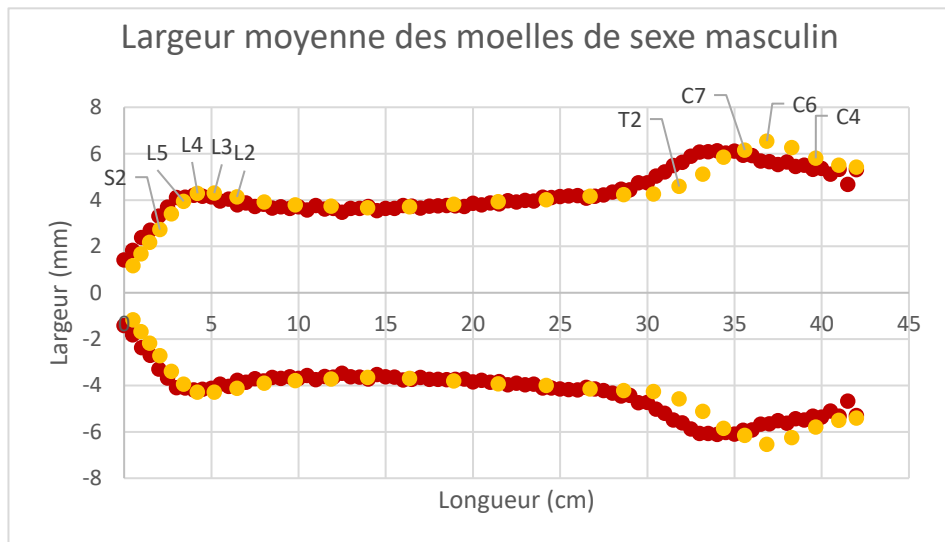


Fig. 6 : Graphique combiné de largeur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment des moelles de sexe masculin (11). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

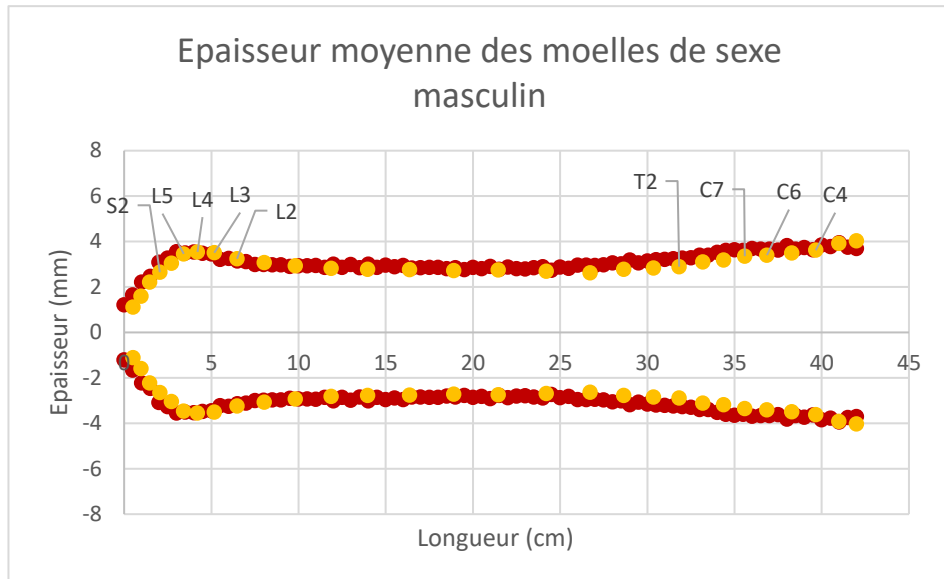


Fig. 7 : Graphique combiné d'épaisseur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment des moelles de sexe masculin (11). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

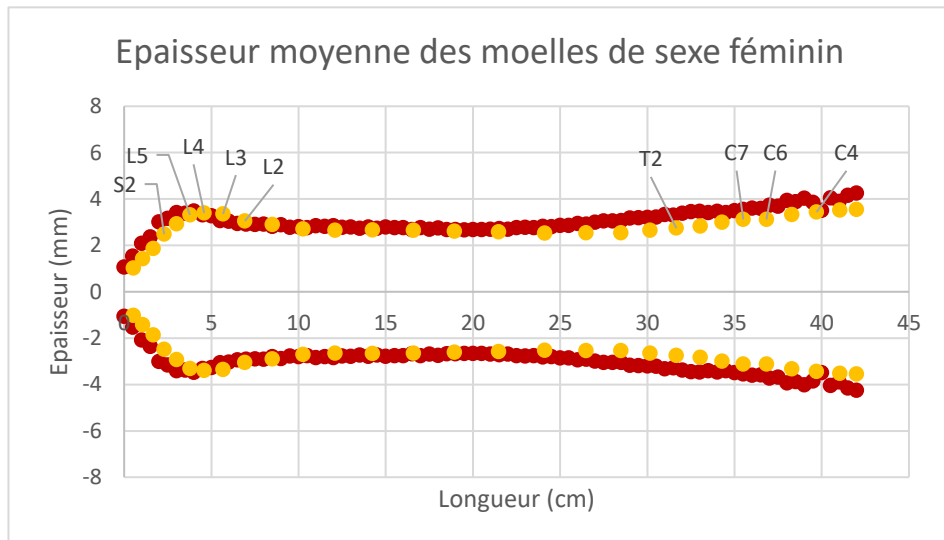


Fig. 8 : Graphique combiné d'épaisseur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment des moelles de sexe féminin (15). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

III.2.3 Graphiques combinés des trois sous-groupes de longueur

Concernant les graphiques combinés de largeur des trois sous-groupes distribués en fonction de la longueur totale de la moelle spinale (SG1 : 33-36cm ; SG2 : 37-38cm ; SG3 : 39-42cm), les points se superposent bien et moins de différences sont observables (Figures 9, 10 et 11). Un léger aplatissement au niveau de la région cervicale ou décalage est marqué sur la courbe de largeur pour le premier et le troisième sous-groupe.

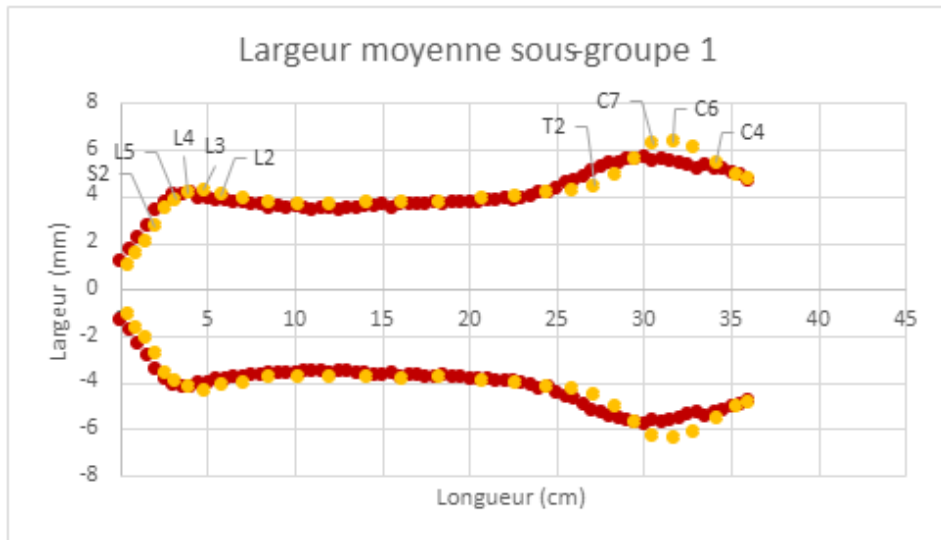


Fig. 9 : Graphique combiné de largeur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment des 8 moelles du sous-groupe 1 (33-36cm). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

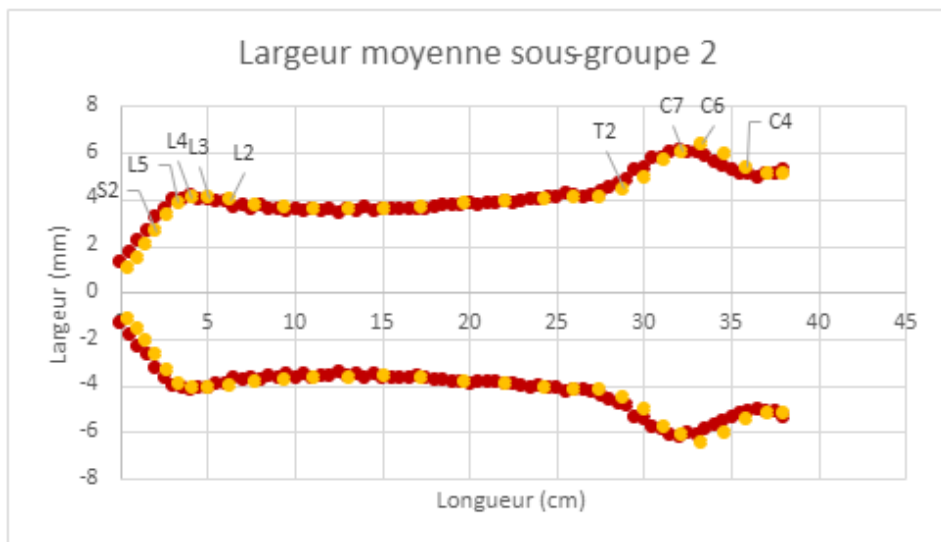


Fig. 10 : Graphique combiné de largeur avec prise de mesure par intervalle régulier : (tous les 0.5cm) et par segment des 10 moelles du sous-groupe 2 (37-38cm). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

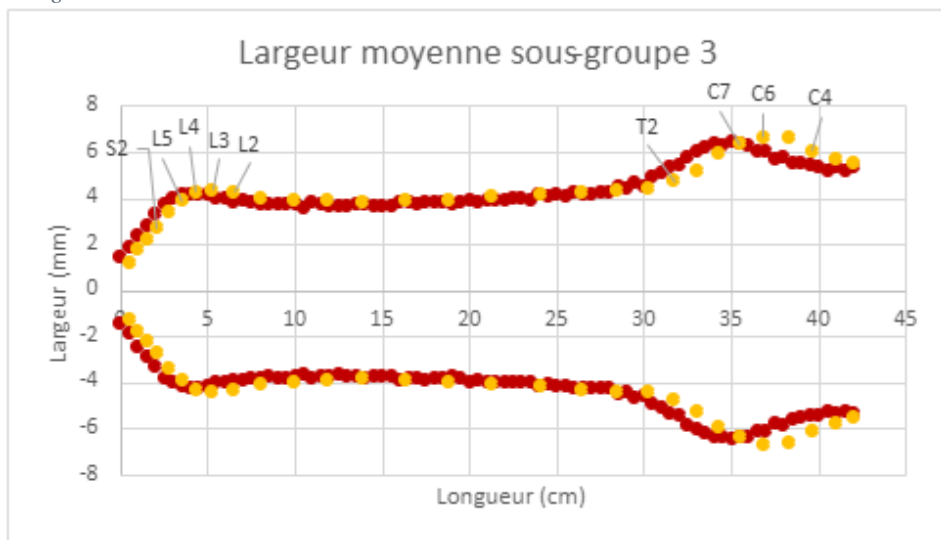


Fig. 11 : Graphique combiné de largeur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment des 8 moelles du sous-groupe 3 (39-42cm). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

Dans la majorité des graphiques combinés d'épaisseur de la moelle, un léger décalage de la courbe segmentaire en direction crâniale est observable (*Figures 12, 13 et 14*). Les valeurs d'épaisseur segmentaires ont aussi tendance à être inférieures à celles mesurées à intervalles réguliers.

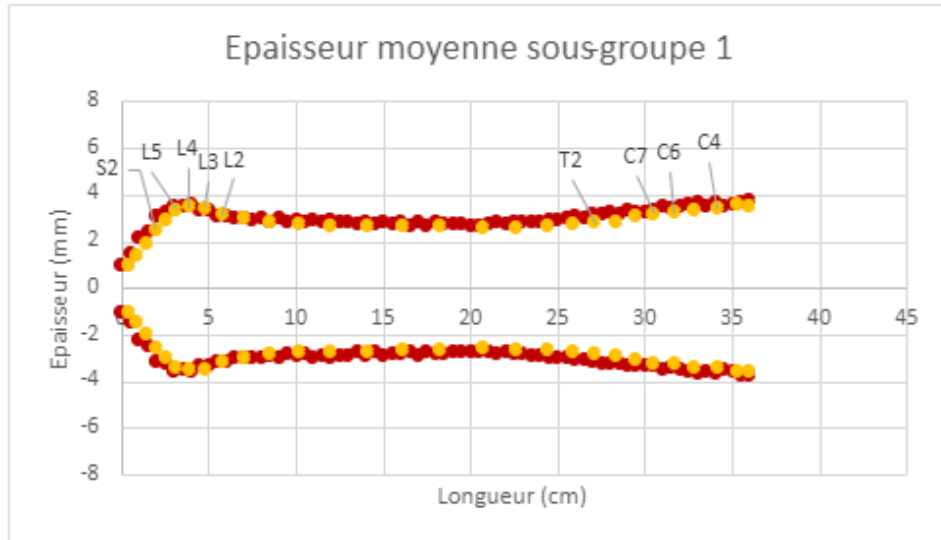


Fig. 12 : Graphique combiné d'épaisseur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment des 8 moelles du sous-groupe 1 (33-36cm). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

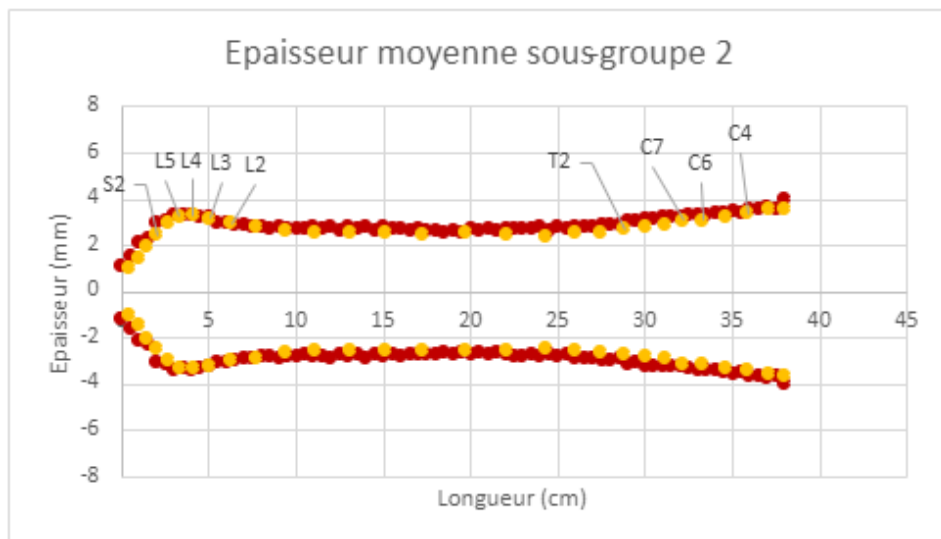


Fig. 13 : Graphique combiné d'épaisseur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5 cm) et par segment des 10 moelles du sous-groupe 2 (37-42cm). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

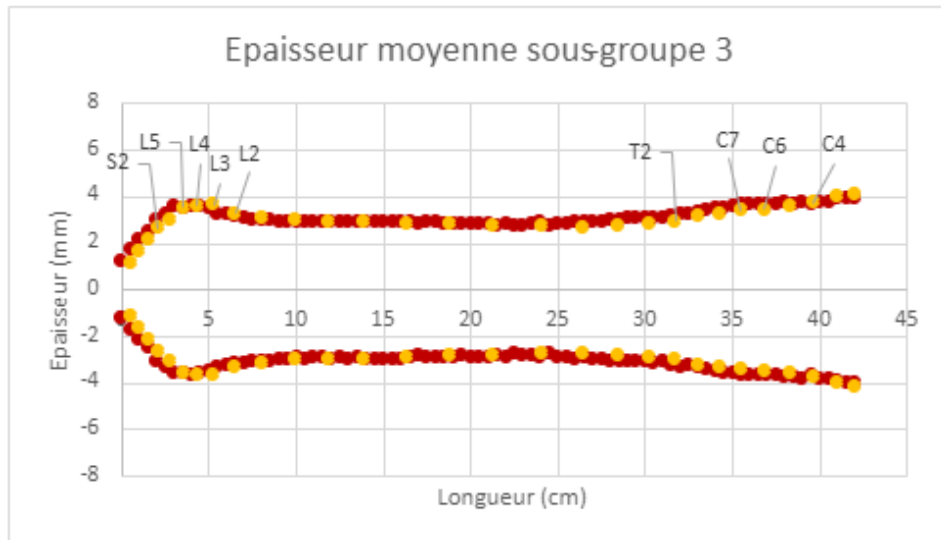


Fig. 14 : Graphique combiné d'épaisseur avec prise de mesure par intervalle régulier (tous les 0.5cm) et par segment des 8 moelles du sous-groupe 3 (39-42cm). En rouge : par intervalle régulier ; en jaune : par segment.

III.3 Maxima d'élargissement

Dans les graphiques de largeur spinale, les segments culminants sont C6-C7 pour 13 des 26 moelles et C5-C6-C7 pour 21 des 26 moelles (7/8 pour le sous-groupe un, 10/10 pour le sous-groupe deux, 4/8 pour le sous-groupe trois, 13/15 pour les femmes et 8/11 pour les hommes). Les segments d'inflexion qui marquent les limites du renflement cervical sont C4 et T2 pour 21 moelles.

III.4 Maxima d'épaississement

Dans les graphiques d'épaisseur spinale, les segments culminants sont L3-L4-L5 (21 moelles sur 26, 7/8 pour les sous-groupes un et trois, 7/10 pour le sous-groupe deux, 13/15 pour les femmes et 8/11 pour les hommes) et les segments d'inflexion L1-L2 (20 moelles sur 26) dans la grande majorité des cas. L'épaisseur a également tendance à diminuer de C2 à T2.

III.5 Minima d'élargissement et d'épaississement

Les segments les moins larges sont T8-T9-T10-T11-T12 (24 moelles sur 26, 6/8 pour le sous-groupe 1, 10/10 pour le sous-groupe deux, 8/8 pour le sous-groupe trois). Les segments les moins épais sont T5-T6 (17 moelles sur 26, 7/8 pour le sous-groupe un, 5/10 pour le sous-groupe deux, 5/8 pour le sous-groupe trois).

III.6 Longueurs des segments

Le tableau 1 représente la longueur de chaque groupement de segments au sein de chaque sous-groupe de l'échantillon ainsi que pour l'ensemble de l'échantillon. Les segments ont été groupés en fonction de leur particularité de largeur et d'épaisseur. A titre d'exemple, C5-C6-C7 sont les segments les plus larges et ont donc été rassemblés. Les segments restants ne présentant pas de particularité ont été rassemblés entre eux et sont indiqués par une case vide sur la gauche du tableau. Le tableau a été divisé en trois grandes colonnes représentant chacune un sous-groupe de moelles, défini d'après la longueur totale. La dernière colonne correspond à l'échantillon total. Dans chaque groupe de segments, on retrouve la proportion de longueurs (en pourcentage (%)) qu'occupe chaque segment dans son regroupement. La longueur du groupement de segments et son écart-type (en mm) ont été indiqués au milieu de chaque colonne. On peut aussi voir le rapport (en %) entre la longueur du groupement de segments et la longueur totale de la moelle spinale. Enfin, la dernière ligne du tableau représente la longueur totale moyenne et réelle de chaque sous-groupe. On observe que les proportions sont assez stables au sein des sous-groupes et pour l'échantillon.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de longueurs de segments de moelles.

	Seg.	G1 (n=8)			G2 (n=10)			G3 (n=8)			Total (n=26)		
		%	Long. (mm)	% tot	%	Long. (mm)	% tot	%	Long. (mm)	% tot	%	long. (mm)	% tot
	C2	24%	32,2 ± 2,1	8,70%	28%	35,5 ± 4,2	8,90%	28%	38,4 ± 2,9	8,90%	27%	35,4 ± 4	8,80%
	C3	36%			35%			36%			36%		
	C4	40%			37%			36%			38%		
Larg. (+)	C5	36%	35,1 ± 2,4	9,50%	37%	37 ± 4,1	9,30%	36%	41,4 ± 4,2	9,60%	36%	37,8 ± 4,4	9,40%
	C6	33%			32%			33%			33%		
	C7	31%			31%			31%			31%		
	C8	15%	69,7 ± 6	18,90%	16%	71,4 ± 5,5	17,90%	15%	80,3 ± 6,7	18,50%	16%	73,6 ± 7,4	18,40%
	T1	19%			17%			18%			18%		
	T2	19%			20%			19%			19%		
	T3	21%			22%			23%			22%		
	T4	25%			25%			25%			25%		
Epaiss. (-)	T5	45%	44,8 ± 6,5	12,10%	50%	48,4 ± 4,1	12,10%	47%	53,5 ± 4,6	12,40%	47%	48,9 ± 6	12,20%
	T6	55%			50%			53%			52%		
	T7	100%	22 ± 1,9	6,00%	100%	25,3 ± 2,5	6,30%	100%	25,3 ± 2,9	6,30%	100%	24,3 ± 2,8	6,10%
Larg. (-)	T8	23%	92,6 ± 9,3	25,10%	23%	100,5 ± 6,6	25,20%	23%	110,9 ± 6,5	25,60%	23%	101,3 ± 10,2	25,30%
	T9	23%			21%			22%			22%		
	T10	20%			21%			19%			20%		
	T11	18%			18%			18%			18%		
	T12	16%			17%			17%			17%		
	L1	100%	13,5 ± 1,6	3,70%	100%	15,2 ± 1,5	3,80%	100%	16 ± 2,4	3,70%	100%	14,9 ± 2,1	3,70%
Larg. (+) Epaiss. (+)	L2	18%	59,1 ± 7,2	16,00%	20%	65,5 ± 6,3	16,40%	19%	67,2 ± 6,7	15,50%	19%	64,6 ± 7,3	16,00%
	L3	16%			15%			15%			15%		
	L4	12%			12%			12%			12%		
	L5	11%			11%			11%			11%		
	S1	10%			10%			11%			10%		
	S2	8%	10%	9%	9%	9%							
	S3	9%	8%	7%	7%	7%							
	S4	8%	7%	7%	7%	7%							
	S5	8%	7%	7%	8%	8%							
Tot.			36,9cm	100%		39,88cm	100%		43,3cm	100%		40,08cm	100%

Les données indiquées sur ce tableau sont exprimées par la moyenne et l'écart-type.

Le tableau 2 présente les résultats (en p-valeur) des comparaisons des moyennes de longueur des groupements de segments entre les trois sous-groupes. Pour la grande majorité des données, un test « t de Student » a été réalisé. Seuls les groupes T7 et T8-T12 du troisième sous-groupe ont nécessité des statistiques non paramétriques (test de Wilcoxon-Mann-Whitney).

Le tableau a été divisé en trois colonnes. La première colonne compare le premier avec le deuxième sous-groupe. La deuxième compare le deuxième au troisième sous-groupe et la dernière colonne compare le premier et le troisième sous-groupe. Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0,05$.

Tableau 2 : Comparaison de moyenne de longueur de groupements de segments entre sous-groupes.

	p-valeur		
	1 vs 2	2 vs 3	1 vs 3
C2-C4	0,0587 (ns)	0,1226 (ns)	0,0003***
C5-C7	0,271 (ns)	0,0366*	0,0021**
C8-T4	0,5345 (ns)	0,0069**	0,0049**
T5-T6	0,1736 (ns)	0,0228*	0,0079**
T7	0,007**	0,9464 (ns)	0,0281*
T8-T12	0,0521 (ns)	0,0085**	0,0002***
L1	0,0391*	0,3644 (ns)	0,0267*
L2-S5	0,0603 (ns)	0,5932 (ns)	0,035*

Les valeurs en gras indiquent les différences significatives ($p < 0,05$) entre les deux sous-groupes (pour le groupement de segments représenté). Les astérisques montrent la puissance de significativité.

IV. Discussion

IV.1 Graphiques combinant les mesures régulières et segmentaires de largeur et d'épaisseur de la moelle spinale

Concernant le graphique moyen représentant l'élargissement de la moelle spinale des sujets de sexe féminin (*figure 5*), des différences importantes ont pu être observées au niveau du renflement cervical. En effet, le graphique à intervalles réguliers présente deux renflements cervicaux bien décalés par rapport au graphique représentant les segments. Une explication plausible semble être la grande variabilité de longueur de moelle qui oscille entre 33 et 42 cm. En effet, cela veut dire que des moyennes ont été réalisées entre des intervalles identiques, mais des segments différents, ce qui a pu fausser la représentation de la moelle à intervalles réguliers. Ce phénomène est légèrement moins marqué chez l'homme, car les longueurs sont moins étendues (entre 37 et 42 cm). Les courbes d'épaisseur se superposaient davantage en raison d'une plus grande régularité des valeurs et de renflements moins marqués. Pour tous les groupes, le graphique des moelles spinales de tous les segments semble plus représentatif que celui à intervalles réguliers.

À propos des graphiques de la moyenne de l'échantillon (*figures 3 et 4*), un aplatissement de la courbe de largeur à intervalles réguliers peut être observé dans la région cervicale. Cet aplatissement s'explique probablement par le système de longueur forcée (42 cm) d'une part, mais également par la moyenne des différents intervalles. Le nombre d'intervalles varie selon la longueur de la moelle en question et non pas les segments qui sont toujours au nombre de 29. Un même intervalle peut en réalité correspondre à un segment différent d'une moelle à l'autre. Réaliser une moyenne des segments est donc plus pertinent et représentatif qu'une moyenne d'intervalles. Les légères différences d'épaisseur peuvent être expliquées par les variabilités inter-examineurs étant donné que les valeurs à intervalles réguliers et la majorité des données segmentaires ont été récoltées par des examineurs et des périodes différentes. À nouveau, le graphique avec les données représentant tous les segments semble le plus représentatif de la moelle spinale moyenne.

Les graphiques représentant les trois sous-groupes (*figure 9, 10, 11, 12, 13*) montraient peu de différences. Cela s'explique par le fait qu'au sein de chaque

groupe, il existe moins de variabilités de longueur. C'est dans le premier et troisième sous-groupes que l'aplatissement cervical et décalage des deux courbes étaient les plus marqués concernant les mesures de largeur. En effet, ces deux sous-groupes présentaient le plus de variations de longueur. Concernant les légères différences observées pour l'épaisseur dans la majorité des graphiques, plusieurs explications pourraient justifier ce phénomène : variabilités inter-examineurs, dégradation de la moelle spinale, précision du pied à coulisse numérique.

Dans l'ensemble, les mesures segmentaires sont plus utiles lorsque l'objectif est de représenter une moyenne et de dégager des tendances. Cependant, les mesures par intervalles réguliers confirment les résultats obtenus pour les segments et permettent de vérifier la continuité des données entre les segments au sein d'une même moelle. Afin d'exploiter les données à intervalles réguliers et réaliser des moyennes d'échantillon correctement, il est nécessaire que les moelles utilisées possèdent la même longueur.

IV.2 Maxima d'élargissement

Les résultats obtenus montrent que les segments C5-C6-C7 sont les plus larges dans 81 % des cas (21/26 moelles). Les segments T2 et C4 ont été déterminés comme point d'inflexion de cet élargissement. La probabilité d'avoir ces 3 segments les plus larges pour une moelle de taille moyenne est de 100 %. Cette probabilité est moins élevée pour les autres sous-groupes (SG1 : 87,5 % ; SG2 : 50 %). Lorsque ce n'est pas le cas, C6-C7-C8 sont alors les segments les plus larges.

IV.3 Maxima d'épaississement

Les résultats des points culminants d'épaississement sont également satisfaisants. En effet, le groupe L3-L4-L5 est le plus épais dans 81 % des cas (21/26 moelles). Les points d'inflexion sont L1-L2 dans 77 % des cas (20/26 moelles). Ces résultats montrent qu'à l'IRM, il existe une forte probabilité de localiser ce groupe de segments lorsqu'on sélectionne les points les plus épais. Ces segments sont indispensables à la localisation médullaire.

IV.4 Minima d'épaississement et d'élargissement

Les segments les plus étroits en termes de largeur et d'épaisseur sont intéressants pour localiser plus facilement ceux en thoraciques qui sont très constants au niveau de l'élargissement et l'épaississement. Les segments les moins

larges s'étendent de T8 à T12 dans 92 % des cas (24/26 moelles). Les moins épais sont T5 et T6 dans 65 % des cas (17/26 moelles). La connaissance de ces segments les plus étroits représente un bon élément pour la localisation des segments à l'IRM.

IV.5 Longueurs des segments

Au cours des premières représentations moyennes en graphique, la répartition des graphiques en sous-groupes s'est révélée être plus représentative et plus exploitable qu'une distinction homme/femme. En effet, les variations de longueurs parmi les moelles sont un frein à la comparaison d'intervalles réguliers. La répartition en sous-groupes semble être la manière la plus adéquate à l'analyse de segments et d'intervalles réguliers.

Les résultats montrent une variabilité de longueur des groupements de segments dans chaque sous-groupe. La longueur de chaque groupe de segments augmente en fonction de la longueur totale de la moelle, mais les proportions de ceux-ci restent constantes.

Au sein de chaque groupe de segments, les proportions se respectent également. Par exemple, C5-C6-C7 occupent entre 9,3 et 9,6 % de la longueur totale. Au sein de ce groupe de segments, C5 occupe 36-37 % de la longueur de son groupe tandis que C6 est à 32-33 % et C7 à 31 % de cette longueur. La régularité des proportions de longueurs est très intéressante, car cela permet de directement localiser chaque segment à partir de la longueur totale de la moelle ou de la longueur du groupe de segment.

De plus, les données de longueur, de largeur et d'épaisseur peuvent se combiner pour accroître les probabilités de localisation. En sélectionnant 9,3 % de la longueur d'une moelle de taille moyenne (37-38 cm) dans sa zone la plus large, la probabilité de tomber sur C5-C6-C7 est plus importante. Par la suite, une localisation de ces 3 segments séparément en reprenant les proportions de chaque segment au sein de cette longueur est possible. Cette règle est d'application pour tous les autres segments.

Concernant les comparaisons de moyennes entre les sous-groupes, on peut affirmer que des différences significatives de longueur ont été observées pour chaque groupe de segments entre le premier (33-36 cm) et le troisième sous-groupe

(39-42 cm). On peut donc conclure que les données du troisième sous-groupe sont significativement supérieures à celles du premier sous-groupe.

Le premier (33-36 cm) et le deuxième (36-39 cm) sous-groupes présentent peu de différences significatives. Cela peut s'expliquer par les longueurs totales qui sont proches l'une de l'autre. Les données sont trop proches pour évoquer des différences entre elles.

Entre le deuxième et le troisième sous-groupe, des différences significatives ont été observées entre C5 et T12 (hormis T7). On peut en déduire qu'entre une moelle de taille moyenne et une moelle de longue taille, les variations de longueur se trouvent surtout au centre de la moelle. Une moelle de grande taille se démarque d'une de taille moyenne par un allongement essentiellement marqué entre C5 et T12.

IV.6 Points forts et limites de l'étude

Cette étude a été effectuée en tâche double aveugle. Chaque mesure a donc été prise deux fois indépendamment de chaque examinateur. Le test ICC effectué a indiqué une bonne corrélation entre les examinateurs ($ICC > 0,8$).

De même, certaines mesures par segments avaient été prises par une précédente équipe quelques années auparavant. Malgré des différences inter-examineurs, les graphiques combinés montrent bien que les données des mesures par segments et par intervalles réguliers se correspondent.

Toutefois, les prises de mesure étant effectuées à la main avec un pied à coulisse électronique, des différences liées à une utilisation de l'outil ont pu arriver. De plus, avec cette technique manuelle, il existe un biais de confirmation lors des prises de mesures qu'il ne faut pas négliger.

Par ailleurs, les moelles spinales fournies par le laboratoire d'anatomie humaine de l'UCLouvain ont déjà servi par le passé pour d'autres études. Ces manipulations répétées avec le temps ont pu dégrader l'état général de ces moelles. D'autre part, la conservation des moelles spinales dans le formol pendant plusieurs années ne permet pas d'assurer totalement l'intégrité de celles-ci (Klopfleisch et al., 2013).

De plus, pour un souci de secret médical, les données et informations relatives à la personne ayant fait don de son corps ne nous ont pas été divulguées. Il est donc possible qu'un éventuel problème de santé pouvant influencer la morphologie spinale ait été présent lors de nos prises de mesures.

Enfin, l'échantillon de cette étude ne permet pas de transposer les résultats à la population. En effet, le nombre de moelles analysées ($n=26$) et l'âge moyen des corps donateurs (86 ± 8 ans) ne permettent pas d'extrapoler les résultats à la population générale.

V. Conclusion

De manière générale, ce sont les graphiques des données segmentaires qui sont les plus représentatifs de la moelle spinale humaine. Les graphiques à intervalles réguliers semblent être représentatifs lorsqu'ils sont présentés dans des sous-groupes. Autrement dit, au moins il y a de variabilité de longueur au sein d'un groupe de moelles spinales, au plus la courbe à intervalles réguliers représente correctement la moelle, car la moyenne des intervalles correspond +/- à celle des mêmes segments.

Pour établir un modèle probabiliste de moelle spinale humaine, les graphiques combinés du deuxième sous-groupe semblent être les plus appropriés. En effet, ce sont, dans un premier temps, les graphiques avec le moins de différences observables entre les courbes à intervalles réguliers et les courbes segmentaires. Dans un second temps, c'est le sous-groupe qui comprend le plus de moelles (10) et dont la longueur varie le moins (entre 37 et 38 cm). Dans ce sous-groupe, la moyenne des intervalles semble être la plus correcte et la plus pertinente. De plus, la longueur moyenne de l'échantillon est de 37,81 cm. Dans ce deuxième sous-groupe, les graphiques sont présentés avec une longueur de 38 cm, ce qui correspond à la représentation de la moelle spinale moyenne de l'échantillon (contrairement aux graphiques combinés de la moyenne de toutes les données où la longueur est de 42 cm). Enfin, les renflements sont marqués aussi bien pour la largeur que pour l'épaisseur dans ce sous-groupe.

On peut également conclure que pour la largeur, on trouve les points culminants en C5-C6-C7 et les points d'inflexion en C4 et T2 avec un haut degré de certitude. Pour l'épaisseur, on trouve les points culminants en L3-L4-L5 et les points d'inflexion en L1-L2 avec un haut degré de certitude.

De plus, l'analyse des longueurs de segments a révélé une régularité des proportions de longueurs au sein de chaque sous-groupe et de chaque groupe de segments (*Tableau 1*). Cette découverte est une contribution à une meilleure localisation de chaque segment à partir d'une longueur donnée de moelle.

L'objectif de cette étude était de créer une base de données permettant d'obtenir un modèle probabiliste de moelle spinale afin de pouvoir localiser chaque

segment séparément. En croisant les données de largeur, épaisseur et longueur, il est désormais possible de localiser un segment de moelle spinale avec de fortes probabilités d'être réellement sur ce segment.

L'apport de ce mémoire dans la pratique de la kinésithérapie présente beaucoup d'intérêts. En effet, la localisation d'un segment lésé à l'IRM permettra de faciliter et de cibler plus facilement la rééducation d'un patient blessé médullaire. Nous sommes personnellement convaincus que ce mémoire apportera de nouvelles découvertes dans la clinique et dans le domaine de la kinésithérapie neurologique.

À l'avenir, il serait intéressant de se concentrer sur les notions d'angles et de pentes médullaires.

VI. Bibliographie

- Frostell, A., Hakim, R., Thelin, E. P., Mattsson, P., & Svensson, M. (2016). A Review of the Segmental Diameter of the Healthy Human Spinal Cord. *Frontiers in Neurology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00238>
- Keynes, R. (2018). Patterning spinal nerves and vertebral bones. *Journal of Anatomy*, 232(4), 534-539. <https://doi.org/10.1111/joa.12714>
- Klopfleisch, R., Deetzen, M. von, Weiss, A. Th., Weigner, J., Weigner, F., Plendl, J., & Gruber, A. D. (2013). Weigners Fixative—An Alternative to Formalin Fixation for Histology With Improved Preservation of Nucleic Acids. *Veterinary Pathology*, 50(1), 191-199. <https://doi.org/10.1177/0300985812441031>
- Leijnse, J. N., & D'Herde, K. (2016). Revisiting the segmental organization of the human spinal cord. *Journal of Anatomy*, 229(3), 384-393. <https://doi.org/10.1111/joa.12493>
- Lundell, H., Barthelemy, D., Skimminge, A., Dyrby, T. B., Biering-Sørensen, F., & Nielsen, J. B. (2011). Independent spinal cord atrophy measures correlate to motor and sensory deficits in individuals with spinal cord injury. *Spinal Cord*, 49(1), 70-75. <https://doi.org/10.1038/sc.2010.87>
- Nunès, A., Glaudot, G., Lété, A., Balci, A., Lengelé, B., Behets, C., & Jankovski, A. (2023). Measurements and morphometric landmarks of the human spinal cord : A cadaveric study. *Clinical Anatomy*, 36(4), 631-640. <https://doi.org/10.1002/ca.24010>
- Stroman, P. W., Bosma, R. L., Kornelsen, J., Lawrence-Dewar, J., Wheeler-Kingshott, C., Cadotte, D., & Fehlings, M. G. (2012). Advanced MR imaging techniques and characterization of residual anatomy. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 114(5), 460-470. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2012.01.003>

Abstract

Introduction : Les connaissances sur la topographie et l'anatomie de la moelle spinale restent encore limitées à ce jour. Le but de cette étude est de créer une base de données de largeur, d'épaisseur et de longueur de moelles spinales humaines mesurées à intervalles réguliers (tous les demi-cm) depuis le dernier segment sacré jusqu'au deuxième segment cervical afin de permettre une meilleure localisation des segments médullaires à l'imagerie médicale.

Matériel et Méthode : Une prise de mesure (largeur, épaisseur et longueur) sur un échantillon de 26 moelles spinales humaines a permis d'établir une base de données sur laquelle différents calculs et tests statistiques ont été effectués. L'échantillon a été classé par ordre croissant de longueur totale (entre 33 et 42 cm) et divisé en trois sous-groupes.

Résultats et discussion : Les résultats obtenus ont été représentés sous forme de graphiques combinant les mesures effectuées à intervalles réguliers et au niveau de chaque segment, et ce dans l'ensemble de l'échantillon et dans les 3 sous-groupes. C'est le deuxième sous-groupe qui était le plus représentatif de la moelle spinale. Les données recueillies ont permis de mieux localiser les différents points d'inflexion et culminants d'élargissement ainsi que d'épaississement. L'étude s'est finalement concentrée sur les longueurs de chaque segment et sur la proportion qu'ils occupent sur la longueur totale. La proportion est assez régulière d'un sous-groupe à l'autre.

Conclusion : La représentation médullaire est plus fiable avec les mesures prises chaque segment que celles prises à intervalles réguliers. Il serait intéressant d'affiner la précision de la localisation segmentaire notamment au niveau des angles et des pentes d'inflexion.