

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE.
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE.
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU.
FACULTÉ DE MÉDECINE.
LABORATOIRE D'ANATOMIE GÉNÉRALE.**



THÈSE

PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU DOCTORAT EN SCIENCES MÉDICALES

**LA MODÉLISATION ANATOMIQUE
TRIDIMENSIONNELLE DU RACHIS THORACIQUE :
INTÉRÊTS PÉDAGOGIQUES ET CLINIQUES.**

**Présentée par
YEBDRI Malika épouse CHABANE
Maitre assistante en anatomie générale**

Membres du jury

Monsieur le Professeur BABA-AHMED Mustapha.....Président

Monsieur le Professeur GHEBRIOUT Boudjemaa.....Directeur

Monsieur le Professeur MELBOUCI YoucefExaminateur

Madame le professeur BOUDINE Leila..... Examinatrice

Monsieur le Professeur MOUALEK Samir..... Examinateur

Année 2020

**LA MODÉLISATION ANATOMIQUE
TRIDIMENSIONNELLE DU RACHIS THORACIQUE :
INTÉRÊTS PÉDAGOGIQUES ET CLINIQUES.**

DÉDICACES

À

Mes parents ; merci pour l'amour et l'éducation que vous m'avez offerts, j'espère avoir été à la hauteur de vos sacrifices.

Mon mari ; soutien indéfectible et sans limites.

Mes enfants ; Célia, Sadi, et Louisa toujours là pour m'encourager et me dynamiser.

Mes frères et sœurs, toujours dans mon cœur.

Ma belle famille, avec toute mon affection.

Mes beaux frères, belles sœurs, neveux et nièces avec tout mon attachement.

À

Joseph Paul Jernigan

En donnant votre corps à la science vous avez contribué à la réalisation du projet VHP, origine de la dissection virtuelle.

REMERCIEMENTS

Je souhaite avant tout remercier mon directeur de thèse, le **Pr GHEBRIOUT Boudjema**, professeur d'anatomie générale à la faculté de médecine d'Oran pour avoir accepté de diriger mon travail de recherche.

Vos directives, conseils et encouragements ont été pour moi un véritable moteur. Il suffisait d'un mail ou d'un entretien téléphonique pour booster mes ressources et stimuler ma créativité. Votre bienveillance, votre gentillesse ainsi que l'accueil chaleureux auquel j'avais le droit à chacune de mes visites à Oran sont gravés à tout jamais dans mon cœur. Encore merci Professeur pour la confiance que vous avait eu en moi.

Je remercie les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail :

Monsieur le **Professeur BABA-AHMED Mustapha**, Professeur en anatomie générale, faculté de médecine d'Oran. Merci professeur d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de ma thèse de doctorat. Croyez cher maître en mon profond respect.

Monsieur le **Professeur MELBOUCI Youcef**, Professeur chef de service de chirurgie traumatologique, CHU de Tizi-Ouzou, faculté de médecine de Tizi-Ouzou. Vous me faites l'honneur de participer à ce jury, votre expertise est une valeur ajoutée dont je suis très fière, vos remarques furent très constructives et toujours pertinentes, merci pour le temps consacré à examiner ce travail.

Madame le **Professeur BOUDINE Leïla**, Maître de conférence A en Anatomie générale, faculté de médecine BENYOUCEF Benkhedda, université d'Alger 1. Vous avez jugé et évalué cette thèse avec beaucoup de rigueur, vos commentaires furent très utiles, recevez mes sincères remerciements.

Monsieur le **Professeur MOUALEK Samir**, Maître de conférence A en Anatomie générale, faculté de médecine d'Oran. Vous me faites l'honneur d'évaluer et d'expertiser ce travail, vos conseils avisés furent un réel enrichissement, ils m'ont permis d'échafauder de nouvelles idées de travail. Je vous en remercie grandement.

Mes remerciements vont aussi:

Au **Docteur MESSAD Malika** avec qui je partage ma carrière d'anatomiste générale depuis 30 ans. Ton œil critique et la justesse de tes remarques sont une valeur inestimable.

Au **Dr CHIALI Hakim**, spécialiste en anatomie générale faculté de médecine de Tlemcen. Dr CHIALI, vous m'avez accueillie chez vous, dans votre belle ville de Tlemcen et offert votre aide chaque fois que je vous le demandais. Merci infiniment.

Un remerciement particulier à monsieur **OUSSALEM Mohand Ouamar** pour la remarquable traduction tamazight du résumé.

A **monsieur KABACHE** technicien supérieur de santé, service de radiologie du CHU NÉDIR Mohamed de Tizi-Ouzou, sa contribution à la création de la base de données scannographie fut une aide précieuse.

A Messieurs les techniciens du laboratoire d'Anatomie générale, faculté de médecine Benyoucef BENKHEDDA, université d'Alger 1, **Merzak et Mohamed**. Votre gentillesse et votre disponibilité m'ont énormément touchées.

A tous les anatomistes du laboratoire d'anatomie générale de la faculté de médecine d'Oran, l'ambiance et la fraternité qui règne dans votre équipe est un modèle louable et enviable.

A mes amis anatomistes de Tizi-Ouzou, Béjaïa, Alger, Blida, Constantine, Annaba, Tlemcen, Sidi-Bellabes, Laghouat.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
ÉTAT ACTUEL DES CONNAISSANCES.....	2
PROBLÉMATIQUEs.....	3
OBJECTIFS.....	4

PARTIE THÉORIQUE

PARTIE 1. EMBRYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

A. ÉTAPES DU DÉVELOPPEMENT DU RACHIS THORACIQUE.....	5
I. TROISIÈME SEMAINE INTRA UTÉRINE : FORMATION DU DISQUE TRIDERMIQUE.....	5
II. QUATRIÈME SEMAINE INTRA UTÉRINE : DÉBUT DE L'ORGANOGENÈSE.....	5
III. CINQUIÈME SEMAINE INTRA-UTÉRINE : ÉVOLUTION DU MYOTOME.....	8
IV. SIXIÈME ET SEPTIÈME SEMAINES INTRA-UTÉRINE : CHONDRIFICATION DES VERTÈBRES.....	8
V. HUITIÈME SEMAINE INTRA-UTÉRINE: OSSIFICATION DES VERTÈBRES.....	9
B. MALFORMATIONS VERTÉBRALES.....	10
I. MALFORMATIONS VERTÉBRO-MÉDULLAIRES.....	10
II. MALFORMATIONS CONGÉNITALES DES VERTÈBRES.....	10
C. CROISSANCE DU RACHIS THORACIQUE.....	13

PARTIE 2. ANATOMIE DU RACHIS THORACIQUE.

A. RACHIS DANS SON ENSEMBLE.....	14
I. SITUATION ET SUBDIVISION.....	14
II. DÉSIGNATION DES VERTÈBRES.....	14
III. LES COURBURES RACHIDIENNES.....	14
B. OSTÉOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE.....	17
I. DESCRIPTION DE LA VERTÈBRE TYPE.....	18
II. DESCRIPTION DE LA VERTÈBRE THORACIQUE.....	20
III. CARACTÈRES PARTICULIERS À CERTAINES VERTÈBRES.....	23
C. STRUCTURE DES VERTÈBRES.....	25
D. ARTHROLOGIE DU RACHIS THORACIQUE.....	27
I. ARTICULATION DISCO-CORPORÉALE.....	27
II. ARTICULATIONS DE L'ARC NEURAL.....	31

III.	ARTICULATIONS COSTO-VERTÉBRALES.....	33
E.	MYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE.....	37
I.	MUSCLES DU DOS.....	37
II.	FASCIAS DU DOS.....	46
F.	RAPPORTS DU RACHIS THORACIQUE.....	49
I.	RAPPORTS EXTRINSÈQUES.....	49
II.	RAPPORTS INTRINSÈQUES.....	55
G.	VASCULARISATION DU RACHIS THORACIQUE.....	56
I.	VASCULARISATION ARTÉRIELLE.....	56
II.	DRAINAGE VEINEUX.....	57
III.	DRAINAGE LYMPHATIQUE.....	59
H.	INNERVATION DU RACHIS THORACIQUE.....	61
I.	ANATOMIE FONCTIONNELLE DU RACHIS THORACIQUE.....	63
I.	MOUVEMENTS DANS LE PLAN CORONAL.....	64
II.	MOUVEMENTS DANS LE PLAN TRANSVERSAL.....	64
III.	MOUVEMENTS DANS LE PLAN SAGITTAL.....	64
IV.	MOUVEMENTS DES ARTICULATIONS COSTO-VERTÉBRALES.....	65
J.	ANATOMIE RADIOLOGIQUE DU RACHIS THORACIQUE.....	66
I.	RADIOGRAPHIE STANDARD.....	66
II.	TOMODENSITOMÉTRIE DU RACHIS THORACIQUE.....	68
III.	IMAGERIE PAR RÉSONNANCE MAGNÉTIQUE.....	72
K.	ANATOMIE COMPARÉE.....	74
I.	PLACE DE L'HOMME DANS LE RÈGNE ANIMAL.....	74
II.	INTÉRÊT DE L'ÉTUDE DE L'ANATOMIE COMPARÉE DU RACHIS...	74
III.	ANATOMIE DU RACHIS DANS LE RÈGNE ANIMAL.....	74

PARTIE 3. LA MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE.

A.	MODÈLES ANATOMIQUES TRIDIMENSIONNELS POUR L'ENSEIGNEMENT.....	80
I.	PROJET VISIBLE HUMAN.....	80
II.	MODÈLES ET APPLICATIONS ANATOMIQUES 3D.....	82
III.	MÉTHODES DE RECONSTRUCTION DE MODÈLE 3D.....	83
B.	MODÈLES MORPHOLOGIQUES 3D POUR LA CLINIQUE.....	85

PARTIE PRATIQUE

ORGANISATION DE LA PARTIE PRATIQUE.....	88
---	----

A. MODÉLISATION 3 D DU RACHIS THORACIQUE POUR LA PÉDAGOGIE.

I. INTRODUCTION.....	89
II. OBJECTIFS.....	89
III. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	89
1. Structures d'intérêt.....	89
2. Travail préparatoire sur la base de données.....	89
3. Identification des structures à segmenter.....	92
4. Gestion et organisation des fichiers 3D.....	92
5. Création du modèle 3D à l'aide du logiciel WinSurf.....	92
6. Sauvegarde des fichiers.....	98
7. Réalisation d'animations.....	98
8. Illustrations anatomiques.....	98
IV. RÉSULTATS.....	99
1. Anatomie du modèle 3 D.....	99
2. Expertise du modèle.....	103
3. Illustration à partir de modèle 3 D.....	104
V. DISCUSSION.....	105
VI. CONCLUSION.....	107

B. ATLAS MORPHOLOGIQUE 3 D DES FRACTURES VERTÉBRALES OSTÉOPOROTIQUES.

I. INTRODUCTION.....	108
II. OBJECTIFS.....	108
III. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	108
1. Matériel.....	108
2. Méthodes.....	108
3. Critères d'inclusion.....	109
4. Critères d'exclusion.....	109
5. Création de l'atlas morphologique 3D des fractures vertébrales ostéoporotiques.....	109
6. Contribution à la création de la base de données normative nationale des hauteurs vertébrales.....	110
IV. RÉSULTATS.....	112
1. Statistiques descriptives.....	112
2. Étude de la prévalence de la fracture vertébrale et création de l'atlas morphologique.....	115
3. Contribution à la création de la base de données normatives nationales des hauteurs vertébrales.....	130
V. DISCUSSION.....	135

1. Étude de la prévalence de la fracture vertébrale et création de l'atlas 3D.....	135
2. Base de données normatives des hauteurs vertébrales.....	137
VI. CONCLUSION.....	138

C. MORPHOMÉTRIE SUR MODÈLE ANATOMIQUE TRIDIMENSIONNEL

I. INTRODUCTION.....	138
II. OBJECTIFS.....	138
III. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	138
IV. RÉSULTATS.....	140
V. DISCUSSION.....	141
VI. CONCLUSION.....	141

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS.....	142
---	------------

CONCLUSION GÉNÉRALE	143
----------------------------------	------------

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

A. INTRODUCTION.

La place accordée aux nouvelles technologies dans la refonte des études médicales de 2018 témoigne de l'intérêt porté par la tutelle pour la généralisation de l'utilisation de l'informatique pour la formation du corps médical. La création et l'institution de plateformes de formation numérique confirme l'orientation prise par le ministère de l'enseignement supérieur pour répondre à la démocratisation de l'université. À l'ère des technologies de l'information et de la communication (TIC), enseignants et étudiants sont contraints de s'adapter aux évolutions technologiques, si le premier est appelé à changer ses modalités d'enseigner le second est impliqué activement dans son apprentissage et la construction de ses connaissances.

L'enseignement de l'anatomie est la pierre angulaire des cursus des sciences de la santé, c'est une discipline fondamentale qui initie à la découverte des structures du corps humain et permet d'acquérir via la *Nomina Anatomica* le vocabulaire de base du langage médical. C'est dans un souci de modernisation que les anatomistes algériens se tournent actuellement vers l'anatomie numérique et la modélisation morphologique tridimensionnelle, comme en témoigne la création en 2012 d'une unité de modélisation 3D au laboratoire d'anatomie générale d'Oran 1 et en 2014 la chaire UNESCO d'anatomie numérique.

A travers cette thèse, intitulée la modélisation anatomique tridimensionnelle du rachis thoracique : intérêts pédagogiques et cliniques, nous souhaitons explorer les divers champs d'applications de la technologie 3D en morphologie. Nous avons choisi pour cela une structure anatomique difficile à appréhender, comportant des éléments de nature différente : le rachis.

Notre travail comporte :

Une partie théorique composée de deux volets ;

- l'un consacré de manière détaillée à l'anatomie du rachis thoracique par une revue de la littérature sur des ouvrages anatomiques anciens et modernes, mais également par interrogation des bases de données du système national de documentation en ligne (SNDL) à savoir Springer, Science direct, Medline et l'Encyclopédie Médico-Chirurgicale. La littérature grise, non référencée, a également été passée en revue.
- l'autre dédié à la modélisation 3D. Nous montrerons que parmi les ressources pédagogiques disponibles pour l'enseignement de l'anatomie, cet outil est largement plébiscité: étudiants et enseignants s'accordent pour le désigner comme un complément clair et interactif du cours magistral.

Une partie pratique dédiée aux trois champs d'application de la technologie 3 D en anatomie par:

- La création pour la pédagogie d'un modèle tridimensionnel du rachis thoracique à partir des coupes cadavériques de *Visible Human Project*, base de données d'images numériques de coupes cadavériques, largement utilisée dans le monde pour la réalisation de projets de pédagogie et de simulation numérique
- La création pour la clinique d'un atlas morphologique 3 D des fractures vertébrales non traumatiques, par l'étude de sa prévalence sur une base de données TDM-TAP, créé pour cette thèse, au CHU de Tizi-Ouzou sur une période de six mois. Nous montrerons comment en clinique pour une pathologie telle que l'ostéoporose, la modélisation 3D peut être utile au diagnostic. Cette étude nous a également permis de créer une base de données normative des hauteurs vertébrales.
- L'évaluation pour la biométrie tridimensionnelle de la répétabilité, reproductibilité et concordance de la mophométrie vertébrale 2D versus 3D.

B. ÉTAT ACTUEL DES CONNAISSANCES

La technologie 3D basée sur la construction de modèles tridimensionnels est un domaine en plein essor, à partir de fichiers numériques il est possible de créer des modèles interactifs manipulables dans les trois plans de l'espace, mais aussi de fabriquer des modèles physiques à l'identique par impression 3D (prototypage ou *printing*).

De très nombreux secteurs d'activités se sont approprié cette technologie, notamment :

- l'industrie automobile pour la simulation, l'accidentologie et la fabrication de pièces détachées),
- le *gaming* (pour la conception de jeux vidéo et d'animation),
- l'apprentissage et la formation par mise en situation : pilotes d'avion, pompiers,
- l'architecture,
- le tourisme (visites de sites et musées virtuels) etc...

En médecine cette technologie présente aujourd'hui un large champ d'application :

- la didactique, par la réalisation de modèles 3D maniables et interférents, facilitant la représentation et la mémorisation,
- L'impression 3D pour la fabrication de prothèses, d'implants et de maquettes pédagogiques,
- la conception de plateformes de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour le « e-learning »,
- la simulation biomécanique et chirurgicale pour le « training ».

La généralisation des micro-ordinateurs, smartphones, tablettes et l'accès à Internet, facilitent la diffusion et le partage de cette technologie digitale, ceci ne devrait que croître dans le futur.

La valeur et la richesse d'un modèle numérique dépend de sa capacité à simuler un modèle réel, leur puissance est parallèle à leur niveau de réalisme.

En anatomie, cette technologie est un support à l'enseignement, non seulement elle facilite l'apprentissage par la visualisation et la représentation des objets dans l'espace, mais aussi par l'interaction qu'elle autorise. Depuis près de deux décennies, les anatomistes explorent les nouveaux axes de recherche qui en découlent. Ces derniers concernent essentiellement l'anatomie descriptive et fonctionnelle, mais aussi la morpho-biométrie.

Les données de l'imagerie médicale sont une ressource précieuse, pour la création de reconstruction 3D, elles permettent de mettre à jour de nouvelles variations, et de créer des modèles 3D divers et variés.

Savoir anatomique, logiciels informatiques et imagerie médicale s'allient et offrent une nouvelle approche dans l'étude des sciences morphologiques.

C. PROBLÉMATIQUES

I. PROBLÉMATIQUE PÉDAGOGIQUE.

Quelles que soit l'objectif et les finalités d'utilisation des modèles anatomiques numériques 3D, ils nécessitent toujours la création de modèles fidèles et identiques dans les moindres détails à ceux du corps humain. Une expertise anatomique est donc requise lors de leur conception, c'est un préalable indispensable, notamment en pédagogie pour l'enseignement de l'anatomie tridimensionnelle. La majorité des applications digitales utilisées par nos étudiants sont conçues par des programmeurs informatiques, d'où la question de leur fiabilité pour la formation.

II. PROBLÉMATIQUE CLINIQUE:

Le diagnostic de fracture vertébrale non traumatique, dont l'ostéoporose est la plus grande pourvoyeuse, est important. Cette fracture est le reflet de l'état de santé du tissu osseux. Sa reconnaissance sur les images radiographiques est essentielle car elle justifie une prise en charge thérapeutique et un suivi. En pratique clinique son identification est visuelle, aidée de l'atlas morphologique 2 D de Genant qui grade et classe la vertèbre fracturée. Les reconstructions 3D d'exams d'imagerie sont de plus en plus souvent pratiquées en radiologie pour améliorer le diagnostic et la prise en charge des patients. Nous n'avons pas retrouvé dans la littérature d'atlas 3 D analogue à celui de Genant. Au regard des enjeux socio-économiques liés à l'ostéoporose, il est utile de proposer aux cliniciens, notamment aux radiologues un outil supplémentaire d'aide au diagnostic.

D. OBJECTIFS

Le présent travail se fixe comme objectifs d'explorer la modélisation 3 D :

I. OBJECTIF PRINCIPAL.

Construction d'un atlas morphologique 3D des fractures vertébrales non traumatiques d'aide au diagnostic.

II. OBJECTIFS SECONDAIRES.

- La construction d'un modèle 3D du rachis thoracique à partir de la base de données « Visible Human Project » dans un but pédagogique.
- Évaluer le potentiel de la morphométrie tridimensionnel, en vue d'impression 3D de modèles physiques.

PARTIE THÉORIQUE

EMBRYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE.

C'est au niveau du rachis que l'organisation segmentaire des vertébrés est la mieux représentée. Chaque vertèbre se développe à partir des somites, structures mésenchymateuses qui s'ajoutent comme des perles sur un fil, de chaque côté du tube neural et de la notochorde [1]. Le développement du rachis et du système nerveux sont deux phénomènes concomitants et synchronisés ce qui explique la coexistence d'anomalies congénitales vertébrales et neurales. Le développement du rachis suit 4 stades évolutifs ; notochordal, mésenchymateux, cartilagineux et osseux, échelonnés de la 3^{ème} à la 8^{ème} semaine de la vie embryonnaire. L'ossification secondaire a lieu à la puberté et s'étend de 16 à 25 ans.

A. ÉTAPES DU DÉVELOPPEMENT DU RACHIS THORACIQUE.

I. TROISIÈME SEMAINE INTRA-UTÉRINE: FORMATION DU DISQUE TRIDERMIQUE.

Durant la 3^{ème} semaine du développement embryonnaire (17^{ème} jour) par phénomène de gastrulation les trois feuillets embryonnaires (ectoblaste, mésoblaste, entoblaste) se mettent en place (Fig.1).

L'évolution du rachis et du système nerveux se déroule simultanément:

- Le mésoblaste se différencie en mésoblaste para-axial, intermédiaire et latéral.
- Le mésoblaste para-axial forme la chorde dorsale ou notochorde. Elle représente l'axe dorsal primitif et temporaire de l'embryon. Elle sera remplacée par les corps vertébraux.
- La plaque neurale à l'origine du système nerveux se met en place c'est la phase pré-neurale.

II. QUATRIÈME SEMAINE INTRA-UTÉRINE: DÉBUT DE L'ORGANOGENÈSE.

- Le mésoblaste para-axial subit une segmentation (métamérisation) aboutissant à la formation des somites. Ce sont des blocs de cellules mésenchymateuses à l'origine de la plupart des muscles, des os et du derme du corps humain.
- La plaque neurale, s'étire caudalement du 22 au 26 jour, 90% du développement spinal se fait à cette période. La gouttière neurale et les crêtes neurales se mettent en place, c'est la phase de neurulation primaire [2]. La fermeture de la gouttière neurale débute au centre et s'étend progressivement vers les extrémités. La fermeture du neuropore caudal a lieu à J27.

1. Formation et devenir des somites.

La métamérisation et la segmentation du mésoblaste para-axial en somite s'effectuent de manière progressive en direction crânio-caudale du 21^{ème} au 35^{ème} jour. Les somites sont des amas cellulaires disposés par paire de part et d'autre du tube neural et de la chorde. Ils apparaissent au rythme 3 à 4 somites par jour, à la fin de la 5^{ème} semaine 42 paires de somites sont disposés le long de la chorde [3]. Les somites les plus caudaux sont appelés à disparaître. Au final il ne reste que 37 paires de somites qui se répartissent de la manière suivante [4] :

PARTIE THÉORIQUE, PARTIE 1 : EMBRYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

- Les 4 premiers somites forment la région occipitale : os occipital, ligament alaire, atlas, axis.
 - Les 8 paires de somites suivantes forment les vertèbres cervicales.
 - Les 12 paires thoraciques sont à l'origine des vertèbres thoraciques, des muscles, des os de la paroi thoracique, et d'une partie de la paroi abdominale.
 - Les 5 somites lombaux forment; les vertèbres lombales, le derme et les muscles de l'abdomen.
 - Les 5 somites sacraux forment ; le sacrum, le derme et les muscles de la région sacrale.
- Les 3 somites coccygiens sont à l'origine du coccyx.

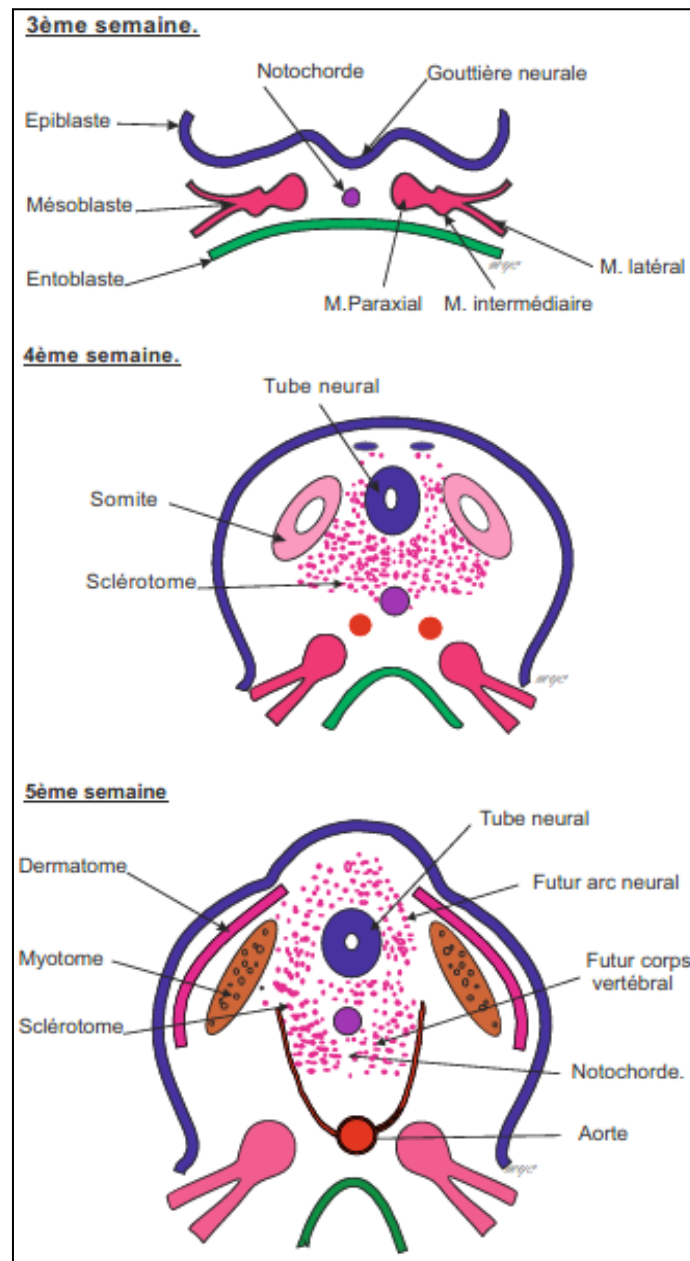


Figure 1: Coupes axiales d'embryon, à divers stade du developpement [D'après Poirier J [4]].

PARTIE THÉORIQUE, PARTIE 1 : EMBRYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

Les somites sont des organes temporaires [5], quelques heures après leur formation ils se subdivisent en sclérotome, myotome et dermatome.

2. Sclérotome

2-1. Formation des vertèbres

Les sclérotomes dérivent de la partie médiale des somites (Fig. 01), ils sont à l'origine du squelette axial et des côtes. Les cellules sclérotomiales migrent en direction de la corde et du tube neural, elles se disposent de manière segmentaire le long du tube neural et sont à l'origine de la formation du corps vertébral ventralement, de l'arc neural dorsalement (Fig. 02).

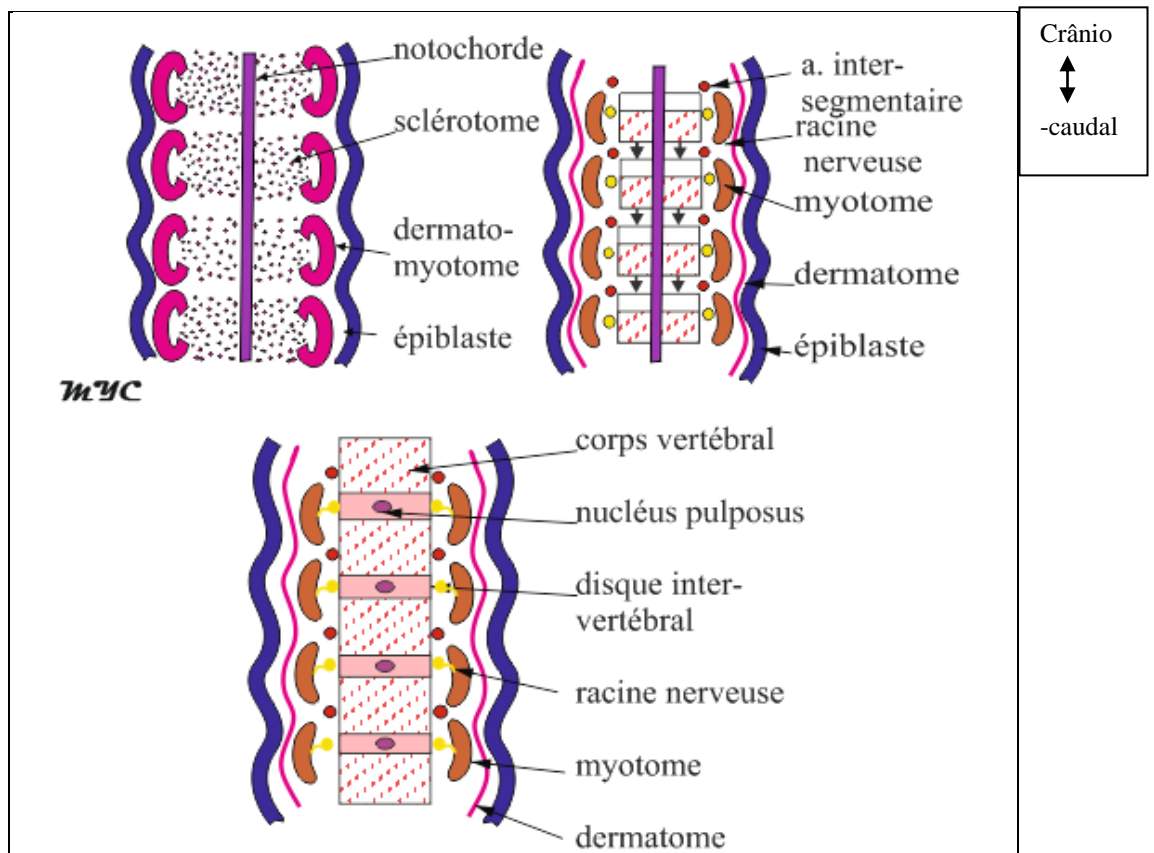


Figure 2: Formation des vertèbres et du disque intervertébral, coupe coronale de la corde [D'après Poirier J [4]].

Le déplacement cellulaire s'effectue sous l'influence d'inducteurs sécrétés par la corde ou le tube neural [6]. Les sclérotomes sont séparés par une zone de moindre densité qui livre passage aux artères intersegmentaires.

Un segment ou métamère est formé d'un somite, d'un massif de sclérotome et d'un nerf spinal.

Après que les sclérotomes aient rejoint la corde chacun d'eux se scinde en une partie crâniale et l'autre caudale s'écartant l'une de l'autre pour laisser passer le nerf spinal [2]. Une recombinaison et fusion des sclérotomes s'en suit :

PARTIE THÉORIQUE, PARTIE 1 : EMBRYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

Les portions crâniale et caudale de chaque sclérotome se séparent et se soudent aux parties correspondantes des sclérotomes sus et sous jacents. Chaque corps vertébral présente ainsi une origine inter segmentaire. Le corps vertébral ou centrum résulte de la fusion de deux demi-sclérotomes adjacents [7], c'est le phénomène de resegmentation. Le pédicule provient de l'allongement ventro-médiale de l'arc neural en direction du centrum. Les lames sont issues de l'allongement dorso-médial de l'arc neural, elles fusionnent entre elles dorsalement et se prolongent pour former le processus épineux. Des prolongements crâniens et caudaux de l'arc postérieur sont à l'origine des articulations zygapophysaires. Les prolongements latéraux forment les processus transverses.

2-2. Formation du disque intervertébral (DIV).

L'espace compris entre l'écartement des portions crâniale et caudale du sclérotome est à l'origine du DIV [8]. Des cellules sclérotomiales occupent l'espace situé autour de la corde, elles forment un anneau périphérique : l'annulus fibrosus. Au centre, la corde dégénère et laisse place au nucléus pulposus dont il est l'unique reliquat (Fig. 02).

Le nucléus pulposus dérive de la corde, l'annulus fibrosus du sclérotome.

2-3. Formation des côtes.

Les côtes sont des processus vertébraux latéraux qui s'étendent en direction ventro-latérale vers la paroi ventrale du corps, elles n'existent qu'à l'étage thoracique. La partie proximale de la côte dérive de la partie centrale du sclérotome, elle est d'origine épaxiale et provient d'un même somite, elle n'est pas concernée par la resegmentation. La partie distale est issue de la partie latérale hypaxiale du sclérotome [1].

3. Dermatomo-myotome.

La partie dorsale du somite est à l'origine du dermatomo-myotome. Le myotome épaxial dérive du 1/3 médial de ce dernier alors et le myotome hypaxial dérive de la partie intermédiaire et du 1/3 latéral. Le dermatome migre vers le feuillet externe de l'embryon et forme le tissu conjonctif de la peau et du derme. Les muscles du squelette axial, des parois du tronc et des membres dérivent des somites.

III. CINQUIÈME SEMAINE INTRA-UTÉRINE : ÉVOLUTION DU MYOTOME

Le myotome à l'origine des muscles évolue considérablement [9], il se dispose sur deux colonnes [10] [11] :

- Les myotomes épaxiaux occupent la partie dorso-médiale du somite et forment l'épimère dorsale, elle est à l'origine des muscles intrinsèques du rachis (muscles extenseurs) qui restent sur place lors du développement embryonnaire.
- Les myotomes hypaxiaux se situent à la partie ventro-latérale pour former l'hypomère ventral, à l'origine des muscles fléchisseurs ventraux et latéraux du tronc (muscles prévertébraux, intercostaux et de la paroi abdominale) qui migrent secondairement vers le dos [12].
- Le nerf spinal se divise en branche ventrale et dorsale parallèlement à la division du myotome (Fig. 03).
 - L'épimère reçoit son innervation de la branche dorsale du nerf spinal.
 - L'hypomère est innervé par la branche ventrale [13].

PARTIE THÉORIQUE, PARTIE 1 : EMBRYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

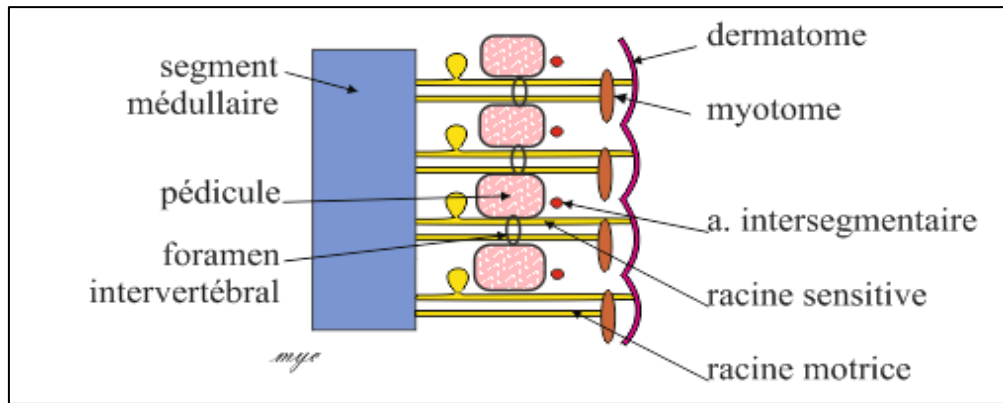


Figure 3: Organisation des métamères [D'après Poirier J [4]].

IV. SIXIÈME ET SEPTIÈME SEMAINES INTRA-UTÉRINES: CHONDRIFICATION DES VERTÈBRES.

Les cellules mésenchymateuses se transforment en chondroblastes. Un centre de chondrification se met alors en place dans le corps vertébral [14], et un autre dans chaque arc neural (fig. 04).

V. HUITIÈME SEMAINE INTRA-UTÉRINE : OSSIFICATION DES VERTÈBRES.

L'ossification des vertèbres se produit durant la période de la vie fœtale de J 60 à la naissance et s'étend jusqu'à la fin de la croissance, elle est endochondrale. À la 8^{ème} semaine 33 à 34 vertèbres cartilagineuses en position fléchie sont en place [1].

L'ossification se fait à partir de trois centres d'ossification primaire (fig. 04) ;

- un centre d'ossification primaire médian dans le corps vertébral, provient de la fusion de deux centres primaires ventral et dorsal,
- un centre d'ossification primaire latéral dans chaque processus neural au niveau de chaque pédicule,
 - Les points d'ossifications primaires du corps vertébral apparaissent successivement au sein du cartilage. Ils s'installent d'abord dans la région thoracique basse [15] puis s'étendent
 - simultanément dans les deux directions crâniale et caudale atteignant le rachis sacral à la 22^{ème} semaine. L'ossification des arcs neuraux se fait dans une seule direction crânio-caudale [15]. Elle se fait par groupe, d'abord dans la région cervicale caudale ou thoracique crâniale, suivie d'un second groupe dans la région cervicale crâniale et enfin d'un troisième groupe dans les régions thoraciques caudale et lombale [16]. à la naissance, chaque vertèbre est constituée de trois parties osseuses séparées par du cartilage hyalin correspondant à la synchondrose intermédiaire située à la jonction du corps vertébral avec les pédicules : Le cartilage neurocentral. Ce cartilage assure la croissance de l'arc neural et l'élargissement du foramen vertébral, il se ferme à

PARTIE THÉORIQUE, PARTIE 1 : EMBRYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

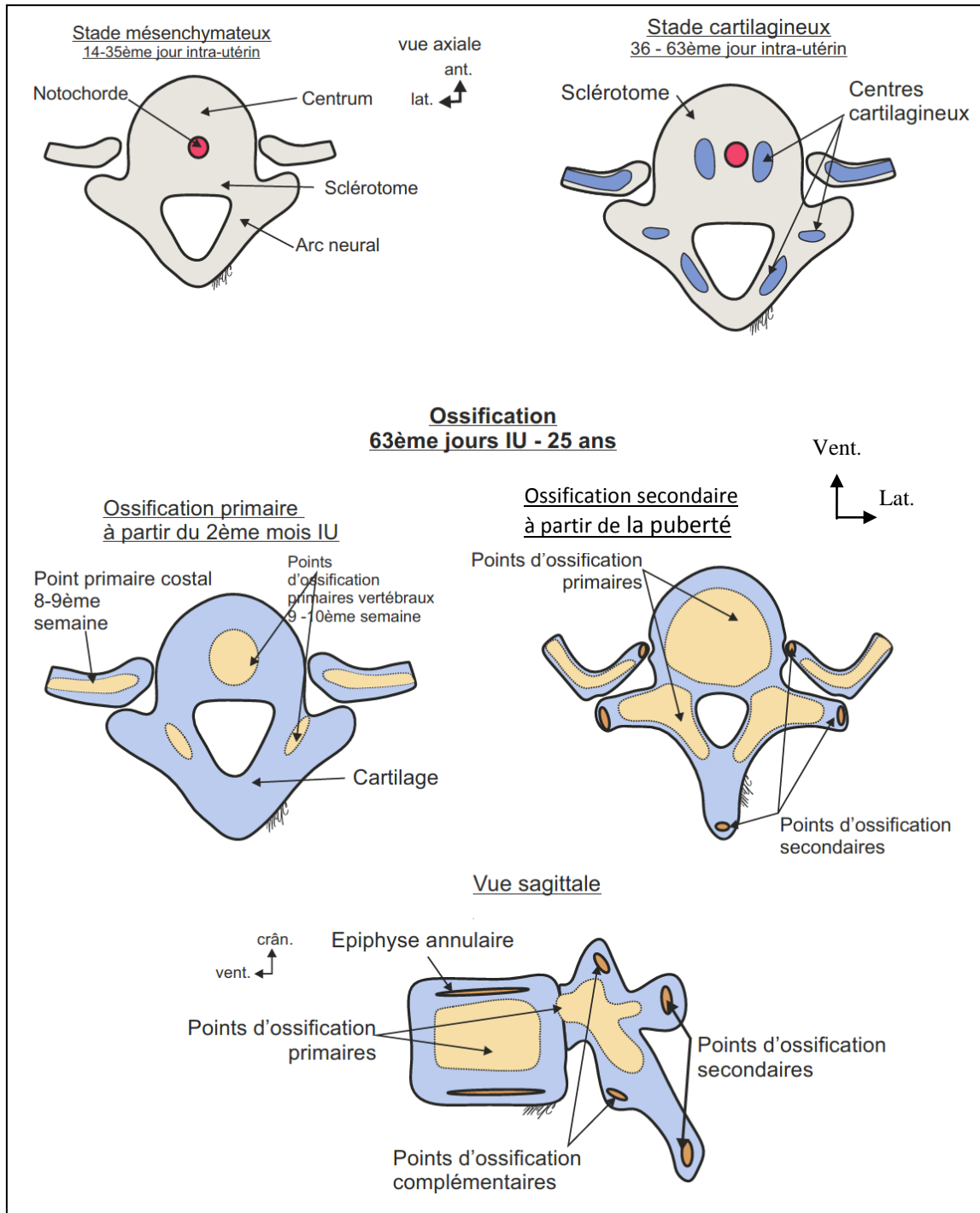


Figure 4: Développement du rachis. [Cramer DC et al [5]].

l'adolescence avec un maximum d'activité vers 5 ans [17] . Dorsalement l'arc vertébral reste déhiscent jusqu'à 8 ans, le diagnostic radiologique de spina bifida ne doit pas être posé avant cet âge [18].

À la puberté, des centres d'ossification secondaire se mettent en place : un sur les faces crâniale et caudale des plateaux vertébraux (cartilages apophysaires), un à la pointe de chaque processus vertébral (transverses, épineux, zygapophysaires).

À 25 ans l'ossification du rachis est achevée.

Les côtes cartilagineuses s'ossifient à partir de la 9^{ème} semaine, les centres primaires se situent près de l'angle de la côte [16].

B. MALFORMATIONS VERTÉBRALES.

Les malformations vertébrales se produisent très tôt, entre le 15^{ème} et le 26^{ème} jour du développement embryonnaire, au stade cartilagineux [16]. La mise en place du système nerveux à partir de la plaque neurale et des organes uro-génitaux dérivés du mésoblaste intermédiaire se fait de manière concomitante, d'où la coexistence fréquente de troubles neurologiques et d'anomalies multi organes associées aux anomalies vertébrales.

Les malformations vertébrales se divisent en deux groupes selon l'existence ou pas d'anomalies du tube neural:

I. MALFORMATIONS VERTÉBRO-MÉDULLAIRES.

Se sont les malformations vertébrales associées à des malformations de l'axe neural. Également appelées dysraphismes, elles sont secondaires à des perturbations durant la phase de gastrulations [19].

1. Dysraphisme ouvert, ou Spina bifida aperta,

il correspond à l'ouverture de l'arc vertébral postérieur avec extériorisation à la peau d'une partie ou de la totalité du névraxe [20]. Ces malformations résultent de l'absence de migration du mésoderme para-axial à la face dorsale de la chorde, conduisant à une absence de formation de l'arc neural et à une atrophie musculaire [2], le tube neural est visible en surface. La région lombo-sacrée est la plus concernée.

2. Dysraphisme fermé ou spina bifida occulta,

l'arc neural est ouvert mais il est recouvert par la peau qui présente des anomalies (poils, tuméfaction, pigmentation) [21].

II. MALFORMATIONS CONGÉNITALES DES VERTÈBRES.

Les malformations congénitales des vertèbres sont classées selon leur étiologie embryologique en [22]:

1. Malformations par défaut de formation:

1-1. Agénésie vertébrale.

L'agénésie vertébrale est l'absence de corps vertébral. C'est une anomalie rare, associée à un arc neural normal [23]. Les agénésies sacrales sont fréquentes [20].

1-2. Hypoplasie vertébrale.

L'hypoplasie vertébrale touche volontiers le corps vertébral, l'atteinte ventrale de la vertèbre conduit à la formation de vertèbre cunéiforme responsable de cyphose congénitale à potentiel d'aggravation élevé dans les mois ou années qui suivent.

1-3. Hémivertèbre.

PARTIE THÉORIQUE, PARTIE 1 : EMBRYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

L'hémivertèbre (Fig. 05) est une anomalie résultant de l'absence de formation d'un des deux centres cartilagineux du corps vertébral [24]. Un seul côté du corps vertébral se développe. Simple, double ou multiple (Fig. 06) elles sont parfois à l'origine de scoliose congénitale [25]. Plusieurs Hémivertèbres peuvent coexister, leur fréquence est plus élevée au niveau thoracique. Elles sont toujours associées à des anomalies de l'arc neural [23]. À l'imagerie l'hémivertèbre est triangulaire à sommet médio-sagittal.

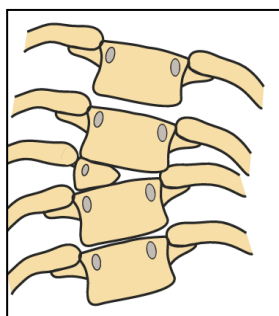


Figure 05: Hémivertèbre [D'après Cramer DC et al [5]].

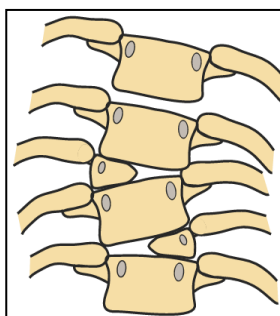


Figure 06 : Hémivertèbres multiples. [D'après Cramer DC et al [5]].

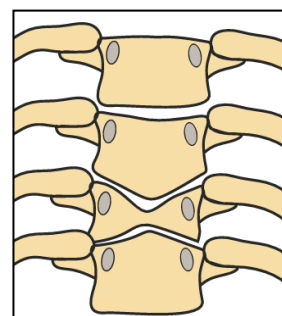


Figure 07 : Vertèbre papillon. [D'après Cramer DC et al [5]].

crân.
lat.

1-4. Vertèbre papillon.

La vertèbre papillon (Fig. 07) ou Rachischisis antérieure est rare [18] de découverte fortuite, elle est due à l'absence de fusion des points de chondrification sur la ligne médiane ventrale [26], le corps vertébral est formé de deux parties droite et gauche dont la forme rappelle les ailes d'un papillon. À l'imagerie elles peuvent être confondues avec une fracture tassement.

1-5. Côtes surnuméraires cervicale et lombale.

Les côtes surnuméraires sont la conséquence du développement complet du centre d'ossification costal de C7 ou de L1. Il s'agit de côtes rudimentaires, impliquées en C7 dans la compression des éléments vasculo-nerveux du membre thoracique dans la traversée cervico-thoraco-brachiale [27].

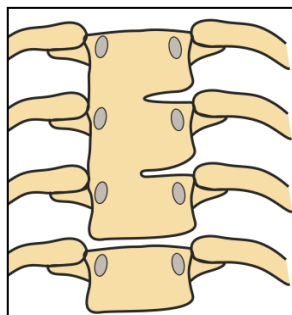


Figure 8 : Barre latérale. [D'après Cramer DC et al [5]].

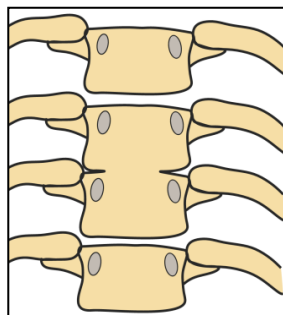


Figure 9 : Bloc Vertébral. [D'après Cramer DC et al [5]].



Photo 01 : Sacralisation de L5. [Reconstruction TDM image personnelle]

crân.
lat.

2. Malformations par défaut de segmentation :

2-1. Anomalies de nombre.

Quand elles existent les anomalies de nombres sont régionales et compensées. Elles concernent le rachis thoraco-lombal dans 10 à 20% des cas [28]. Sept vertèbres cervicales est un nombre constant.

2-2. Barres vertébrales.

Le défaut de segmentation est unilatéral (Fig.08), il concerne deux ou plusieurs vertèbres. Le côté sain poursuit sa croissance induisant des déformations rachidiennes.

2-3. Blocs vertébraux.

Les blocs vertébraux correspondent à la fusion de deux vertèbres voisines. Le corps vertébral, l'arc vertébral ou les deux sont concernés (Fig. 9). On explique cette anomalie par une absence bilatérale de segmentation.

2-4. Syndrome de Klippel Feil.

Ce syndrome correspond à la fusion d'une partie ou de la totalité de la vertèbre à l'étage cervical [29]. Il se caractérise cliniquement par la triade : cou court, réduction de la mobilité du rachis cervical, et une ligne de cheveux basse.

2-5. Lombalisation de S1.

L'absence de fusion entre S1 et S2 [24] libère S1, qui est ainsi une vertèbre libre et mobile.

2-6. Sacralisation de L5.

La sacralisation de L5 est la fusion de L5 au sacrum, elle peut être uni ou bilatérale et entraîner une sacralisation complète ou partielle (Photo 01).

2-7. Fusion articulaire,

La fusion sacro-coccygienne et intercoccygienne est fréquente.

3. Malformations par défaut d'induction :

L'origine mésoblastique, des vertèbres permet d'expliquer la coexistence de malformations vertébrales et viscérales. Le syndrome de VACTERL, syndrome polymalformatif, associe des anomalies vertébrale, ano-rectale, cardiaque, trachéo-œsophagienne, rénale et des difformités des membres [9]. Divers anomalies vertébrales peuvent être retrouvées au cours de ce syndrome : hémivertèbres ; fusions vertébrales ; vertèbres surnuméraires ou manquantes [16]. Le rachis thoracique est le plus fréquemment concerné et des anomalies costales sont également présentes.

C. CROISSANCE DU RACHIS THORACIQUE.

Le rachis thoracique présente deux poussées de croissances majeures. La poussée de croissance initiale se situe entre la naissance et la fin de la quatrième année de vie et la seconde entre 12 et 16 ans. Entre 4 et 12 ans, il y a une augmentation régulière mais plus lente de la hauteur thoracique [30]. La croissance longitudinale de la colonne thoracique est de 1,3 cm par an de la naissance à 5 ans, 0,7 cm par an de 5 à 10 ans et 1,1 cm par an pendant la puberté [31].

La croissance du tronc est le reflet de la croissance du rachis. La taille assise permet d'apprécier cette croissance : Le segment T1-S1 représente 50% de la taille assise, 2/3 pour le rachis thoracique et 1/3 pour le segment lombal.

A. LE RACHIS DANS SON ENSEMBLE.

Le rachis est le pilier central du corps humain. C'est une colonne poly-articulée qui supporte la tête en haut, et s'encastre entre les os coxaux en bas. C'est une longue tige formée par la superposition de 33 ou 34 pièces osseuses rigides et indéformables : les vertèbres. Un segment mobile rachidien, formé d'éléments souples et déformables (disques intervertébraux et ligaments) relie les 24 premières vertèbres. Une musculature très importante comptant plus de cent muscles, lui offre une mobilité dans les trois plans de l'espace.

En avant, le rachis transmet les pressions et sert de colonne d'appui, dotant l'organisme d'un axe flexible et rigide lui permettant de supporter le poids du corps, de maintenir les postures et de tenir en position érigée. En arrière le rachis oriente les mouvements et protège la moelle épinière. Dans les régions thoracique et pelvienne il joue un rôle de protection des viscères. Au repos ou en mouvement le rachis doit en toutes circonstances répondre à un impératif majeur, celui de la stabilité.

I. SITUATION ET SUBDIVISION.

Le rachis est placé à la partie dorso-médiane du corps, il traverse de haut en bas : le cou, le thorax, les lombes et la cavité pelvienne. Il se subdivise en 4 segments (Fig. 10) : cervical, thoracique, lombal et sacro-coccygien. Le rachis mobile pré-sacral, regroupe les trois premiers segments soit 24 vertèbres articulées ; le rachis immobile, formé des 5 vertèbres sacrales fusionnées et de 3 à 5 vertèbres coccygiennes.

II. DÉSIGNATION DES VERTÈBRES

Les vertèbres se désignent par leur nom numérique, de haut en bas on compte :
Vingt-quatre vertèbres mobiles ou vraies vertèbres.

- Sept vertèbres cervicales : C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7.
- Douze vertèbres thoraciques : T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12.
- Cinq vertèbres lombales : L1, L2, L3, L4, L5.

Neuf ou dix vertèbres immobiles ou fausses vertèbres.

- Cinq vertèbres sacrales soudées entre elles : S1, S2, S3, S4, S5.
- Trois à cinq vertèbres coccygiennes : Co1, Co2, Co3, Co4, Co5.

III. LES COURBURES DU RACHIS.

La station érigée et la bipédie ont modelé le profil du rachis. L'homme, unique représentant actuel du genre Homo, est capable de se tenir debout sur les deux membres pelviens, regard horizontal et marcher en équilibre sur de longues distances, grâce à la succession des courbures alternées du rachis, cet agencement ayant pour conséquence de limiter les dépenses énergétiques.

La forme des vertèbres, des DIV et l'action des muscles longs dorsaux permettent de contre-balancer l'action de la pesanteur, évitant la chute en avant. Les centres de gravité de la tête et du tronc se placent sur une même ligne verticale, sur la base de sustentation du bassin.

1. Plan frontal.

De face, le rachis est une structure verticale et rectiligne.

Une déviation latérale gauche est décrite, elle correspond à l'adossement de l'aorte. Elle est dénommée « empreinte de l'aorte » par Sappey et Cruveilhier, « courbure aortique » par Paturet, et « gouttière artérielle » par Charpy et Poirier.

2. Plan sagittal.

De profil, le rachis est une colonne ondulée en forme de S, présentant quatre courbures harmonieuses alternées :

- La courbure cervicale est une lordose concave dorsalement.
- La courbure thoracique est une cyphose concave ventralement.
- La courbure lombale est une lordose concave dorsalement.
- La courbure sacro-coccygienne, est une cyphose concave ventralement.

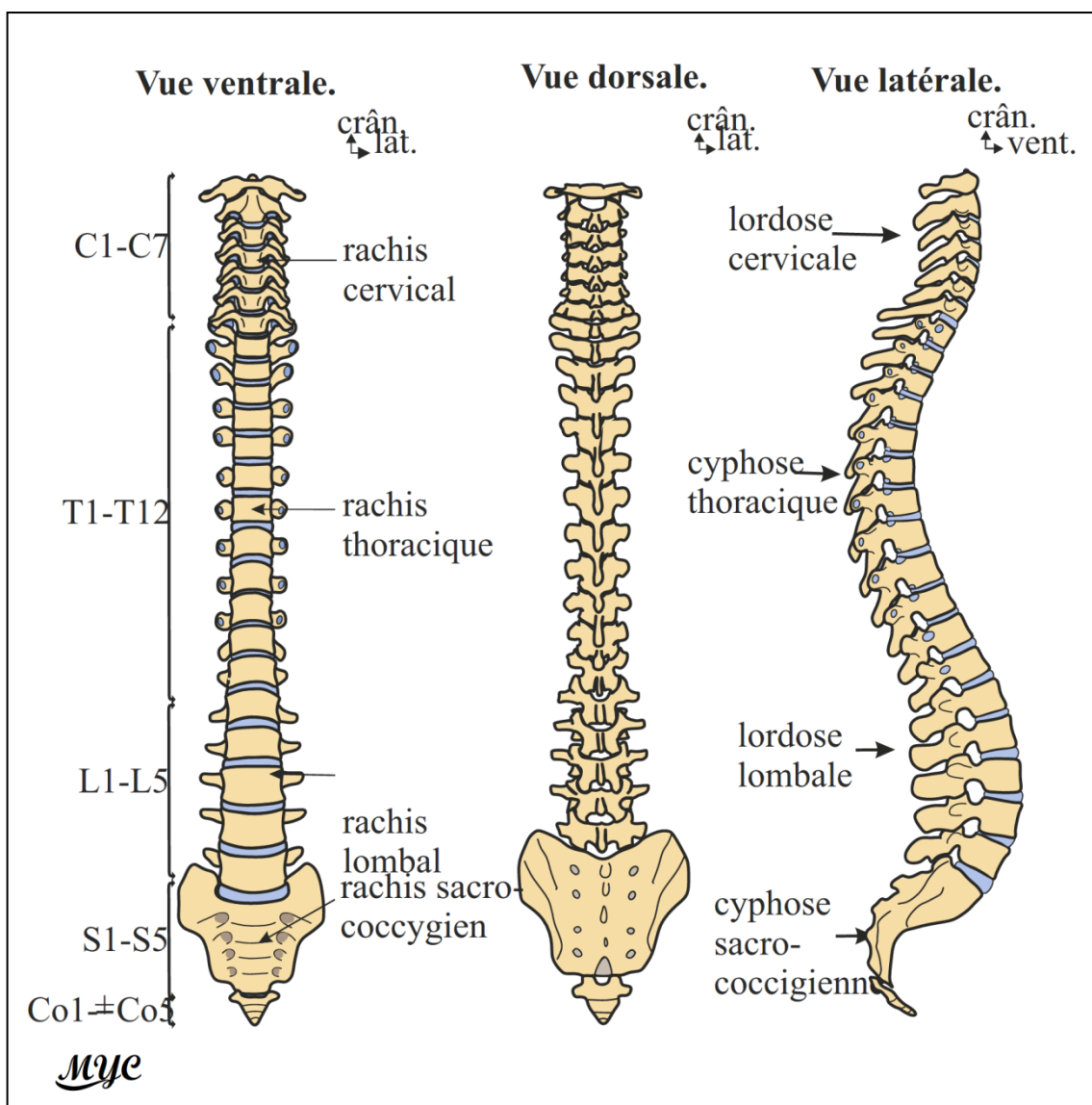


Figure 10: Le rachis dans son ensemble [D'après Rouvière H [43]].

Les trois premières courbures se suivent régulièrement sans angulation, la dernière décrit un angle saillant en avant : l'angle lombo-sacral compris entre 130° à 160° [32]. On définit les courbures du rachis par [33] :

- des points inflexion ou apex ;
- une longueur, correspondant au nombre de vertèbres incluses dans la courbure ;
- un angle ;
- l'orientation de l'angle ventralement ou dorsalement.

3. Rôle des courbures.

Le rôle principal des courbures rachidiennes est d'augmenter sa résistance aux efforts de compression axiale [34]. La loi d'Euler stipule que la résistance d'une colonne est égale au carré du nombre de courbure +1, $R = n^2 + 1$. Une colonne à 3 courbures est 10 fois plus résistante qu'une colonne sans courbure, une colonne qui présente des courbures alternées est plus résistante qu'une colonne rectiligne.

La cyphose thoracique intervient dans la respiration, elle soutient la cage thoracique et augmente sa capacité, la cyphose sacrale augmente la capacité du bassin.

4. Acquisition des courbures.

Les courbures du rachis sont la conséquence des acquisitions motrices. Au cours de la vie intra-utérine, le fœtus ne présente qu'une seule courbure primitive cyphotique sur l'ensemble du rachis [35] est concave en avant. Puis apparaissent des courbures secondaires concaves en arrière : vers la 7^{ème} semaine de vie fœtale naît la courbure cervicale suite aux mouvements de la tête dans le liquide amniotique, à l'échographie [36] elle est responsable de la clarté nuchale. C'est une lordose qui s'estompe rapidement, et ne réapparaît qu'après la naissance vers 6 mois, lorsque l'enfant redresse la tête.

La lordose lombale apparaît entre 12 et 18 mois, lorsque l'enfant se met debout, elle est le résultat du passage à la station érigée et de l'acquisition de la marche. L'homme est le seul vertébré à la posséder [37].

➤ Anatomie clinique :

- L'équilibre sagittal du rachis s'apprécie sur un patient debout au garde-à-vous, les mains à hauteur du pubis, en appui sur le dossier d'une chaise, hanches et genoux en extension. L'importance des courbures se définit par des flèches [34]. Les anomalies de courbures sont relativement fréquentes. Dans le plan sagittal se sont les hyper lordoses lombales, la rectitude cervicale, les gibbosités et le dos rond. Dans le plan frontal, se sont les scolioses qui correspondent à une déformation des vertèbres dans les trois plans de l'espace.

La cyphose thoracique moyenne mesurée entre T4 et L1 est de 37°. La lordose lombale entre L1 et L4 est de 40° [38].

- La mesure de la clarté nucale est la première étape du dépistage des maladies chromosomiques, en particulier de la trisomie 21 [36].

B. OSTÉOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

Le rachis thoracique (Fig. 11) est le plus long des segments rachidiens, il comprend 12 vertèbres [39], articulées de chaque côté avec les douze paires de côtes et par leur intermédiaire avec le sternum. Il constitue la limite osseuse dorsale de la cage thoracique. C'est ici que son rôle de protection des viscères prime sur les autres fonctions, il contribue à protéger les différentes structures placées sous les côtes.

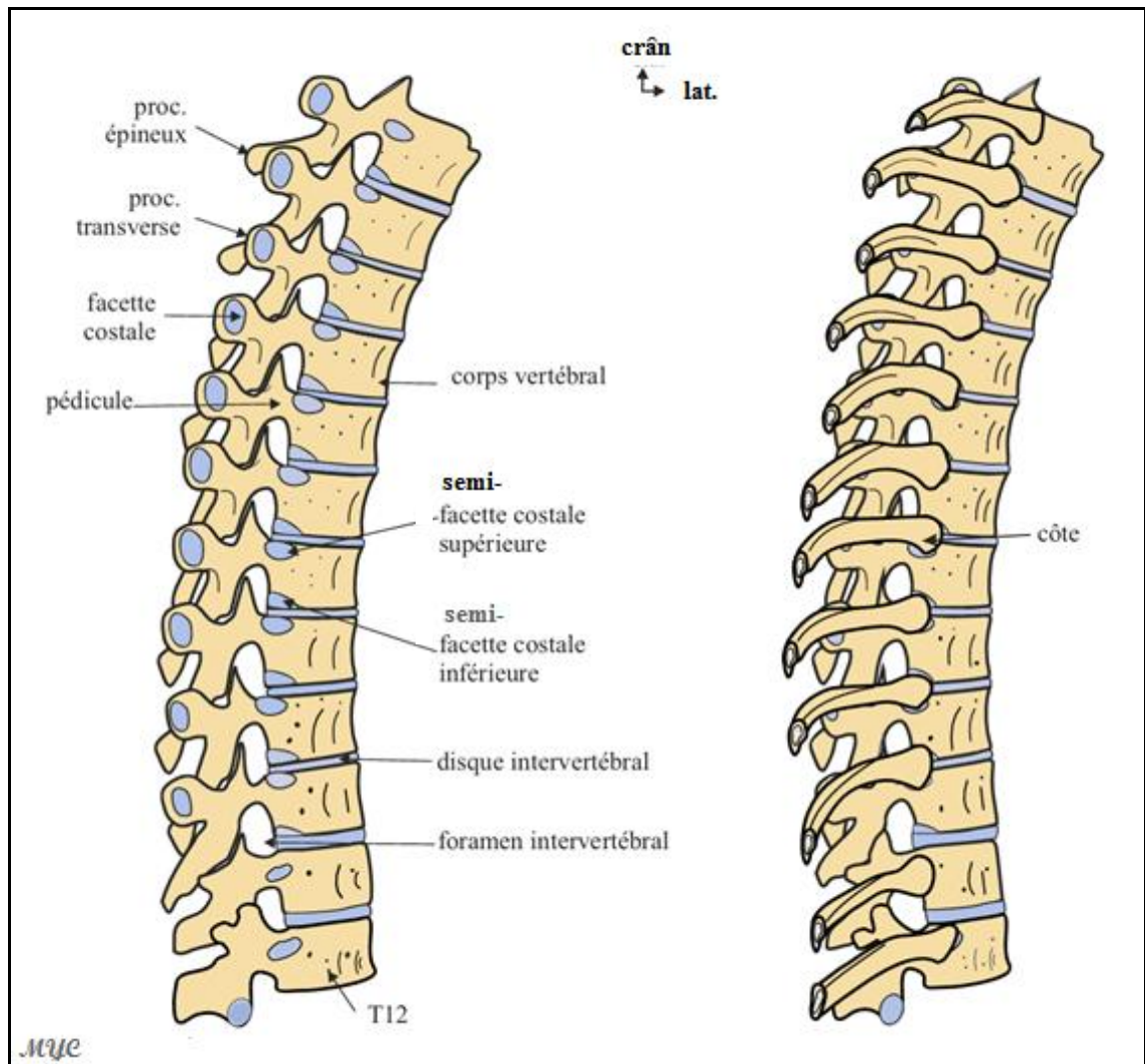


Figure 11 : Rachis thoracique vue latérale droite, à droite côtes en place. [D'après Sappey [53]].

I. DESCRIPTION DE LA VERTÈBRE TYPE.

Toutes les vertèbres sont construites sur un même modèle (Fig. 12), exception faite des vertèbres sacrales et coccygiennes qui perdent leur individualité en fusionnant au cours du développement embryonnaire. Les vertèbres ne sont pas toutes identiques, des variations morphologiques existent d'un étage à l'autre et au sein d'un même étage. Une situation différente dans le niveau vertébral implique des fonctions différentes et induit des modifications structurales [40].

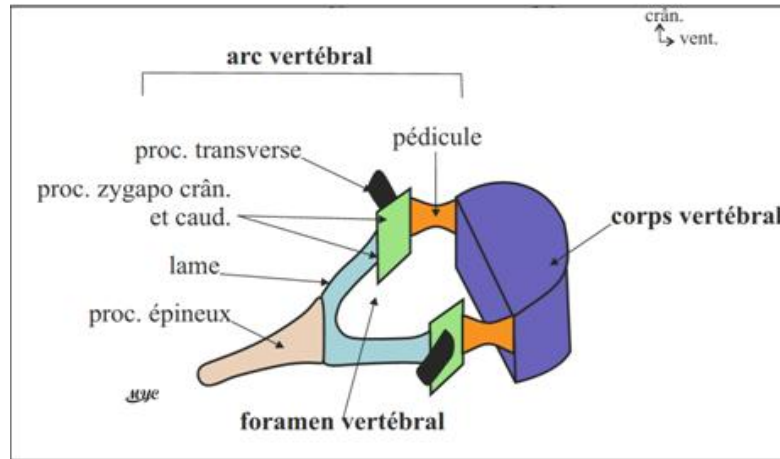


Figure 12 : Vertèbre type (schématique).

La vertèbre type, choisie comme modèle de description, présente un foramen vertébral central, délimité en avant par le corps vertébral et dorsalement par l'arc vertébral hérissé de sept processus.

1. Corps vertébral.

Le corps de la vertèbre (ou spondyle) est ventral. C'est un bloc osseux volumineux et résistant. Cylindrique, convexe en avant et latéralement, excavé en arrière. Il présente à décrire :

- Deux faces horizontales, les plateaux vertébraux supérieur et inférieur.
Chaque plateau vertébral comporte :
 - Une partie centrale creusée et excavée, perforée de nombreux orifices. À l'état frais cette excavation est encrôtée de cartilage hyalin : la plaque cartilagineuse vertébrale PCV.
 - Une partie périphérique, surélevée en rempart forme le bourrelet annulaire [41] ou listel marginal. Large de 2 à 5 mm, elle circonscrit la PCV.
- Une face circonférentielle, séparée des précédentes par deux bords mous, points les plus faibles de la vertèbre [42] [9], formée de:
 - Une partie ventro-latérale, convexe transversalement, concave en gouttière de haut en bas, creusée de nombreux sillons et orifices vasculaires.
 - Une partie dorsale, concave transversalement, rectiligne verticalement, creusée de petites lacunes qui correspondent à la sortie des veines du corps vertébral. Elle constitue la paroi ventrale du foramen vertébral.

2. Arc vertébral.

L'arc vertébral ou arc neural en forme de fer à cheval, ferme le foramen vertébral en arrière, il comprend d'avant en arrière:

- Deux pédicules, (*du latin : petit pied*) placés à la partie latérale de la vertèbre, ils attachent l'arc vertébral à la face dorsale du corps vertébral. Aplatis sagittalement, les pédicules sont échancrés sur les bords supérieur et inférieur, l'incisure

supérieure est moins prononcée que l'incisure inférieure. La superposition des incisures inférieure et supérieure de deux vertèbres voisines, délimite le foramen intervertébral.

- Deux lames, quadrilatères et aplaties se portent obliquement en bas en dedans et en arrière. Les lames se rejoignent sur la ligne médiane pour fermer dorsalement le foramen vertébral.

Chaque lame présente une face ventrale ; une face dorsale ; un bord supérieur et un bord inférieur.

- Sept processus se dégagent de l'arc vertébral :
 - Quatre processus zygapophysaires, orientés verticalement répondent aux processus homologues des vertèbres sus et sous-jacentes.
 - Deux processus zygapophysaires supérieurs, s'élèvent de chaque côté vers le haut et s'articulent avec les processus zygapophysaires inférieurs de la vertèbre sus-jacente.
Les facettes articulaires de ces saillies regardent en arrière.
 - Deux processus zygapophysaires inférieurs, s'articulent avec les processus zygapophysaires supérieurs de la vertèbre sous-jacente.
Les facettes articulaires de ces saillies regardent en avant.
 - Deux processus transverses, implantés à l'union des lames et des pédicules se portent transversalement. Ils présentent une base, deux bords supérieur et inférieur, deux faces ventrale et dorsale et un apex libre.
 - Un processus épineux, palpable sous la peau, prolonge l'arc vertébral dorsalement sur la ligne médiane. Il naît de l'union des lames droite et gauche. C'est une saillie oblongue, aplatie transversalement à laquelle on décrit: une base, deux faces latérales droite et gauche, un bord supérieur mince, un bord inférieur épais et un apex libre.

3. Le foramen vertébral

Le foramen vertébral est délimité :

- ventralement par le corps vertébral et le disque intervertébral ;
- latéralement par les pédicules ;
- dorsalement par les ligaments flavum et les lames.

La superposition des foramina vertébraux dessine un canal qui s'étend sur toute la hauteur du rachis, du foramen magnum de la base du crâne au hiatus sacral, où il se termine en «bec de flûte». Latéralement il s'ouvre vers l'extérieur par les foramens intervertébraux.

➤ Anatomie clinique :

- La largeur des pédicules est le paramètre le plus important pour le chirurgien, il conditionne le diamètre des vis d'ostéosynthèse [43].
- La laminectomie offre un accès dorsal sur le canal vertébral.
- Les processus épineux sont des repères chirurgicaux importants [43].
-

II. DESCRIPTION DE LA VERTÈBRE THORACIQUE.

1. Corps vertébral.

Le corps des vertèbres thoraciques (Fig. 13) (Fig. 14) a une forme qui rappelle *le cœur des cartes à jouer*. De volume intermédiaire à celui des vertèbres cervicales et lombales, son diamètre sagittal est plus étendu que le transversal, il augmente progressivement de haut en bas (15 mm en T1, 32 mm en T12). Le diamètre transverse diminue de T1 à T4 (de 30 mm à 25 mm), puis augmente jusqu'à T12 (45 mm) [44]. La forme du corps vertébral thoracique est variable, triangulaire pour les vertèbres crânielles, circulaire pour les vertèbres caudales. Il est caractérisé par la présence de facettes articulaires costales (Fig.15). La partie dorso-latérale de la face circonférentielle présente quatre demi-facettes articulaires, deux supérieures et deux inférieures répondant aux têtes costales. La face dorsale du corps est fortement excavée.

À gauche à partir de T4 l'aorte s'adosse sur les vertèbres, responsable de l'aspect asymétrique au rachis thoracique .

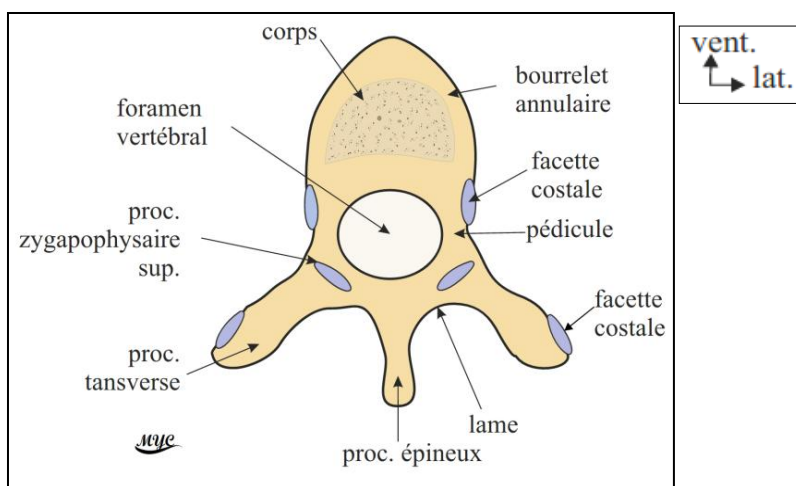


Figure 13 : Vertèbre thoracique, vue axiale [D'après Sobotta [113]].

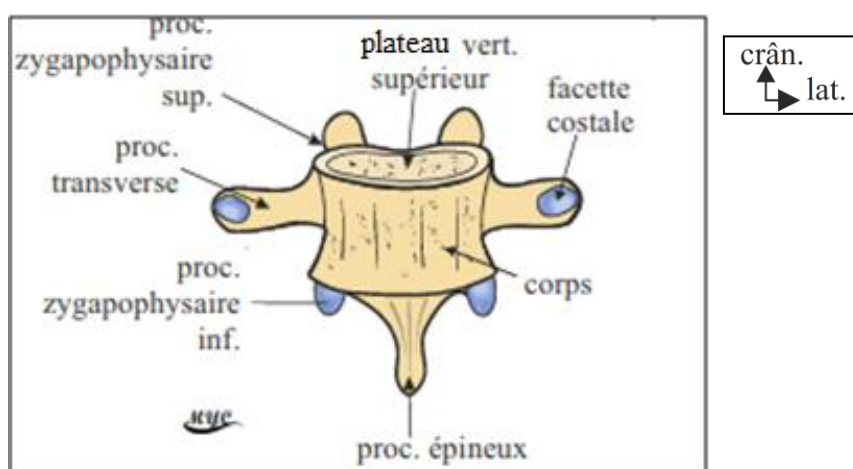


Figure 14: Vertèbre thoracique, vue ventrale [D'après Sobotta [113]].

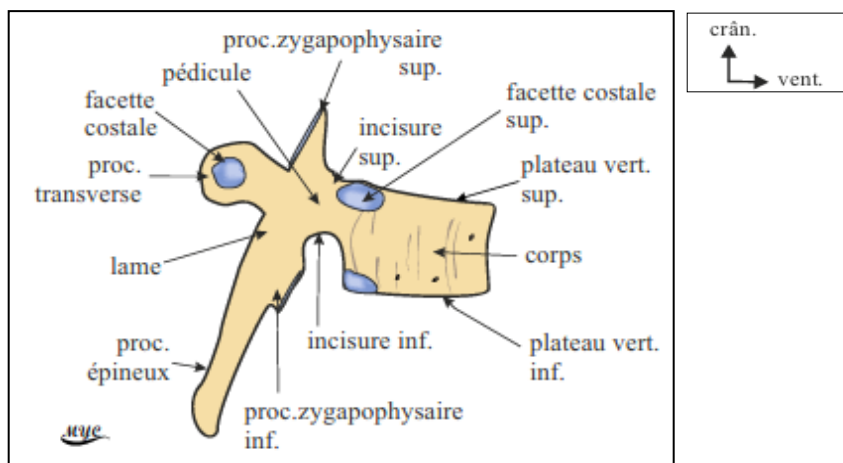


Figure 15: Vertèbre thoracique, vue latérale [D'après Sobotta [113]].

2. Arc vertébral.

Les pédicules thoraciques sont légèrement convergents, ils se fixent à la moitié supéro-latérale de la face dorsale du corps vertébral. Ils sont remarquablement grêles, de forme ovale à grand axe vertical. Les lames sont minces, de direction inféro-médiale, aussi hautes que larges, fortement inclinées de haut en bas et de dehors en dedans, elles s'emboîtent les unes au dessus des autres comme « *les tuiles d'un toit* ». Le processus transverse est long, oblique en haut, en dehors et en arrière. Il est caractérisé par la présence sur sa face ventrale d'une facette articulaire qui répond à la surface articulaire du tubercule costal de la côte. Les processus zygapophysiaux se dressent verticalement à la base des processus transverses. Ils portent une surface articulaire plane de disposition coronale. Orientée obliquement en arrière et en dehors, formant un angle de 45° à 65° avec l'horizontale sur les processus zygapophysiaux supérieurs, de forme concordante elle regarde en avant et en dedans sur les processus zygapophysiaux inférieurs. Le processus épineux thoracique (Fig. 15) est prismatique triangulaire à la coupe. Son apex libre est unituberculeux. Son inclinaison varie selon la vertèbre considérée : de T1 à T3 l'apex se projette sur la moitié supérieure de la vertèbre sous jacente, de T4 à T6 l'apex se projette sur la moitié inférieure de la vertèbre sous jacente, de T7 à T9 plus loin que la moitié inférieure, de T10 à T12 l'apex se projette au niveau du disque intervertébral. les processus épineux thoraciques sont très longs en raison de l'insertion des puissants muscles extenseurs du dos [45].

3. Foramen vertébral.

Le foramen vertébral thoracique est triangulaire en T1 puis elliptique jusqu'à T12. Il se rétrécit considérablement à la partie moyenne (de T4 à T9) [46]. Le diamètre transversal est minimum à hauteur des pédicules, sa valeur la plus basse se situe en T6, le taux d'occupation à cet étage est de 23% [43]. Le renflement cervical de la moelle spinale se termine en T1, le renflement lombal se projette de T10 à L1.

4. Foramen intervertébral.

Le foramen intervertébral thoracique est de forme ovale en virgule à pointe oblique en bas et en avant. Il est circonscrit par deux entités mobiles, en avant le disque intervertébral, en arrière l'articulation zygapophysaire [47]. Le contenu du foramen intervertébral (Fig. 16) est représenté par [48] :

- Les racines spinales ventrale et dorsale portant le ganglion spinal.
- Le nerf spinal.
- Les plexus veineux (veines émissaires).
- Le rameau spinal de l'artère dorso-spinale.
- Le nerf sinu-vertébral.
- Un filet sympathique.

Il existe un décalage entre l'émergence médullaire des racines nerveuses et le foramen intervertébral qui lui correspond ; la racine T1 présente une vertèbre de décalage, la racine T12 deux, elle sort par le foramen de la vertèbre L2 (51) .

➤ **Anatomie clinique.**

- La minceur physiologique des pédicules thoraciques peut élargir la distance interpédiculaire et faire penser à un processus expansif intracanalair (16).
- L'obliquité des lames à l'étage thoracique, interdit l'accès au canal vertébral au travers du ligament flavum.
- Projection squelettique des processus épineux (38) :
 - Le processus épineux de T1 correspond à l'angle supéro-médial de la scapula.
 - Le processus épineux de T3 correspond à l'horizontale passant par l'épine de la scapula.
 - Le processus épineux de T7 correspond à l'apex de la scapula.
 - Les rétrécissements du canal vertébral par un recul du mur postérieur ou un processus tumoral à hauteur des zones rétrécies se traduisent par des troubles neurologiques importants.
- À l'étage thoracique le foramen intervertébral est rétréci physiologiquement par l'articulation costo-vertébrale. Il peut également l'être par les hernies discales thoraciques, l'arthrose des articulations zygapophysaires, la dilatation des veines émissaires, les traumatismes du corps vertébral (52) , les racines nerveuses peuvent être comprimées et entraîner des douleurs radiculaires.

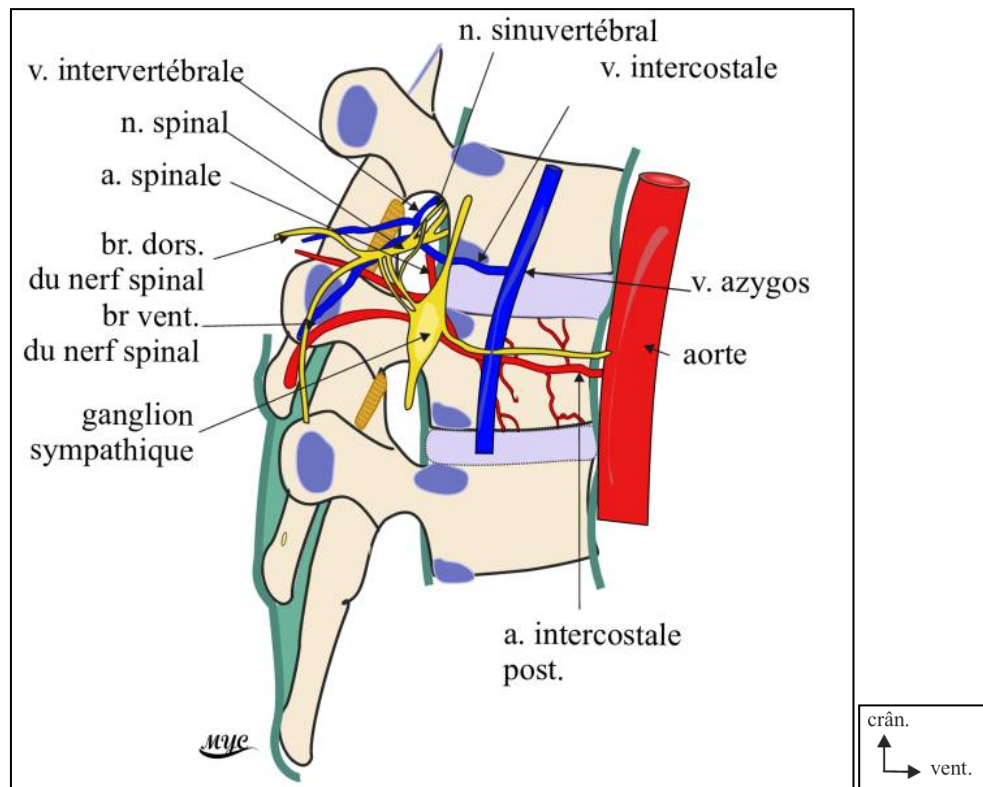


Figure 16 : Foramen et pédicule inter-vertébraux [D'après Sobotta [113]].

III. CARACTÈRES PARTICULIERS A CERTAINES VERTÈBRES

Quatre vertèbres thoraciques sont singulières :

- T1, est une vertèbre de transition, elle conserve certains caractères des vertèbres cervicales.
 - Des processus semi-lunaires sur le plateau vertébral crânial.
 - Une surface costale supérieure complète pour la première côte.
 - La surface articulaire du processus zygapophysaire supérieur est orientée en haut et en arrière, inclinée à 45°.
- T10, ne présente pas de facette costale inférieure.
- T11 et T12 (Fig.17):
 - Le corps ne présente qu'une seule facette costale complète,
 - Les deux dernières côtes sont flottantes sans attaches ni sternales ni sur les processus transverses. Ceci se traduit par des processus transverses atrophiés et rudimentaires, sans facettes costales.
 - L'arc neural présente des ébauches de processus mamillaires et accessoires, similaires à ceux des vertèbres lombales.

PARTIE THÉORIQUE : ANATOMIE DU RACHIS THORACIQUE

- Les surfaces articulaires des processus zygapophysiaux de T12 sont convexes et regardent latéralement, elles ont une conformation adaptée à celles des vertèbres lombales.

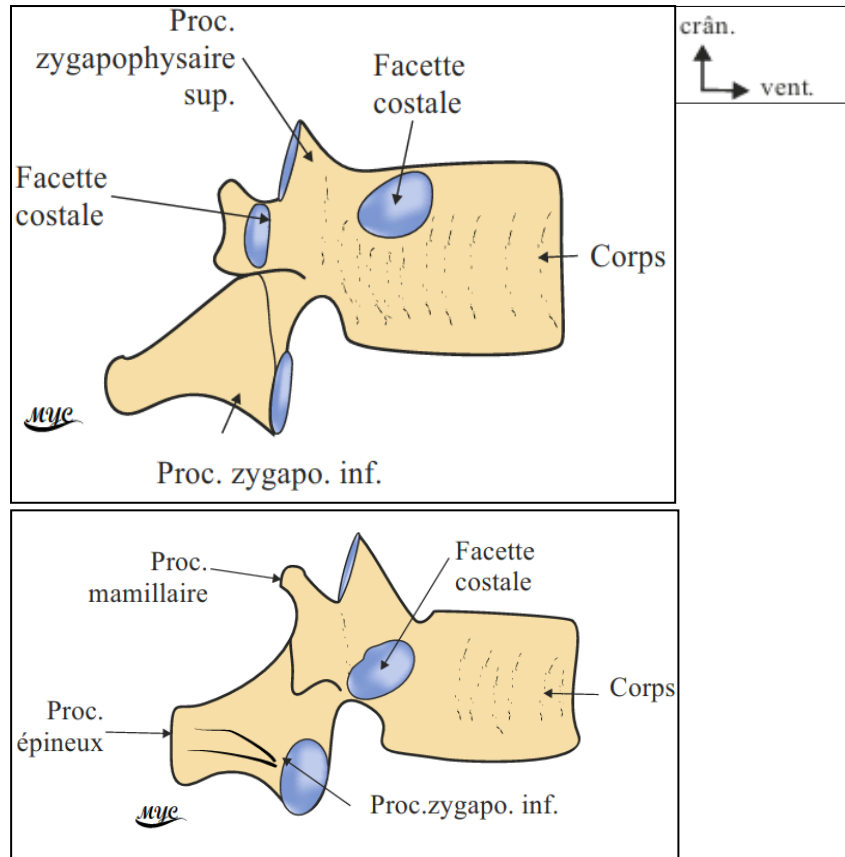


Figure 17 : Vertèbre T11 et T12, vue latérale [D'après Sappey H. [53]].

C. STRUCTURE DES VERTÈBRES

Dans son ensemble la vertèbre est un os irrégulier, elle se compose d'une couche d'os cortical compact périphérique et d'une masse de tissu osseux trabéculaire centrale. Une fine couche de périoste richement innervé entoure l'ensemble. Le tissu osseux cortical est variable, épais et dense au niveau de l'arc postérieur, mince sur des plateaux vertébraux. Le tissu osseux trabéculaire forme en grande partie le corps vertébral [51], sa répartition et l'orientation des travées osseuses varient selon le site sur la vertèbre. Dans le corps vertébral les travées sont séparées par de larges alvéoles traduisant une activité hématopoïétique et métabolique intense, dans l'arc vertébral le réseau est dense, serré et les alvéoles y sont étroites. L'agencement et l'orientation des travées osseuses est le reflet de la réponse du squelette aux forces mécaniques qu'il subit, il en résulte (Fig. 19) que dans :

- le corps vertébral, chez l'enfant avant la marche, le rachis ne subit pas de contraintes axiales en compression, les travées osseuses ont une disposition horizontale de type radiaire, elles s'étalent de manière centrifuge du centre du corps vers la périphérie [52].

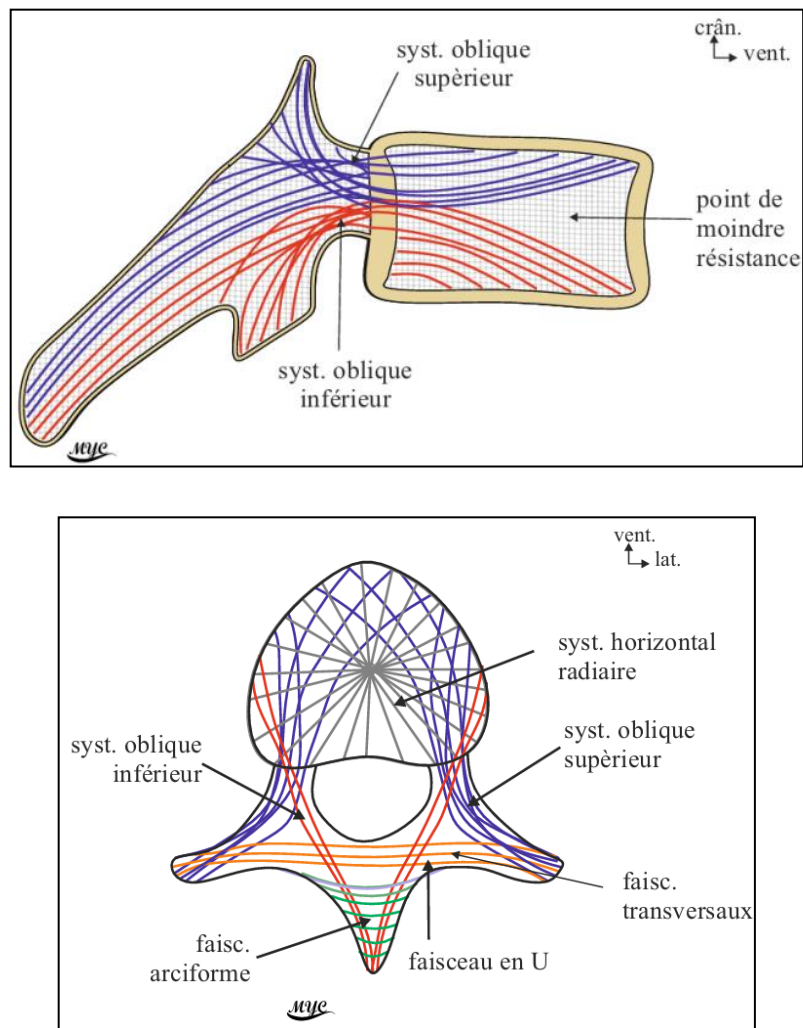


Figure 19 : Structure de la vertèbre, vue latérale et axiale [D'après Paturet G [54]].

Chez l'adulte en revanche, les travées suivent les lignes de forces et aboutissent à la constitution de trois systèmes :

- a. Le système horizontal radiaire, semblable au précédent, joue le rôle d'entretoise du système vertical ;
 - b. le système vertical, tendu entre les plateaux vertébraux est orienté selon les forces de compression axiale, il renforce le corps vertébral ;
 - c. les systèmes obliques supérieur et inférieur, conditionnés par l'action des muscles spinaux, se détachent des pédicules et s'épanouissent en avant vers les plateaux supérieur et inférieur, en arrière vers l'arc vertébral.
- Dans l'arc vertébral on distingue :
- Des faisceaux horizontaux inter transversaires ;
 - un faisceau en U tendu entre les lames vertébrales ;
 - des faisceaux arciformes dans le processus épineux.

➤ **Anatomie clinique :**

- Le tissu osseux spongieux du corps vertébral subit une perte supérieure à celle de l'os cortical (56), selon l'âge et le sexe il existe une diminution de la densité minérale osseuse et un réarrangement des travées osseuses responsables de fragilité osseuse (57) expliquant la prédominance de l'ostéoporose chez la femme.
- La partie ventrale du corps vertébral présente une zone de moindre résistance favorisant la survenue de fracture cunéiforme.
- La stabilité du rachis est la capacité de ce dernier à maintenir l'enchaînement des vertèbres en toutes circonstances, elle assure l'intégrité des structures nerveuses contenues dans le canal vertébral.
- L'instabilité du rachis a divers origines : osseuse, disco-ligamentaire ou mixte.
- Le **segment vertébral moyen** proposé par ROY- CAMILLE est la région vertébrale entourant le foramen vertébral, responsable d'instabilité osseuse, il comprend:
 - La face dorsale du corps vertébral,
 - les pédicules,
 - les processus zygapophysaires,
 - la partie initiale des lames.
- L'atteinte du **segment mobile rachidien** est responsable de luxations.

D. ARTHROLOGIE DU RACHIS THORACIQUE.

Les vertèbres s'articulent entre elles à de nombreux endroits (Fig.19) : au niveau du corps vertébral, des processus zygapophysaires, des processus transverses, des lames et des processus épineux. A l'étage thoracique elles s'articulent également avec les côtes de même niveau. Les articulations du rachis thoracique se subdivisent en trois catégories : les articulations disco-corporéales ventralement, les articulations de l'arc vertébral dorsalement et les articulations costo-vertébrales latéralement.

I. LES ARTICULATION DISCO-CORPORÉALES.

Les articulations disco-corporéales ou intercorporéales sont présentes sur le rachis de C2 à S1. Se sont des amphiarthroses, semi-mobiles qui relient les corps vertébraux adjacents par l'intermédiaire d'un disque intervertébral et de deux ligaments longitudinaux antérieur et postérieur (Fig.19). Les surfaces articulaires sont représentées par les faces caudale et crâniale des corps vertébraux de deux vertèbres voisines, comblées à la partie centrale excavée par une couche de cartilage hyalin : la plaque cartilagineuse vertébrale. Le DIV, les ligaments longitudinaux antérieur et postérieur constituent les moyens d'union.

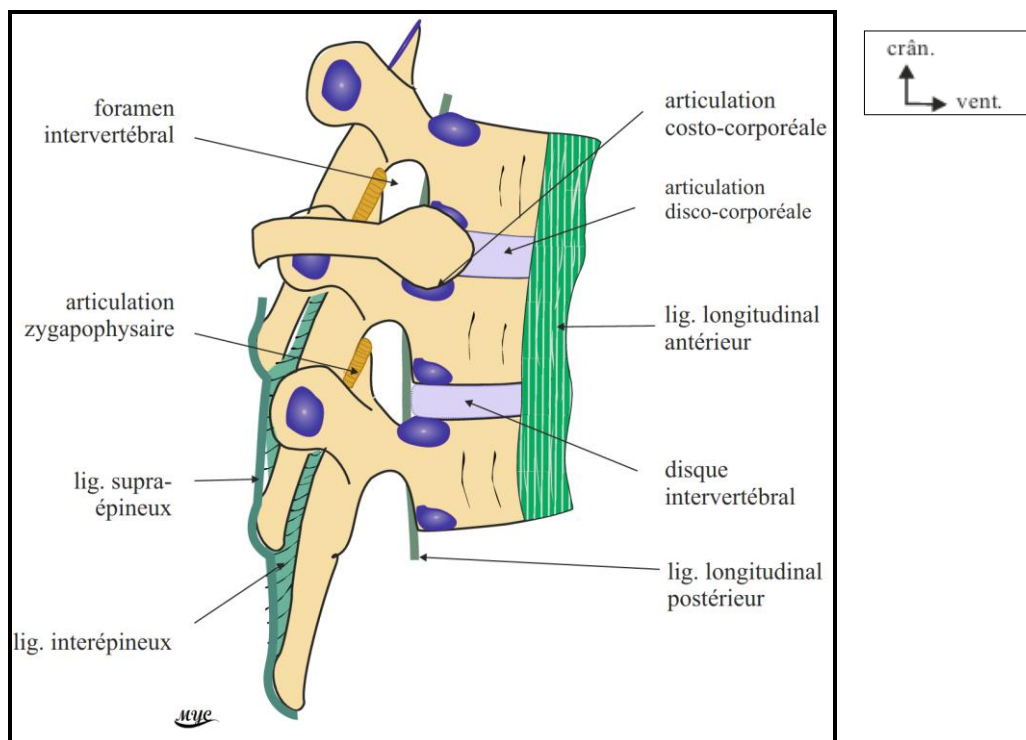


Figure 19 : Articulation du rachis thoracique, vue latérale [d'après Sobotta [113]].

1. LE DISQUE INTERVERTÉBRAL (DIV).

Le DIV est un fibrocartilage de forme biconvexe, intercalé entre les corps vertébraux (Fig. 20). Sur l'ensemble du rachis on dénombre vingt trois disques échelonnés de C2 à S1. L'apparence du DIV est variable selon l'âge, c'est une structure qui dégénère à partir de la deuxième décennie [55]. De couleur blanchâtre et translucide chez l'enfant, elle devient jaunâtre et opaque et moins haute chez l'adulte.

PARTIE THÉORIQUE : ARTHROLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

De manière générale la hauteur du DIV représente un tiers de la hauteur vertébrale [56].

Il existe cependant des variations notables selon les étages : les DIV les moins épais se situent au niveau de rachis thoracique de T1 à T6.

L'indice discal est le rapport de la hauteur du DIV sur celle du corps vertébral, au niveau thoracique il est de 1/7 [57]. Cet indice reflète de la mobilité rachidienne, plus l'indice est élevé plus la mobilité est grande. Dans le rachis thoracique cyphotique le DIV est plus haut en arrière [32].

1-1. Structure du DIV.

Le triptyque discal [58] comprend : le nucléus pulposus NP, l'annulus fibrosus AF et la plaque cartilagineuse des plateaux vertébraux PCV (Fig. 20).

Rappelons que l'origine embryologique du NP et de L'AF sont différentes (61), le NP correspond au vestige de la notochorde embryonnaire, l'AF dérive du sclérotome. Dans le DIV, NP et AF ne présentent pas de limites nettes.

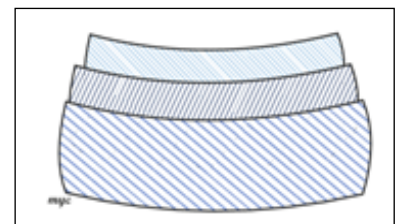
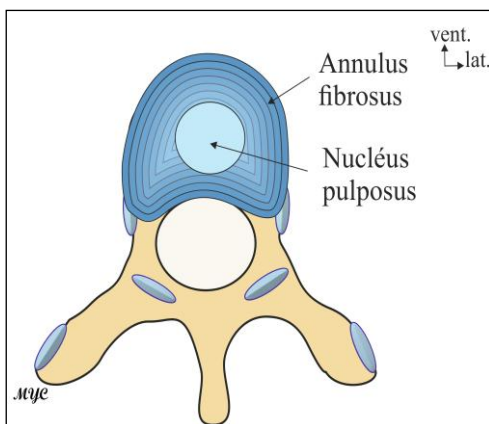
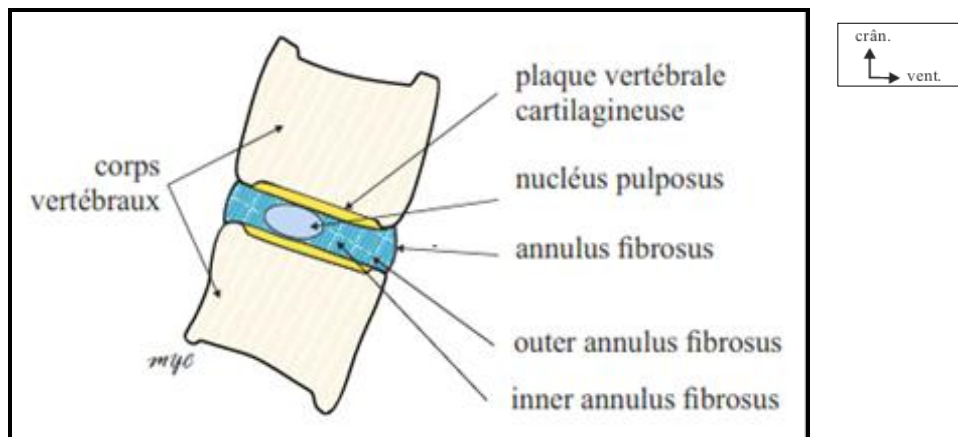


Figure 21: Disque intervertébral, Vue crâniale. [D'après Bogduk N [84]].

Figure 22: Disposition lamellaire de l'annulus fibrosus. [D'après Bogduk N [84]].

-1-1. Le nucléus pulposus (NP).

Le NP est une structure gélatineuse centrale (Fig. 21), fortement hydrophile, incompressible, inextensible mais déformable. C'est un noyau blanchâtre ovoïde situé en arrière du centre du DIV, dont il occupe les $4/10^{\text{e}}$. Plus proche du bord dorsal que du ventral, il s'étale transversalement [52], il est peu développé dans la région thoracique [36].

1-1-2. L'annulus fibrosus (AF).

L'AF est une structure capsulo-ligamentaire périphérique entourant le NP. Il s'insère sur le pourtour des plateaux vertébraux au niveau du bourrelet annulaire. Composé de lamelles concentriques, souvent comparées à des « pelures d'oignon », séparées les unes des autres par du tissu muqueux. Chaque lamelle est formée de fibres obliques tendues d'un plateau vertébral à l'autre, l'orientation et l'obliquité des fibres s'inverse d'une lamelle à la suivante (Fig.22). À l'étage thoracique l'inclinaison des fibres est moins prononcée [41], ceci s'explique par la moindre amplitude des mouvements à cet étage.

L'AF est formé de deux parties visibles [59] : Une partie interne : *inner annulus fibrosus* IAF, également appelée zone de transition [58] répond au NP et une partie externe : *outer annulus fibrosus* (OAF), insérée sur le bourrelet annulaire. La partie mince de L'OAF est mince, est faiblement interconnectées [60].

1-1-3. La plaque cartilagineuse vertébrale (PCV).

La PCV est une couche de cartilage hyalin placée au centre du plateau vertébral, unie à l'os par des trousseaux fibreux, sa face superficielle est indissociable du DIV [56] [20]. La PCV est fine au niveau de la partie attenante au NP et plus épaisse au niveau l'IAF.

1-2. Vascularisation du disque inter vertébral (DIV).

Le DIV est une structure avasculaire. Deux théories sont habituellement avancées pour expliquer ce fait. Du point de vue de l'embryologie les DIV évoluent dans un environnement pauvre en vaisseaux puisque après la resegmentation des sclérotomes, les artères se retrouvent en position inter-segmentaire [60]. La biomécanique elle, affirme que les contraintes supportées par les DIV ne permettent pas d'assurer l'étanchéité des vaisseaux sanguins [61]. La nutrition du DIV est assurée par deux voies : la voie principale se fait par diffusion à partir de l'os spongieux vertébral (Fig.12-c) et du réseau veineux corporel vers le DIV ; la voie accessoire provient des artères péri-discales issues des branches dorso-spinales des artères intercostales.

Chez le fœtus et l'enfant le DIV est richement vascularisé, il reçoit les artères du corps vertébral par les orifices des faces supérieure et inférieure des plateaux vertébraux. À l'adolescence la vascularisation commence à régresser et tant que l'ossification n'est pas totalement achevée, le DIV reçoit ses artères à partir du corps vertébral.

1-3. Innervation du disque intervertébral.

Seule la partie périphérique du DIV et les ligaments longitudinaux reçoivent une innervation végétative. Le NP ne reçoit pas de nerf [62]. Cette innervation se fait par un rameau dorsal méningé (rameau sinuvertébral) destiné à la partie dorsale de l'AF, au LLP et à la partie ventrale de la dure mère attenante [63]. La partie ventrale du DIV et le LLA reçoivent un rameau sympathique ventral. Les deux nerfs sinuvertébraux d'un étage vertébral fournissent des rameaux à deux DIV adjacents.

➤ **Anatomie clinique**

- Les déchirures de l'AF ont lieu aux endroits où l'annulus est le moins épais, la fréquence des hernies discales postéro-latérales s'explique par la minceur de l'AF en arrière.
- La maladie de Scheuermann correspond à des troubles de l'ossification du corps vertébral à l'adolescence, aboutissant à une fragilité du plateau vertébral qui permet la saillie du nucléus pulposus dans l'os spongieux entraînant une hernie discale spongieuse ou nodule de Schmorl.

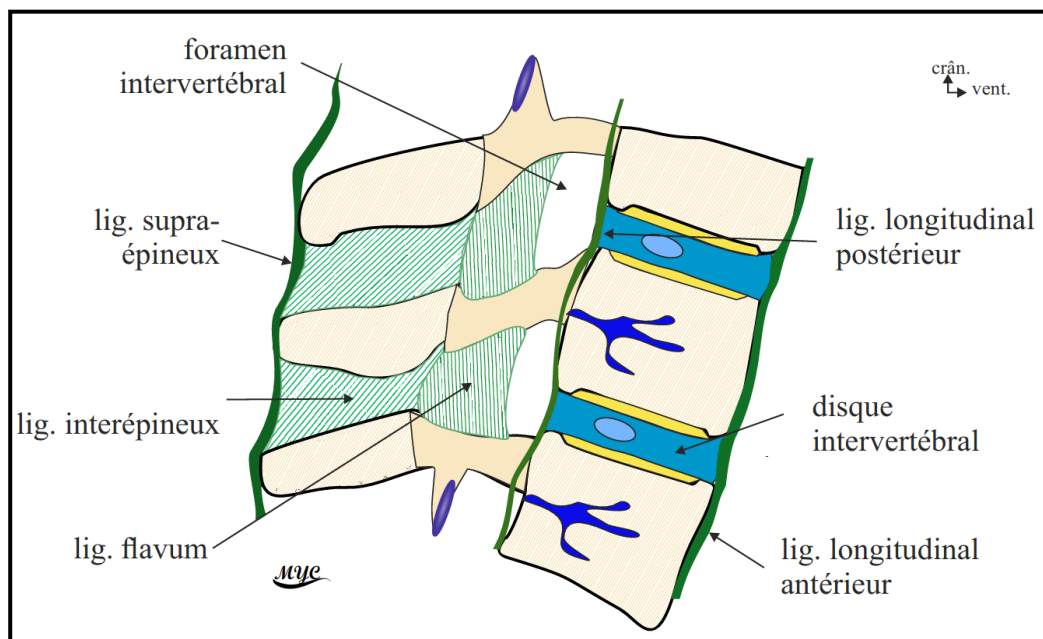


Figure 23 : Ligaments du rachis thoracique (Coupe sagittale)

2. LIGAMENT LONGITUDINAL ANTÉRIEUR (LLA).

Le LLA est une bande fibreuse blanchâtre résistante qui descend à la face ventrale du rachis (Fig 23) (Fig.24). Il s'insère en haut sur la face exocrânienne du processus basilaire de l'os occipital et descend caudalement jusqu'à la face ventrale du sacrum où il se termine à

hauteur de la deuxième crête sacrale. Ce ligament adhère fortement à la face ventrale des corps vertébraux et aux bords du DIV. Dans son segment thoracique ce ligament est plus large et présente trois parties : Une médiane, formée de faisceaux longs tendus sur plusieurs vertèbres, deux latérales formées de faisceaux courts tendus entre deux vertèbres successives (Fig. 13-a). De nombreux foramen vasculaires percent le LLA.

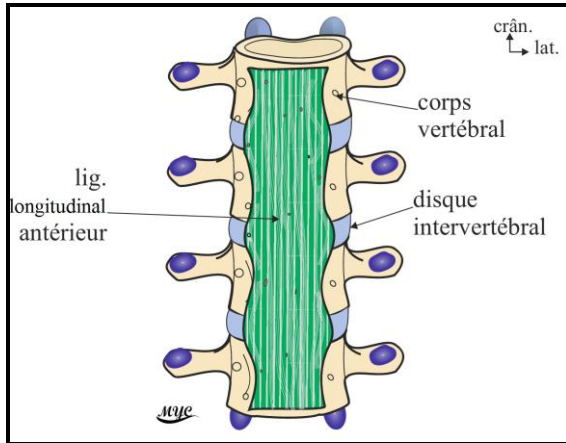


Figure 24: Ligament longitudinal antérieur, vue ventrale [D'après Kahle WH et al [73]].

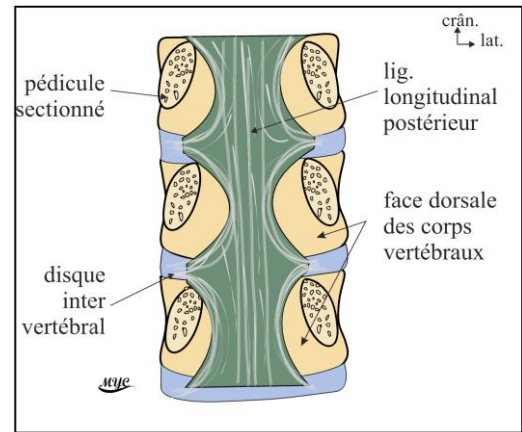


Figure 25: Ligament longitudinal postérieur, vue dorsale [D'après Kahle WH et al [73]].

3. LIGAMENT LONGITUDINAL POSTÉRIEUR (LLP).

Le LLP est placé dans le canal vertébral (Fig.23) (Fig. 25), à la face dorsale des corps vertébraux [64]. Il s'étend de la face dorsale du corps de l'axis jusqu'à la première vertèbre coccygienne. D'aspect festonné il s'élargit sur les DIV où il se fixe et se rétrécit en arrière des corps vertébraux dont il est séparé par les plexus veineux intrarachidiens. Il présente une partie médiane épaisse et résistante verticale et deux parties latérales incurvées latéralement. La face dorsale du LLP répond à la dure mère par l'intermédiaire de l'espace épidual sauf à sa partie crâniale [65] [66].

II. ARTICULATIONS DE L'ARC NEURAL.

1. ARTICULATIONS ZYGAPOPHYSAIRES.

Les articulations zygapophysaires sont de petites articulations paires et symétriques placées entre les processus zygapophysaires inférieur et supérieur de deux vertèbres successives (Fig.19) (Fig.11). C'est une diarthrose de type arthroïde dont le rôle principal est de guider le mouvement [34]. Au niveau thoracique les surfaces articulaires sont planes [67], placées dans un plan coronal et inclinées à 60° sur l'horizontale, reliées par une capsule mince lâche étroite qui présente des replis synoviaux méniscoïdes [59]. Richement innervée, chaque articulation reçoit son innervation de deux nerfs spinaux adjacents [68].

2. LIGAMENT FLAVUM (LF).

Le LF relie les lames de deux vertèbres voisines, court épais et de couleur jaunâtre (Fig. 23) (Fig.26). Il existe deux LF par étage, les LF droit et gauche s'unissent sur la

ligne médiane dorsale fermant le canal vertébral en arrière. Leur union forme un V à angle ouvert en avant de 90°, un interstice peut les séparer (Fig. 26). Le LF est le seul vrai ligament élastique du corps humain, il joue le rôle d'amortisseur visco-élastique lorsqu'on se redresse, nommé ainsi à cause de sa couleur jaune, due à une densité élevée de fibres élastiques (80% de fibres élastiques pour 20% de fibres collagènes). Le LF est moins important à l'étage thoracique à mobilité réduite.

De forme quadrilatère, chaque LF présente à décrire deux faces et quatre bords : le bord supérieur s'insère sur le bord inférieur et la face antéro-inférieure de la lame sus jacente, le bord inférieur s'insère sur le bord supérieur et la face postéro-supérieure de la lame sous jacentes, le bord médial répond au processus épineux, et au LF opposé, le bord latéral répond au foramen intervertébral dont il constitue la limite dorsale, et à la capsule de l'articulation zygapophysaire, la face profonde ferme le canal vertébral en arrière, elle est séparée de la dure mère par l'espace épidual, la face superficielle répond en haut à la face profonde de la lame sus jacente, en bas aux muscles des gouttières vertébrales.

Le LF est formé de deux couches superficielle et profonde séparées par un espace de glissement. Dans la couche superficielle, les fibres sont orientées de dedans latéralement de bas en haut. L'obliquité est plus accentuée dans la partie latérale. Les fibres de la couche profonde sont parallèles au plan sagittale, en « aspect peigné » caractéristique [69].

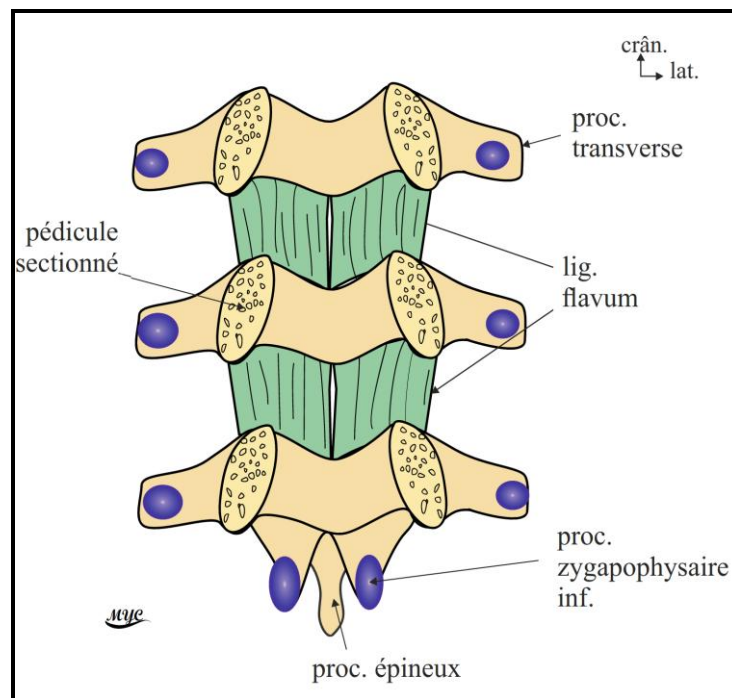


Figure 26 : Ligament Flavum, vue endo canalaire [D'après Kahle WH et al [73]].

3. LIGAMENTS INTER ÉPINEUX ET SUPRA-ÉPINEUX.

Les ligaments inter et supra-épineux (Fig.19) (Fig.23) forment un complexe ligamentaire solide et résistant placé sur la ligne médio-dorsale du rachis. Ces deux ligaments se côtoient sans limites nettes entre deux processus épineux voisins [47].

- Ligament inter-épineux.

Le ligament inter-épineux s'étend sur toute la hauteur du rachis, il se situe sur la ligne médiane, entre les processus épineux. Il s'étend du LF en avant au ligament supra-épineux en arrière .

- Ligament supra-épineux.

Le ligament supra-épineux s'étend sur toute la hauteur du rachis, il est placé sur la ligne médiane, en arrière des processus épineux, sur l'apex desquels il se fixe.

III. ARTICULATIONS COSTO-VERTÉBRALES.

Les articulations costo-vertébrales relient les 12 paires de côtes au rachis thoracique. L'articulation costo-corporéale ou articulation de la tête costale proprement dite [41] oppose la côte au corps vertébral, l'articulations costo-transversaire relie la côte au processus transverse (Fig.27). Certaines de ces articulations présentent des caractères particuliers notamment sur la 1^{ère}, 11^{ème} et 12^{ème} vertèbres thoraciques.

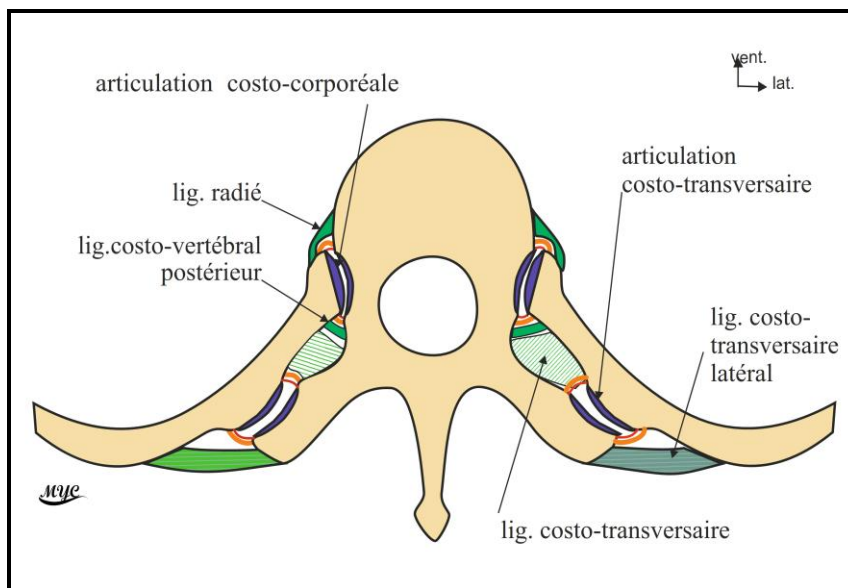


Figure 27: Articulatio costo-vertebrale, vue axiale. [D'après Gillot C [50]].

1. Articulatio de la tête costale proprement dite.

L'articulation de la tête costale proprement dite est une double arthrodie qui met en contact la tête costale avec deux vertèbres thoraciques voisines et le disque intervertébral qui les unit [67]. Les surfaces articulaires sont représentées par le coin saillant anguleux de la tête costale, formé de deux facettes costales planes séparées par une crête mousse, qui

s'oppose à la dépression comprise entre les facettes costales inférieure et supérieure de deux vertèbres successives, séparées par la partie dorso-latérale du disque intervertébral [41]. Divers moyens d'union relient ces surfaces :

une capsule articulaire courte mais solide renforcée par de nombreux ligaments [47] ; le ligament costo-vertébral antérieur ou radié en avant s'ouvre en éventail de la tête costale vers les faces latérales des corps vertébraux sus et sous jacent et le disque intervertébral, il répond en avant au ganglion de la chaîne sympathique, le ligament costo-vertébral postérieur . Le ligament interosseux ou interarticulaire est un fibro-cartilage horizontal (Fig.28) tendu de la crête du coin costal latéralement vers le disque intervertébral médialement [36], il sépare l'articulation en deux compartiments, supérieur et inférieur. La synoviale de cette articulation est séparées par le ligament interosseux en deux cavités communicants entre elles à certains endroits, particulièrement en arrière.

2. Articulation costo-transversaire

Les surfaces articulaires sont représentées par : La facette costale creuse du processus transverse des vertèbres thoraciques qui répond à la saillie inféro-médiale de la tubérosité costale. Le col de la côte ne répond pas directement au processus transverse mais s'y rattache par une symphyse [65] . Les Moyens d'union comportent une capsule mince et fragile renforcée par (Fig.28) (Fig.29) : le ligament costo-transversaire tendu horizontalement de la face dorsale du col de la côte à la face ventrale du processus transverse correspondant [67],

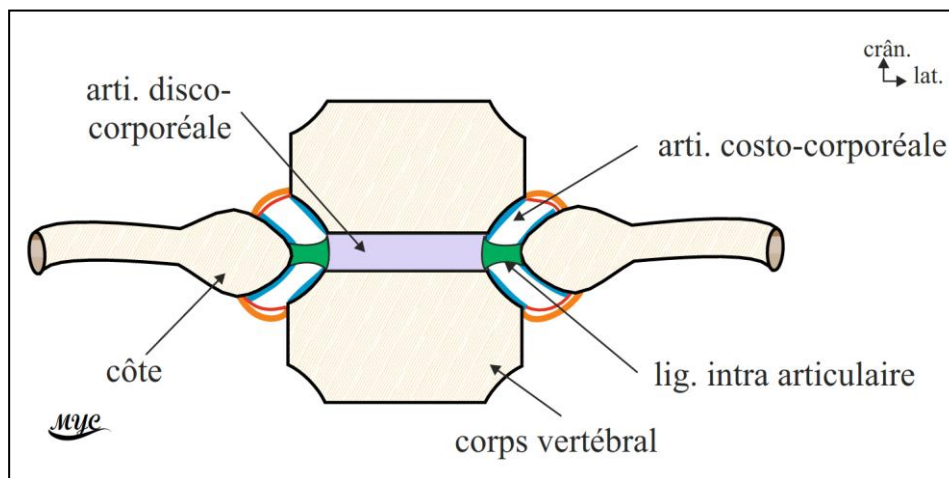


Figure 28: Articulation costo-vertébrale, coupe coronale schématique. [D'après Gillot C [50]].

le ligament costo-transversaire latéral très résistant se porte du sommet du processus transverse vers la saillie supéro-latérale de la tubérosité costale correspondante [41], le ligament costo-transversaire supérieur est une lame quadrilatère épaisse résistante qui va du bord supérieur du col de la côte vers le bord inférieur du processus transverse sus jacent, le ligament cervico lamellaire s'étend de la face dorsale du col de la côte vers la lame vertébrale sus jacente, le ligament cervico-méniscal inconstant est tendu de la face dorsale du col de la côte au disque intervertébral correspondant. Une synoviale est présente dans cette articulation.

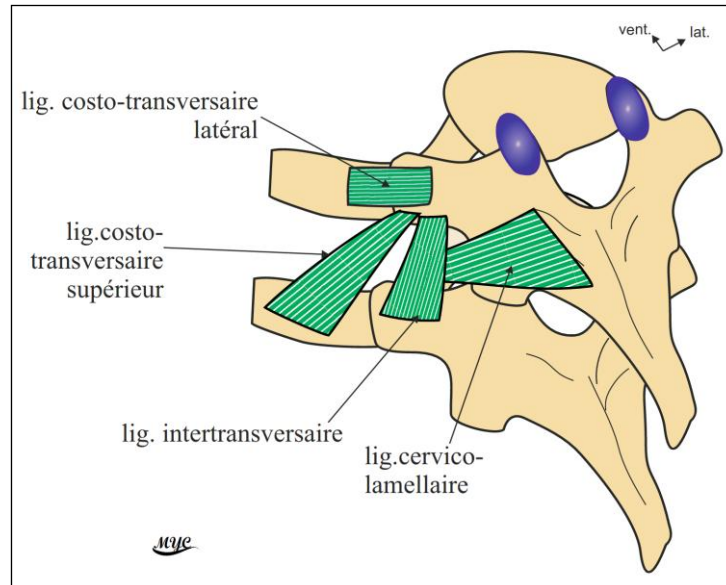


Figure 29: Articulation costo-transversaire, vue dorso-latérale [D'après Testut L [78]].

3. Particularités des articulations costo-vertébrales.

3-1. Articulation costo-vertébrale de T1.

L'articulation costo-corporéale de T1 est une énarthrose, la facette articulaire costale creuse est entièrement située sur le corps de cette vertèbre, la tête costale de la 1^{ère} côte est arrondie. Elle présente une seule cavité articulaire et pas de ligament intra articulaire. Le ligament costo-transversaire supérieur est rudimentaire [70] reliant le bord supérieur du col de la première côte au processus transverse de la 7^{ème} vertèbre cervicale.

3-2. Articulation costo-vertébrale de T11 et T12.

Elles aussi ne présentent qu'une seule cavité articulaire et pas de ligament intra articulaire, la facette de l'articulation costo-corporéale est entièrement située sur le corps de la vertèbre correspondante. L'articulation costo-transversaire n'existe pas sur ces vertèbres, les côtes sont flottantes dépourvues de tubérosités [65]. Le ligament lombo-costal de la 12^{ème} côte [71] est une expansion fibreuse de la partie supérieure du fascia thoraco-lombal tendu du sommet des deux premiers processus costiformes lombals vers le sommet de la 12^{ème} côte [72].

➤ Anatomie clinique.

- L'hernie discale thoracique (HDT) est plus rare que l'hernie cervicale et lombale. Elle est pourtant fréquente, l'IRM montre qu'elle existe chez 11 à 37% de sujets asymptomatiques [73], la HDT symptomatique est rare, elle correspond à 0,5% de l'ensemble des hernies discales. La HDT se produit volontiers sous T7, les sept premières vertèbres thoraciques sont moins mobiles car reliées directement au sternum par les côtes.

PARTIE THÉORIQUE : ARTHROLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

- Le LLP est plus épais à sa partie médiane d'où la fréquence des hernies discales dorso-latérales par rapport aux hernies médianes.
- Avec l'âge, le LLP s'ossifie près des bords, responsable de la formation d'ostéophytes.
- Le syndrome articulaire postérieur est responsable de douleur dorsale, à différencier du syndrome de la branche postérieure [74].
- Le Ligament flavum peut se calcifier et s'ossifier avec l'âge, faire saillie dans le canal vertébral, et engendrer des troubles neurologiques surtout en cas de canal vertébral étroit, l'étage T10 et T11 sont les plus touchés [75].

E. MYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE.

I. MUSCLES DU DOS

La musculature du dos est la plus développée et la plus complexe du corps humain, elle comprend près de 100 muscles repartis sur toute la hauteur du rachis. Difficiles à classer (79), ils se disposent sur plusieurs plans, variant selon la situation (muscles profonds / superficiels), l'orientation (muscles verticaux / obliques) , l'étendue (muscles longs / courts), et l'actions (muscles extenseurs / fléchisseurs / rotateurs).

Les muscles du rachis thoracique représentent la partie haute de cette musculature, les muscles et fascias contenus dans cette zone interviennent dans le maintien de la posture et la stabilisation du corps, mais aussi dans les mouvements du rachis, de la tête, du membre thoracique, les mouvements respiratoires et dans le couplage des membres pelviens et thoraciques (45). Sa situation intermédiaire fait du rachis thoracique une zone carrefour donnant attache à de nombreux muscles.

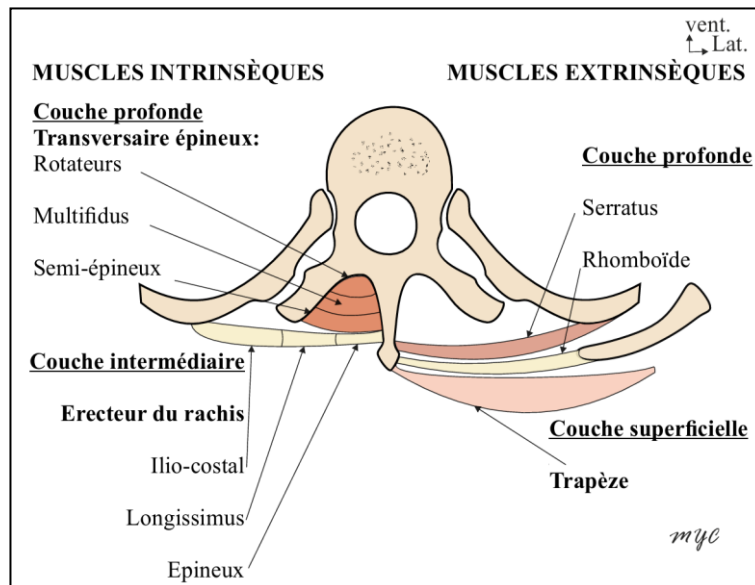


Figure 30 : Muscles du dos, coupe axiale. [D'après Dufour [44]].

1. Organisation et disposition des muscles du dos

Il est classique d'étudier les muscles du dos, en fonctions de leurs insertions et de leur topographie (80), mais la subdivision en muscles intrinsèques et extrinsèques est celle privilégiée par de nombreux anatomistes (Fig.31) .

1-1. Muscles intrinsèques

Les muscles intrinsèques dérivent tous de l'épimère. Ce sont les véritables muscles du rachis, ils naissent sur les vertèbres et se terminent sur les vertèbres, ils ont une action sur ces dernières, ils sont concernés par la mobilité du rachis et le maintien de la posture. De situation profonde, et d'organisation segmentaire, ils s'étendent de manière répétitive sur toute la hauteur du rachis, du pelvis jusqu'au crâne. Ils sont caractérisés par une innervation segmentaire : à chaque étage, chaque muscle reçoit la branche dorsale du nerf spinal correspondant.

1-2. Muscles extrinsèques

Les muscles extrinsèques sont superficiels, ils dérivent de l'hypomère. Ils relient le rachis au crâne, à la scapula, à l'humérus, aux côtes et aux os coxaux. Leur action se fait en dehors du rachis. Ils reçoivent leur innervation par la branche ventrale du nerf spinal.

2. Disposition des muscles du dos (Fig. 31).

2-1. Muscles intrinsèques

Les muscles intrinsèques se disposent sur trois plans :

2-1-1. Plan profond

Les muscles intrinsèques profonds sont nombreux et étriés (Fig.32), difficiles à séparer, ils se regroupent en une seule entité, le muscle transversaire épineux communément appelé muscle para-vertébral. Essentiel au maintien de la posture, il contrôle les mouvements du rachis en ajustant les contractions de chaque unité vertébrale. Le muscle transversaire épineux occupe la gouttière vertébrale. C'est une gouttière ostéo-fibreuse placée de part et d'autre de la ligne médiane, en dehors des processus épineux, elle longe le rachis sur toute sa hauteur du sacrum à la base du crâne. Elle est délimitée ventralement par les processus transverses et les ligaments inter-transversaires ; médialement par les lames vertébrales, les processus épineux, les ligaments flavum, inter épineux et supra épineux.

Le muscle transversaire épineux (Fig. 33) comporte trois catégories de muscles, disposés obliquement sur trois couches (81): profonde, intermédiaire et superficielle

- Couche profonde : les mm. Rotateurs :
 - Court rotateur.
 - Long rotateur.
- Couche intermédiaire : les mm. Multifides :
 - Court épineux.
 - Long épineux.
- Couche superficielle : les mm. Semi-épineux :
 - Semi-épineux de la tête.
 - Semi-épineux du cou.
 - Semi-épineux du thorax.

Dans la littérature deux descriptions de ce muscle sont retrouvées : la description de Trolard et celle de Winckler (82).

Les muscles inter-épineux et inter-transversaires, sont de petits muscles profonds segmentaires présents sur toute la hauteur du rachis. Au niveau thoracique ces muscles sont grêles quasi inexistantes (50), la mobilité de ce segment étant limitée. Les muscles élévateurs des côtes eux ne sont présents que sur ce segment du rachis, ils interviennent lors des mouvements respiratoires pour élever les côtes.

2-1-1. Plan Intermédiaire

Le plan intermédiaire est représenté par le muscle érecteur du rachis, ou muscle sacro-épineux (44). C'est le muscle intrinsèque le plus important (49), il se place à la partie superficielle des gouttières vertébrales, entre les processus épineux et l'angle costal. Il regroupe les trois principaux muscles extenseurs du rachis (70) qui partent d'une origine commune, la masse sacro-lombale.

PARTIE THÉORIQUE : MYOLOGIE DU RACHIS THORACIQUE

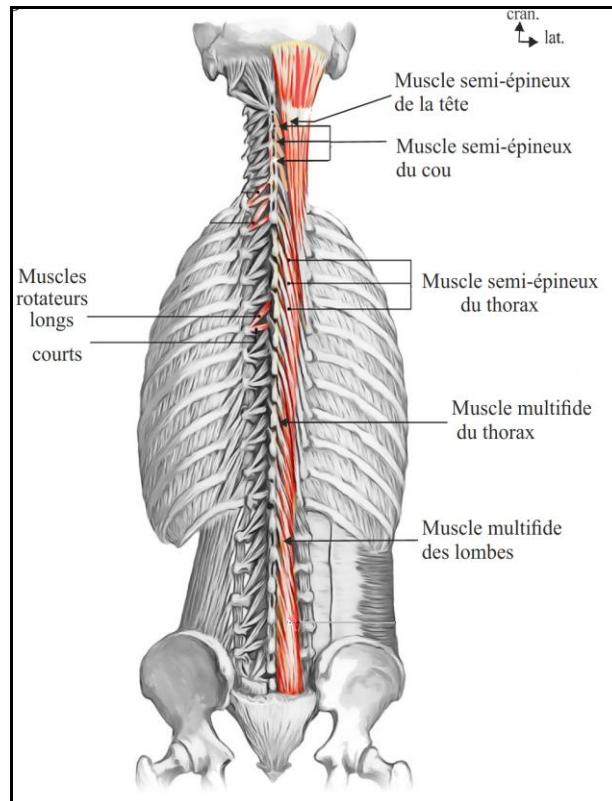


Figure 31: Muscles intrinsèques, plan profond [Image en ligne [83]].

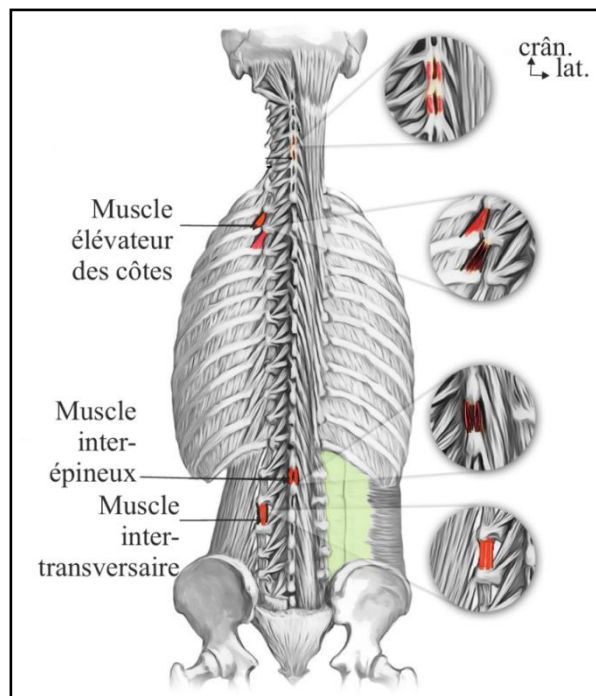


Figure 32: Muscles intrinsèques, plan profond [Image en ligne [83]].

La masse sacro-lombale (Fig.34) est une masse musculaire placée à la face dorsale du bassin et du rachis lombal, recouverte superficiellement par le fascia thoraco-lombal, elle correspond à l'origine commune des trois colonnes constituant le muscle érecteur du rachis (83) :

- Colonne latérale : muscle ilio-costal.
- Colonne intermédiaire : muscle longissimus.
- Colonne médiale : muscle épi-épineux.

Les colonnes musculaires remontent verticalement le long du rachis, chacune présente un segment lombal, thoracique et cervical.

2-1-2. Plan Superficiel

Un seul muscle occupe ce plan : le m. splénius (Fig.34) qui se situe dans la nuque.

2-2. Muscles Extrinsèques

Les muscles extrinsèques se placent sur trois plans : profond, intermédiaire et superficiel (Fig.15). Leurs actions se font en dehors du rachis, ils assurent la mobilité des membres et participent aux mouvements respiratoires.

2-2-1. Plan profond

- Muscle serratus postéro-supérieur,
- muscle serratus postéro-inférieur.

2-2-2. Plan Intermédiaire

- Muscle élévateur de la scapula,
- muscle petit rhomboïde,
- muscle grand rhomboïde.

2-2-3. Plan superficiel

- Muscle trapèze en haut,
- muscle latissimus dorsi en bas.

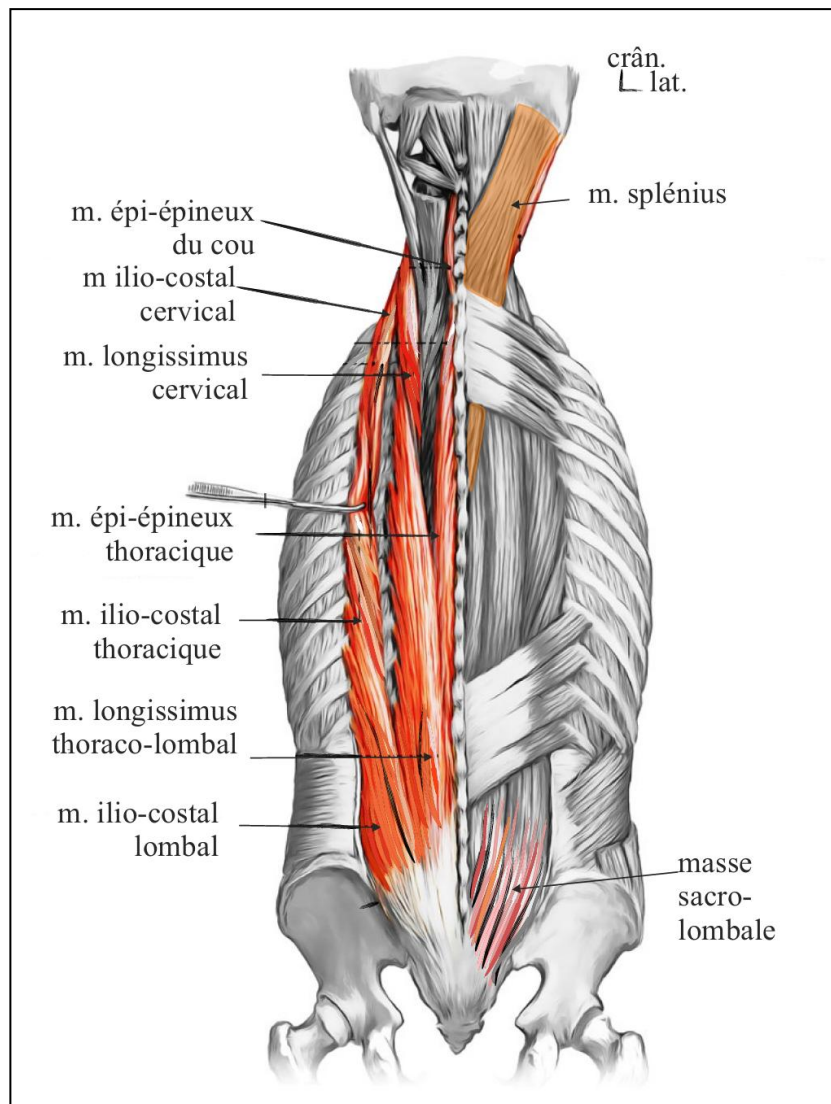


Figure 33 : Muscles intrinsèques, intermédiaires à gauche. Extrinsèques intermédiaires à droite, (noter que le m. Splénius appartient aux mm. Intrinsèques superficiels). [Image en ligne [83]].

3. Anatomie descriptive des muscles du rachis.

3-1. Les muscles rotateurs (Fig. 32)

Les mm. rotateurs sont de petits muscles qui s'étendent verticalement sur toute la hauteur du rachis. Plus développés dans la région thoracique ils sont courts ou longs tendus respectivement du processus transverse à la lame vertébrale immédiatement sus jacente ou deux niveau au dessus. L'innervation est assurée par le rameau médial de la branche dorsale du nerf spinal. Leur fonction principale est de stabiliser le rachis. La contraction bilatérale étend le rachis, l'action unilatérale entraîne une rotation du côté opposé.

3-2. Le muscle multifidus (Fig.32)

Le m. multifidus est un muscle profond regroupant une multitude de fascicules charnus et tendineux. Il s'insère en bas sur la face dorsale du sacrum puis sur les processus transverses

des vertèbres. Ils remontent jusqu'à C2 en se fixant à l'apex des processus épineux des deux ou quatre vertèbres sus jacentes. Plus important dans la région lombale (85). En plus d'être stabilisateur ce muscle est extenseur du rachis lorsqu'il agit bilatéralement. Unilatéralement, il incline le rachis du même côté et le fait tourner en sens inverse. Son innervation est segmentaire, par les rameaux médiaux des branches dorsales des nerfs spinaux.

3-3. Le muscle semi-épineux de la tête (Fig. 32)

Le m. semi-épineux de la tête est la portion la plus développée du semi-épineux, il s'étend de l'apex des processus transverses de C7 à T6 et des processus zygapophysaires de C4 à C6 vers l'écaïlle de l'os occipital, entre les deux lignes nuchales supérieure et inférieure à la partie médiale. Son innervation est assurée par les branches dorsales des nerfs spinaux C1 à C5. La contraction bilatérale entraîne une extension de la tête, alors que la contraction unilatérale provoque une inclinaison et une rotation de la tête du même côté.

3-4. Le muscle semi-épineux du cou (Fig.32)

Le m. semi-épineux du cou est un muscle grêle et allongé situé médialement par rapport au précédent. Il s'insère sur les processus transverses de T1 à T5 parfois T6 et sur le ligament nuchal, les fibres musculaires remontent et se terminent sur les processus épineux de C2 à C4. L'innervation du muscle est fournie par les branches postérieures des nerfs spinaux C3 à C6. L'action bilatérale étend le rachis cervical, l'action unilatérale incline le rachis et entraîne une rotation controlatérale.

3-5. Le muscle semi-épineux du thorax (Fig.32)

Le m. semi-épineux du thorax est formé de minces faisceaux tendus des processus transverses des six dernières vertèbres thoraciques aux processus épineux des six premières vertèbres thoraciques. Il est innervé par les branches dorsales des nerfs spinaux T4 à T6.

3-6. Les muscles inter-transversaires (Fig.33)

Les mm. inter-transversaires sont de petits muscles verticaux présents sur tout le rachis, tendus entre les processus transverses de vertèbres voisines. À l'étage thoracique, la mobilité réduite fait que ces muscles soient atrophiés réduits à des ligaments inter-transversaires. Plus importants sur le segment thoracique distal, ils jouent le rôle de stabilisateur des vertèbres lors des mouvements spinaux de large amplitude (80). Ils reçoivent des filets nerveux des rameaux dorsaux des nerfs spinaux.

3-7. Les muscles inter-épineux (Fig.33)

Les mm. inter-épineux sont de petits muscles verticaux pairs placés de part et d'autre de la ligne médiane entre les processus épineux de deux vertèbres adjacentes. Pour les mêmes raisons que les inter-transversaires ces muscles font défaut à l'étage thoracique.

3-8. Les muscles élévateurs des côtes (Fig.33)

Les mm. élévateurs des côtes (m. surcostaux) sont douze petits muscles triangulaires situés à la partie dorsale des espaces inter-costaux, ils n'existent que sur le rachis thoracique, leur volume augmente progressivement de haut en bas. Le premier s'insère sur C7 et le

dernier sur T11. Obliques, ils vont de l'apex des processus transverses vers le bord supérieur de la côte sous jacente près de la tubérosité. Ils interviennent lors de l'inspiration pour élever les côtes. Ils sont innervés par les rameaux dorsaux des nerfs spinaux.

3-9. Le muscle ilio-costal (Fig.34)

Le m. ilio-costal occupe la partie latérale de la gouttière vertébrale, il se compose de trois parties qui se chevauchent de bas en haut, situé en dehors du longissimus. L'action bilatérale de ces muscles étend le rachis, l'unilatérale l'incline du même côté. Les rameaux latéraux des branches dorsales des nerfs spinaux C8 à L1 assurent leur innervation.

- Muscle ilio-costal des lombes

C'est le plus latéral des m. ilio-costaux, il s'insère par une lame tendineuse et des fibres charnues sur la partie dorsale du versant médial de la crête iliaque, l'épine iliaque postéro-supérieure, la crête sacrale médiane, le sillon sacral dorsal et les processus transverses de L3 à L5. Vertical et aplati il s'attache en haut sur la face latérale de l'angle dorsal des 6 dernières côtes.

- Muscle ilio-costal thoracique

Le m. ilio-costal thoracique est placé médialement au précédent, il naît par des fibres charnues et des languettes tendineuses sur l'angle dorsal des 6 dernières côtes. Il remonte verticalement pour se terminer sur l'angle dorsal des 6 premières côtes.

3-10. Le muscle ilio-costal cervical

Le m. ilio-costal cervical s'insère par des fibres charnues et des languettes tendineuses au niveau de la face latérale de l'angle postérieur de T7 à T4. Il monte verticalement jusqu'aux processus transverses de C4 à C6 où il termine.

3-11. Le muscle longissimus (Fig.34)

Il se situe dans la partie moyenne de la gouttière vertébrale, il monte verticalement latéralement aux processus transverses. Il se compose de 3 parties qui reçoivent leur innervation des rameaux latéraux des branches dorsales des nerfs spinaux C1 à L5.

- Muscle longissimus thoraco-lombal

Le m. longissimus thoraco-lombal prend son origine par de petits tendons fixés sur la crête sacrale médiane, l'épine iliaque postéro-supérieure, le 1/3 dorsal du versant médial de la crête iliaque, sur les processus épineux de L1 à L5. Le muscle remonte le long du rachis en se ramifiant en languettes sur la face dorsale du processus transverse L1 à L5, sur les côtes de part et d'autre de l'articulation costo-transversaire par deux faisceaux latéral et médial. L'action bilatérale étend le rachis, l'unilatérale l'incline du même côté.

- Muscle longissimus cervical

Le longissimus cervical est un muscle vertical qui remonte en arrière des lames vertébrales. Il prend son origine par de courtes fibres charnues et tendineuses sur la face postérieure des processus transverses de T1 à T6 se terminant sur les tubercules dorsaux des processus transverses de C2 à C6. Son action et son innervation sont semblables à celle du précédent.

- Muscle longissimus céphalique

Le longissimus céphalique est situé à la partie postéro-latérale du cou. Il se fixe sur les processus transverses de C3 à T3. Oblique en dehors il se dirige vers la mastoïde où il se termine. Il a une action homologe aux deux muscles précédents sur la tête.

3-12. Le muscle épi-épineux (Fig.34)

Le muscle épi-épineux est situé à cheval sur la jonction thoraco-lombale, il s'insère par de petits tendons sur les faces latérales des processus épineux de T3 à T9 et se termine par de courtes fibres tendineuses sur le sommet des processus épineux de T11 à L3. C'est un muscle allongé à concavité médiale. C'est un extenseur du rachis et un stabilisateur de la charnière thoraco-lombale.

3-13. Les muscles splénius (Fig.34)

Les mm. splénius n'appartiennent pas à proprement parler aux muscles du rachis thoracique, ils se situent dans la région cervicale dorso-latérale. Les splénius enveloppent les muscles verticaux profonds, d'où le nom splénion qui signifie bandage. Leur action se fait sur la tête et le cou, seules leurs insertions les plus caudales atteignent les vertèbres T3 à T4.

3-14. Le muscle élévateur de la scapula (Fig.35)

Le m. élévateur de la scapula est un muscle grêle oblique situé en dehors du splénius de la tête, derrière les muscles scalènes. Il s'insère sur le bord médial de la scapula près de l'angle supérieur et se termine sur les processus transverses de C1 à C4. S'il prend appui sur le rachis sa contraction entraîne une élévation et une rotation médiale de la scapula, si l'appui se fait sur la scapula il incline le rachis cervical du même côté. Son innervation est assurée par les rameaux ventraux de C3 et C4 et par le nerf scapulaire dorsal, branche collatérale dorsale du plexus brachial.

3-15. Le muscle serratus postérieur et supérieur (Fig.34)

Le m. serratus postérieur et supérieur est un muscle mince de forme quadrangulaire situé dans la partie supérieure du dos, plus profond que les muscles rhomboïdes. Il se fixe sur ligament nuchal, les processus épineux de C6 et C7, T1 et T2. Ses fibres sont obliques en bas et latéralement descendent pour se terminer sur l'angle costal de la 2^{ème} à la 5^{ème} côte. Sa fonction principale est d'élever les côtes, c'est un muscle inspirateur. Il reçoit son innervation des premiers nerfs intercostaux.

3-16. Le muscle serratus postérieur et inférieur (Fig.34).

Le m. serratus postérieur et inférieur est situé à hauteur de la jonction du thoraco-lombale. Il se fixe sur les processus épineux de T11 à L3 et les ligaments supra-épineux correspondants. Il se porte obliquement en haut et latéralement, rejoint le bord inférieur des quatre dernières côtes où il se termine. Sa contraction abaisse les côtes, mais des études électromyographiques ont conclu qu'il ne joue aucun rôle dans la respiration, et lui confère un rôle proprioceptif. Il est innervé par les quatre derniers nerfs intercostaux.

3-17. Les muscles rhomboïdes mineur et majeur (Fig.34).

Les mm. rhomboïdes sont de forme losangique, recouverts par le muscle trapèze. Ils se placent en superficie des muscles spinaux verticaux. De direction oblique en bas et latéralement, ils s'insèrent entre les processus épineux de C6 et C7 et du ligament nuchal adjacent à la partie supérieure du bord médial de la scapula (rhomboïde mineur), T1 à T5, et le ligament supra épineux correspondant vers la partie inférieure du bord médial de la scapula (rhomboïde majeur). Les deux muscles ont une action similaire : ils tirent et élèvent la scapula vers le rachis, lui impriment un mouvement de rotation latérale et la stabilisent en la fixant sur le thorax. Le nerf scapulaire dorsal C5 assure leur innervation.

3-18. Le muscle trapèze (Fig.34)

Le m. trapèze est un muscle superficiel des régions cervicale et thoracique dorso-supérieure. Étalaé en éventail à base spinale, il présente trois parties distinctes selon l'orientation des fibres musculaires. Son innervation provient du nerf accessoire (XIème nerf crânien) et du plexus cervical par des rameaux ventraux de C2, C3, C4.

- faisceau supérieur, oblique en bas et en dehors s'étend du 1/3 médial de la ligne courbe occipitale supérieure, de la protubérance occipitale externe, des processus épineux de C1 à C7 et du ligament nuchal, au 1/3 latéral de la clavicule. Il participe à l'élévation de la clavicule et du moignon de l'épaule, il réalise la bascule de la scapula latéralement, l'extension et l'inclinaison de la tête du même côté et la rotation controlatérale de la tête et du cou.
- faisceau moyen, est constitué de fibres musculaires orientées transversalement des processus épineux de T1 à T5 au bord supérieur de la scapula. Il intervient dans l'adduction de la scapula.
- faisceau inférieur, formé de fibres obliques se dirigeant latéralement vers le haut, depuis les processus épineux de T6 à T12 à la partie médiale de l'épine de la scapula. Il bascule latéralement la scapula et l'abaisse.

3-19. Le muscle latissimus dorsi (Fig.34)

Le m. latissimus dorsi est un muscle large et plat recouvrant la partie dorso-latérale du thorax. Il est formé d'une série de fascicules segmentaires fixés sur les processus épineux de T6 à T12, les processus épineux de L1 à L2, au raphé latéral du fascia thoraco-lombal, sur la crête iliaque et les trois dernières côtes. Il se termine par un tendon épais et plat dans le fond de la gouttière inter-tuberculaire de l'humérus médialement au tendon du grand pectoral. Son action principale est de mouvoir le membre thoracique, il appartient de ce fait aux muscles de l'épaule (86). Le nerf du latissimus dorsi, collatéral du plexus brachial assure son innervation.

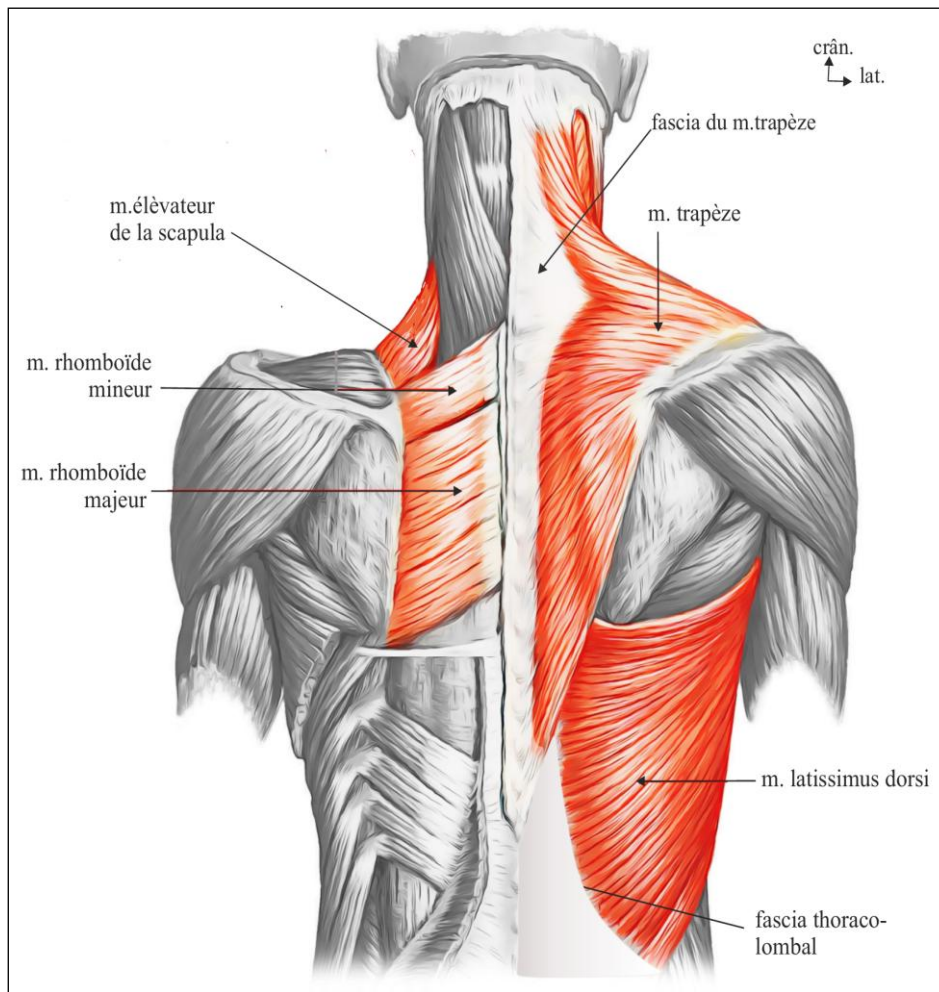


Figure 34: Muscles extrinsèques, plan intermédiaire et superficiel [image en ligne [4]].

II. FASCIAS THORACIQUES DORSAUX.

Les fascias thoraciques sont des structures annexées aux muscles du dos, de ce fait ils portent la même dénomination que le muscle auquel ils se rattachent. Dans la région thoracique dorsale on distingue : six fascias de contention et un fascia d'insertion ; le fascia thoraco-lombal (FTL). Disposés de part et d'autre de la ligne médiane ces fascias se disposent sur quatre plans :

- En superficie ; en haut, le fascia du muscle trapèze dessine une zone ovale en regard de T1 à T4, en bas le fascia thoraco-lombal (FTL) (fascia du latissimus dorsi) (43) (Fig. 36). le TFL est une lame tendineuse tendue de la région sacrale à la région thoracique (87), mince dans sa portion thoracique, elle est épaisse et résistante dans sa partie lombale. Médialement son insertion se fait sur les processus épineux de T6 à T12, de L1 à L5, la crête du sacrum, le 1/3 dorsal de la crête iliaque. Latéralement sur les côtes à proximité de l'angle. Les fibres de ce fascia s'entrecroisent lui conférant ainsi une grande résistance.

On décrit à ce fascia trois feuillets [85] (Photo 02):

- Profond, tapisse la face ventrale du muscle quadratus lombal [86] et se prolonge latéralement par le fascia transversalis.
 - Moyen, s'insinue entre le m. érecteur du rachis et le quadratus lombal [87]. Il se fixe médialement aux processus épineux et se prolonge en dehors par le fascia des muscles transverses et obliques de l'abdomen, un tractus fibreux le relie au précédent.
 - Superficiel, placé à cheval sur le muscle glutéal majeur et le latissimus dorsi. Cette disposition lui permet d'assurer la transmission des forces [88] entre le bassin, le rachis et les membres pelviens, coordonnant ainsi leurs activités avec celles des membres thoraciques [89].
- En dessous du FTL se trouve le fascia des muscles rhomboïdes.
 - Une lame fasciale intermédiaire est tendue entre les muscles serratus, mince formée de fibres transversales étagées des processus épineux de T4 à T9. C'est une surface de glissement dans l'articulation scapulo-thoracique [41].
 - En profondeur, le fascia du muscle longissimus.

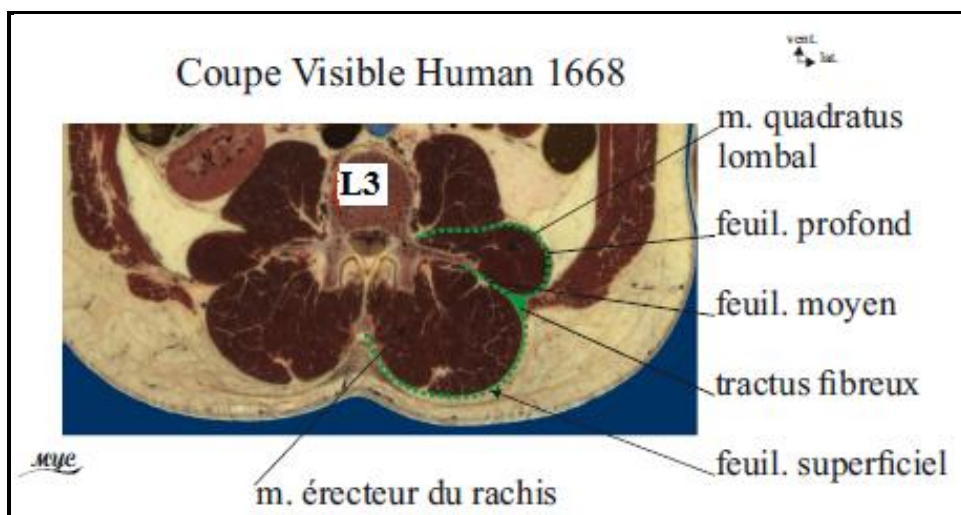


Photo 02 : Fascia thoraco-lombal coupe transversale [Base de données VHP]

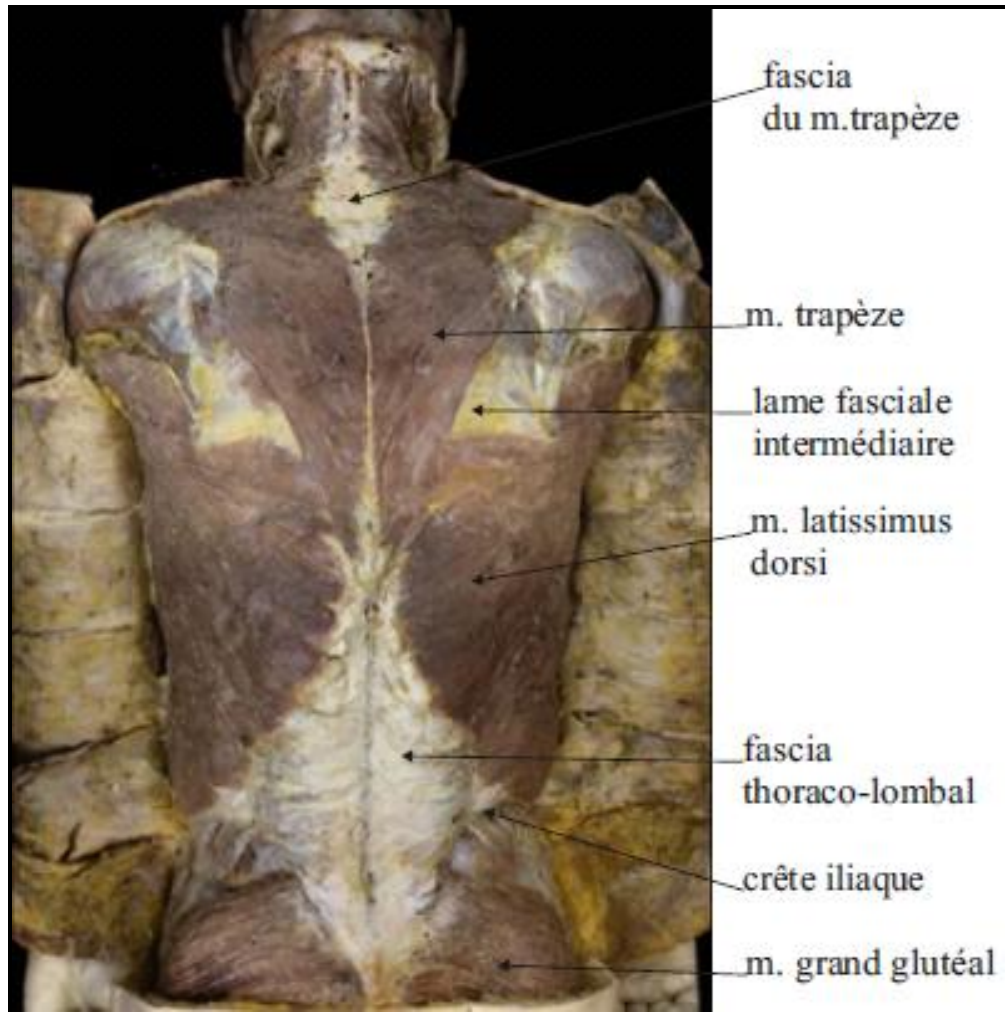


Photo 03 : Fascias thoraciques dorsaux, plan superficiel [d'après Alsup et Fox [2]].

F. RAPPORTS DU RACHIS THORACIQUE.

I. RAPPORTS EXTRINSÈQUES.

Le rachis thoracique répond sur ses faces latérales et ventrale aux éléments para-vertébraux et aux organes du médiastin postérieur (Fig.35) (Fig. 36) (Fig.37), on distingue :

1. CHAINES SYMPATHIQUES THORACIQUES.

Les chaînes sympathiques thoraciques droite et gauche descendent verticalement dans les gouttières costo-vertébrales [64] en position latéro-vertébrale, en avant des têtes costales et des éléments vasculo-nerveux intercostaux (Fig.38) (Fig. 39). On dénombre dix à onze ganglions sympathiques thoraciques, rarement douze [64] [41] , le 1^{er} et 2^{ème} ganglion sont fusionnés au ganglion cervical inférieur et forment le ganglion stellaire [68]. Les nerfs splanchniques se détachent de ce chapelet de ganglions : Le nerf grand splanchnique, est issu du 6^{ème} au 9^{ème} ganglion, il descend à la face latérale des corps vertébraux [41], plaqué par la plèvre contre le rachis. Le nerf quitte le thorax en traversant le diaphragme latéralement au crus diaphragmatis. Dans la cavité abdominale il rejoint le plexus cœliaque. Le ganglion splanchnique de Lobstein est toujours présent sur le trajet du nerf grand splanchnique droit. Le nerf petit splanchnique est issu de manière inconstante du 10^{ème} et 11^{ème} ganglion. Il descend en arrière et en dehors du précédent et rejoint le plexus cœliaque. Le nerf splanchnique inférieur, inconstant naît du dernier ganglion thoracique. Les trois nerfs splanchniques longent la face ventro-latérale du rachis thoracique.

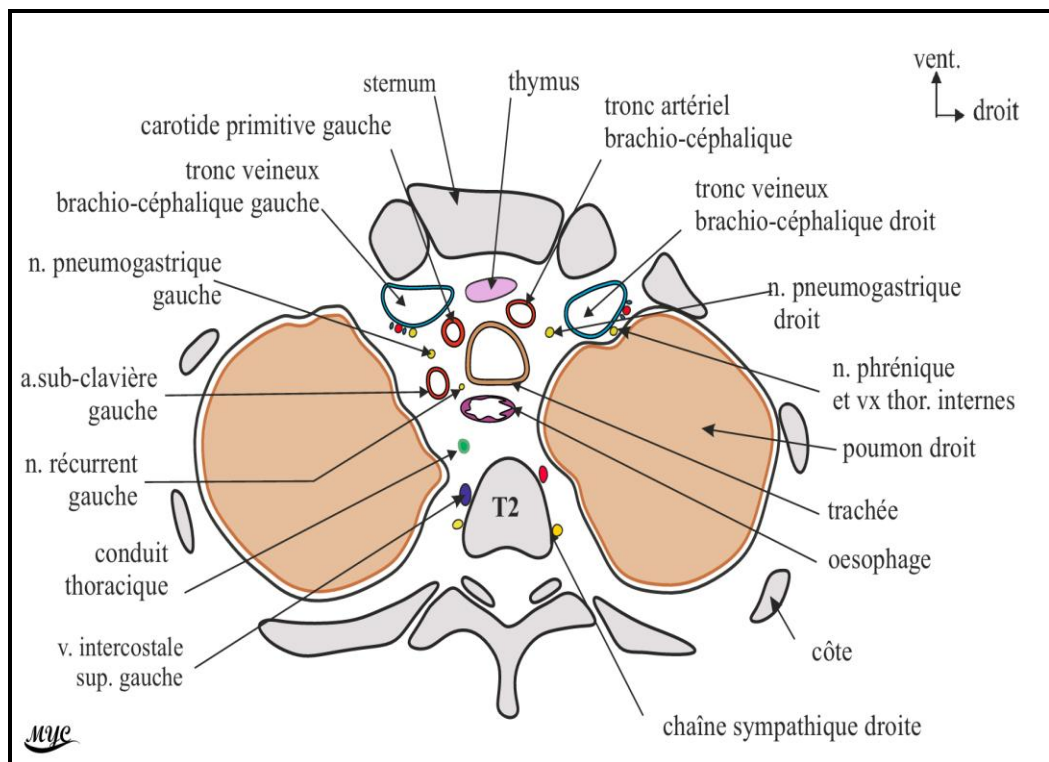


Figure 35 : Coupe transversale du thorax en T2.
[Base de données VHP, coupe1329, légendée d'après Rouvière H [43]].

PARTIE THÉORIQUE : RAPPORTS DU RACHIS THORACIQUE

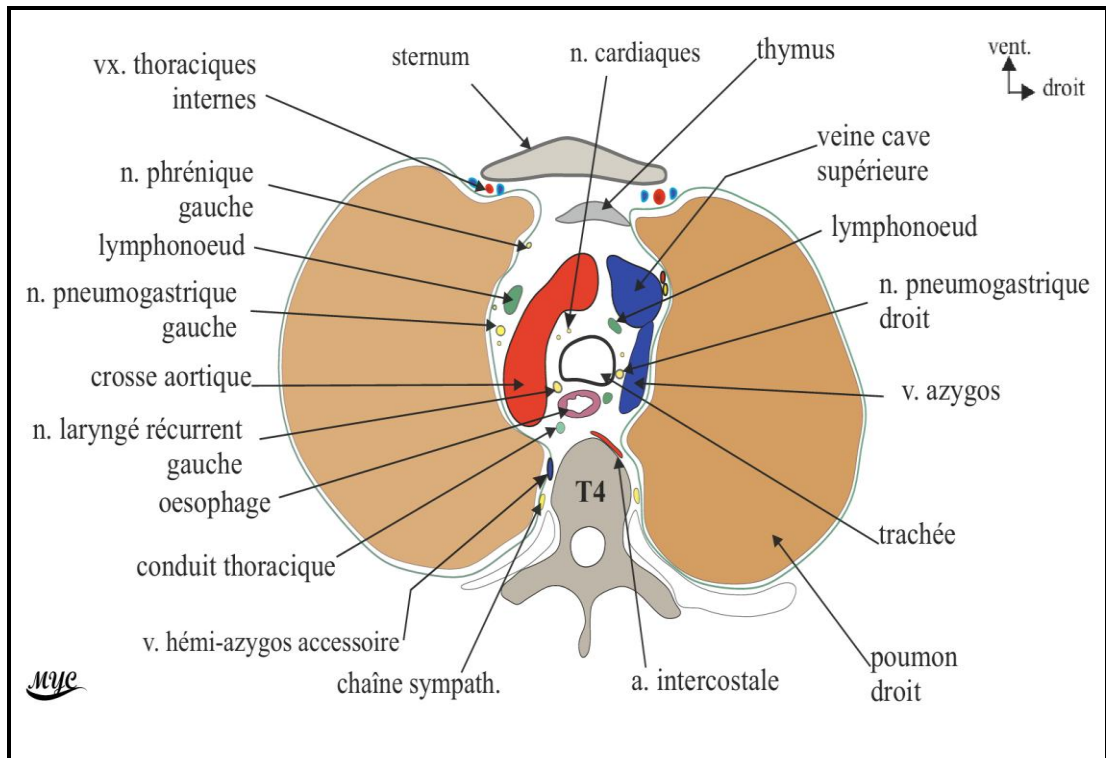


Figure 36 : Coupe transversale du thorax en T4.
[Base de données VHP, coupe 1368, légendée d'après Rouvière h [43]].

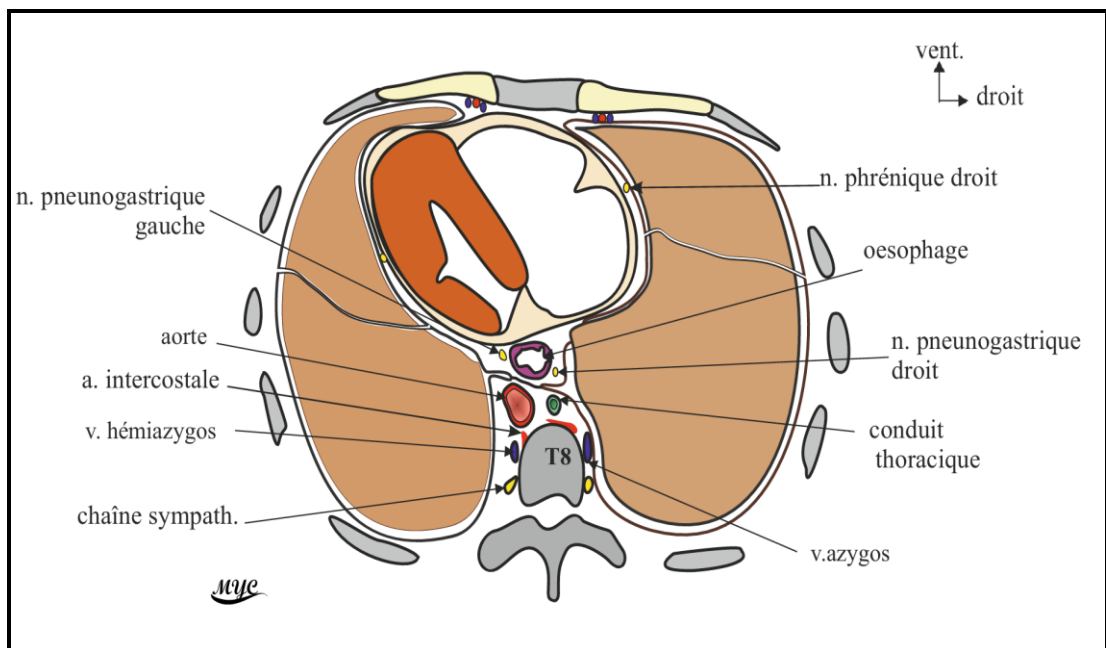


Figure 37 : Coupe transversale du thorax en T8.
[Base de données VHP, coupe 1451, légendée d'après Rouvière h [43]].

2. SYSTÈME AZYGOS

Le système azygos (Fig.38) est appliqué de chaque côté du rachis thoracique, il comprend trois veines :

2.1. Veine azygos (Fig. 38).

La veine azygos naît dans le thorax en arrière de la veine cave inférieure, à droite du 11^{ème} espace intercostal à partir de deux racines. Par un trajet verticalement ascendant la veine remonte à droite dans le médiastin postérieur, à la face ventrale des 7 ou 8 dernières vertèbres thoraciques [67]. À hauteur de T4, elle décrit une crosse à concavité inférieure, au dessus du pédicule pulmonaire droit. La crosse de l'azygos emmène la veine dans le médiastin antérieur où elle se termine en s'ouvrant à la face dorsale de la veine cave supérieure à hauteur de T3. La veine azygos reçoit les veines intercostales des huit derniers espaces intercostaux droits [78]. La veine intercostale supérieure qui draine les 2^{ème} et 3^{ème} espaces, la veine du 1^{er} espace se jette directement dans la veine brachio-céphalique droite [78].

2.2. Veines hémi-azygos et hémi-azygos accessoire (Fig.38).

Les veines hémi-azygos sont placées à gauche du rachis thoracique, en dehors et en arrière de l'aorte thoracique [41]. La veine hémi-azygos accessoire (hémi-azygos supérieure) se forme sur le flanc médial du 4^{ème} espace intercostal gauche, descend sur le flanc gauche de T5 à T9, se coude médialement et passe en arrière de l'aorte et de l'œsophage pour rejoindre la veine azygos à hauteur de T7. La veine hémi-azygos (hémi-azygos inférieure) monte sur le flanc gauche du rachis thoracique jusqu'à T9, en arrière de l'aorte, elle se coude à droite pour rejoindre la veine azygos.

3. CONDUIT THORACIQUE (Fig. 38).

Le conduit thoracique collecte la lymphe sub-diaphragmatique. Son origine est variable, haute en T11 ou T12, basse en L1 ou L2 [41]. Dans le second cas il est habituel de retrouver une dilatation ; la citerne du Chyle. Le conduit pénètre dans le thorax par l'orifice aortique du diaphragme. Dans le médiastin postérieur il est plaqué à la face ventrale des vertèbres, les artères intercostales et les terminaisons des veines hémi-azygos accessoire et hémi-azygos [91] les séparent.

La veine azygos monte à droite, l'aorte thoracique descend à gauche et l'œsophage est en avant du rachis. À hauteur de T5, le conduit se porte à gauche, croise l'œsophage en arrière et continue son trajet ascendant dans le médiastin supérieur en arrière de l'artère subclavière gauche. À la base du cou, à hauteur du processus transverse de C7, il décrit une crosse vers l'avant pour s'aboucher dans le confluent jugulo-subclavier gauche. Il existe de nombreuses et fréquentes variations du conduit thoracique [92].

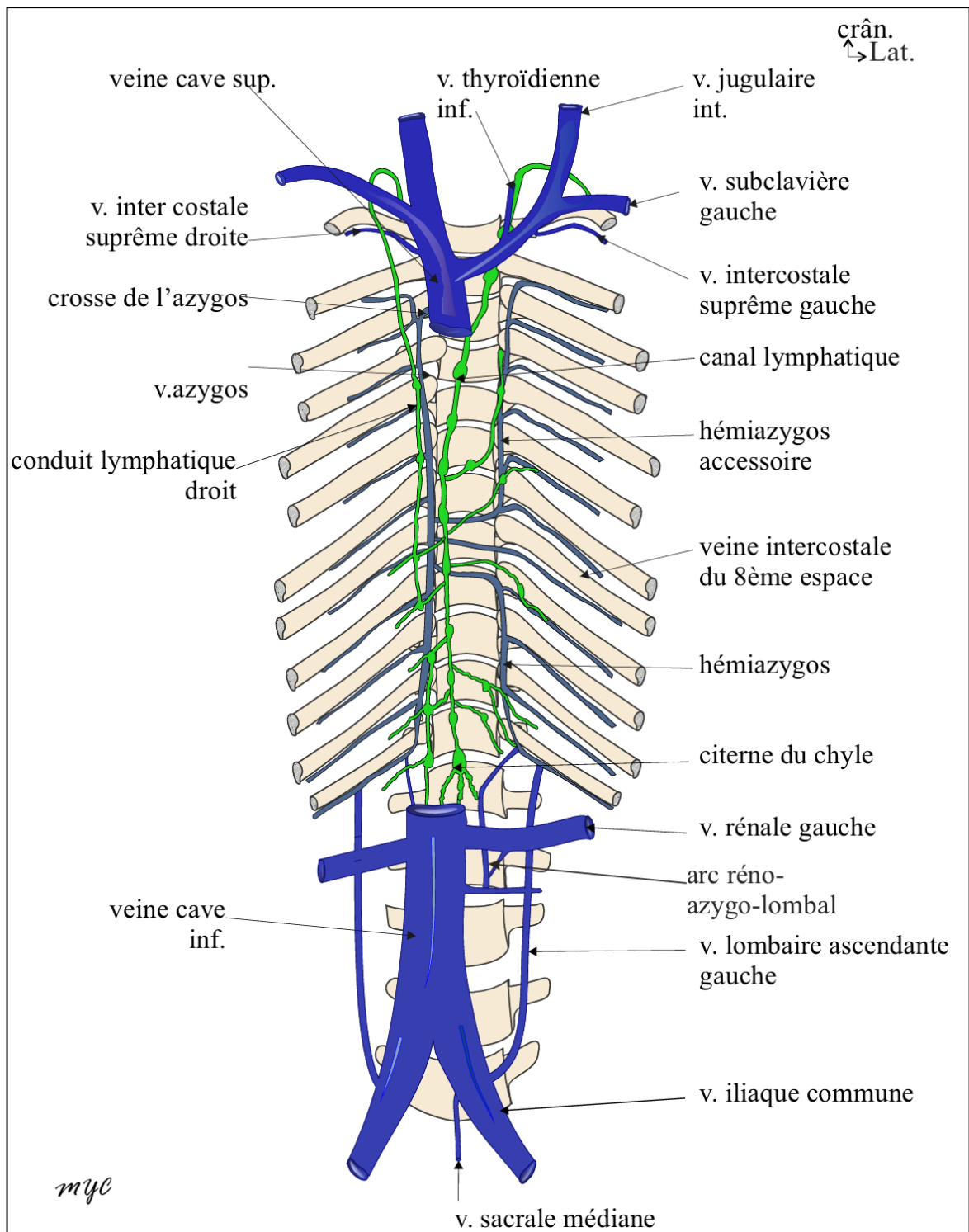


Figure 38: Projection du système azygos et du système lymphatique sur le rachis thoracique [d'après Rouvière [43]].

4. AORTE THORACIQUE.

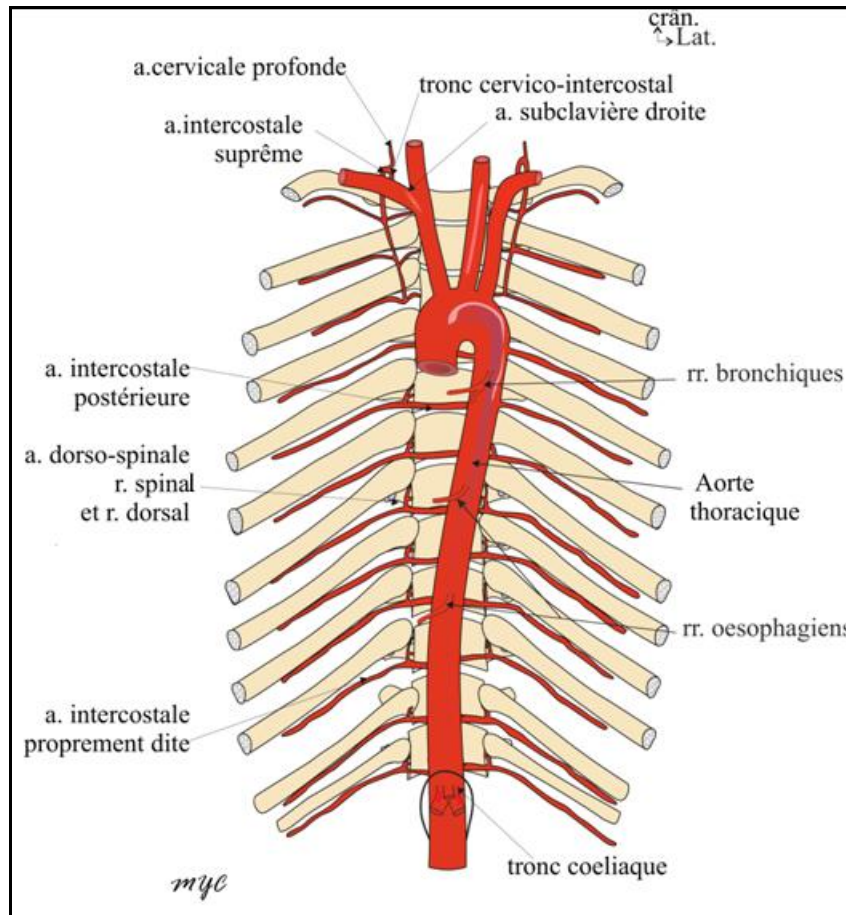


Figure 39 : Aorte thoracique, vue ventrale. [Poirier et Charpy (98)]

L'aorte thoracique (Fig. 39) descend dans le médiastin postérieur depuis la crosse jusqu'à l'orifice aortique du diaphragme. En regard de T4, T5, T6 elle est latéro-vertébrale gauche, prévertébrale en T9, T10, T11, T12 [93] et franchit l'hiatus aortique du diaphragme en T12. Elle fournit de nombreuses collatérales: les artères bronchiques, œsophagiennes, médiastinales, péricardiques, intercostales postérieures, phréniques supérieures [94].

5. OESOPHAGE.

L'œsophage (Fig. 40) pénètre dans le thorax à hauteur de T2, il descend dans le médiastin postérieur en avant du rachis. Jusqu'à T4 il est plaqué contre les vertèbres et épouse la forme de la cyphose thoracique. À partir de T4 il se déporte progressivement à gauche, croise la face ventrale de l'aorte thoracique à hauteur de T8 [95] et quitte le thorax à gauche de la ligne médiane en passant par l'hiatus œsophagien du diaphragme. Les crosses vasculaires aortique et azygos divisent l'œsophage en trois segments [96] : le segment sus azygo-aortique descend dans le médiastin supérieur, compris entre le rachis thoracique (T2 à T4) en arrière et la trachée en avant [96]. Le segment inter-azygo-aortique correspond à la vertèbre T4, l'œsophage est ici séparé du rachis par le

conduit thoracique. Le segment sous azygo-aortique se projette de T4 à T9, l'aorte thoracique et le conduit thoracique sont à gauche, la veine azygos à droite. L'hiatus œsophagien se situe à hauteur de T10, le nerf pneumogastrique droit est sur sa face dorsale, le gauche sur sa face ventrale.

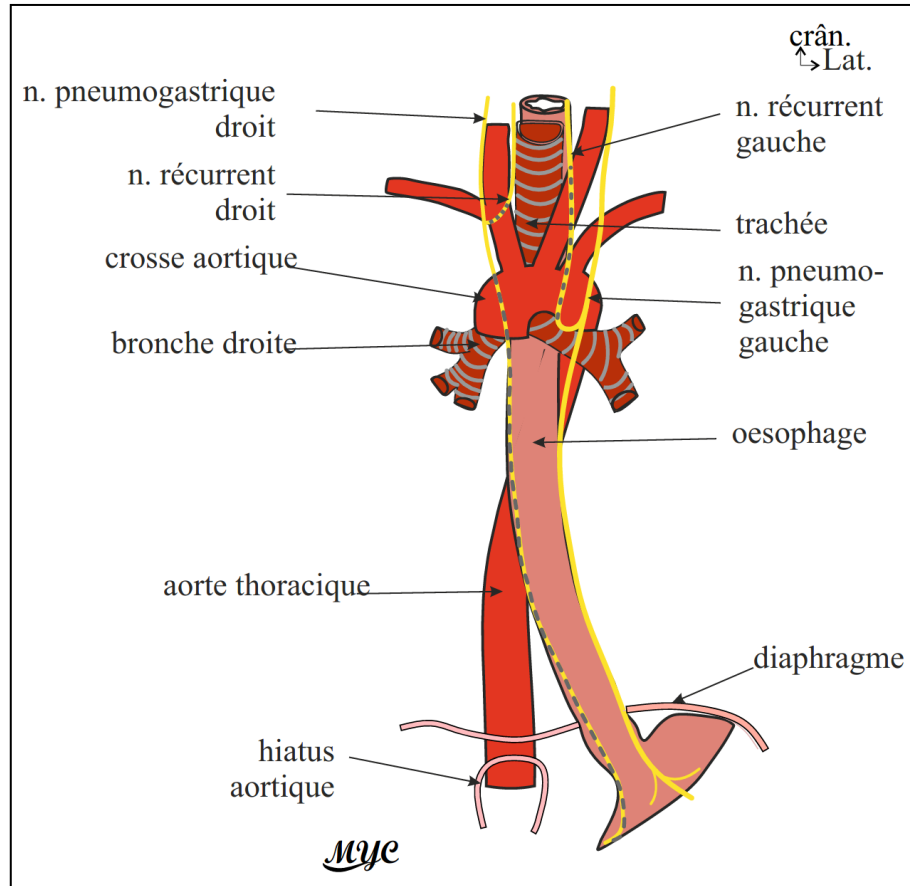


Figure 40 : Médiastin postérieur, trachée, œsophage, nerf pneumogastrique, aorte thoracique. [D'après Hladikova J [96]]

6. LES NERFS PNEUMOGASTRIQUES.

Dans le thorax les nerfs pneumogastriques (Fig. 40) traversent le médiastin supérieur et postérieur [68], le nerf pneumogastrique droit est sur la face dorsale du tronc veineux brachio-céphalique droit, l'artère brachio-céphalique et la trachée sont médiales. Il rejoint le médiastin postérieur en passant en dedans de la crosse azygos et en arrière du pédicule pulmonaire droit, il longe ensuite le bord droit puis la face dorsale de l'œsophage [41].

Le nerf pneumogastrique gauche descend latéralement à l'artère carotide commune gauche, contourne le flanc ventro-latéral de la crosse aortique, sous laquelle il donne le nerf laryngé récurrent gauche, il passe ensuite en arrière du pédicule pulmonaire gauche pour atteindre le bord gauche puis la face ventrale de l'œsophage [41].

II. RAPPORTS INTRINSÈQUES

Les rapports intrinsèques (Fig. 41) du rachis thoracique sont représentés par l'ensemble des structures contenues dans le canal vertébral [67] : le ligament longitudinal postérieur, la moelle spinale, les artères spinales, les racines ventrales et dorsales des nerfs spinaux, les méninges qui entourent les racines nerveuses jusque dans le foramen intervertébral, l'espace sub-arachnoïdien contenant le liquide cérébro-spinal, l'espace épidural occupé par du tissu adipeux renferme les plexus veineux intrarachidiens [68].

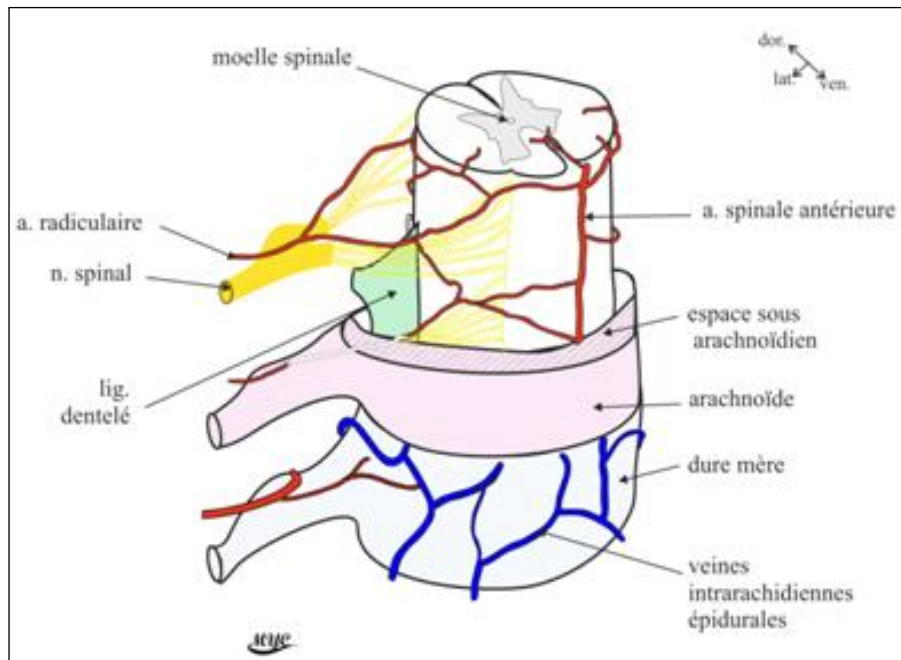


Figure 41 : Rapports intrinsèques du rachis, vue ventro-latérale.
[D'après Lazorthes G (71)]

G. VASCULARISATION DU RACHIS THORACIQUE.

I. VASCULARISATION ARTÉRIELLE.

La vascularisation artérielle des vertèbres thoraciques est segmentaire, elle est assurée par les branches dorso-spinales des artères intercostales postérieures.

1. Artères intercostales postérieures.

Les artères intercostales postérieures (Fig. 16-g) sont au nombre de douze. Elles naissent par paire à la face dorsale de l'aorte thoracique, les deux ou trois premières artères proviennent de l'artère intercostale suprême, branche du tronc cervico-intercostal de l'artère subclavière [64]. La douzième artère intercostale (artère subcostale) est rattachée à la paroi lombale.

Les artères intercostales postérieures contournent les faces ventro-latérales des corps vertébraux en avant du LLA, les artères gauches sont plus courtes en raison de la situation de l'aorte. À la partie dorso-médiale de l'espace intercostal elles se divisent en deux branches [41] :

- 1-1.** *Artère dorso-spinale* (Fig. 42) se porte médialement et donne deux branches :
 - *L'artère spinale* passe par le foramen intervertébral, pénètre dans le canal vertébral et se divise toujours en trois branches :
 - radriculaire pour la moelle spinale ;
 - rétro-corporéale pour la face dorsale du corps vertébral et la partie ventrale du canal vertébral ;
 - dorsale pour la face ventrale de l'arc vertébral et la partie dorsale du canal vertébral.
- 1-2.** *L'artère dorsale* se porte dorsalement, irrigue les muscles et téguments du dos. Artère intercostale proprement dite, rejoint l'espace intercostal latéralement.

2. Vascularisation artérielle de la vertèbre (Fig. 42)

La distribution des vaisseaux nourriciers vertébraux est similaire à tous les étages rachidiens, elle se fait toujours de manière segmentaire [98]. Le corps vertébral est alimenté par deux groupes artériels [99] : Un *groupe ventral pré-vertébral*, issu des artères intercostales postérieures, aborde le corps vertébral par sa face ventrale et un *groupe dorsal intracanalair*, issu des branches rétro-corporéales des artères spinales, aborde le corps par sa face dorsale. L'arc vertébral, reçoit lui aussi deux groupes d'artères : Un *groupe ventral intracanalair*, issu des branches dorsales des artères spinales et un *groupe dorsal rétro-vertébral*, issu des branches musculaires médiales du rameau dorsal.

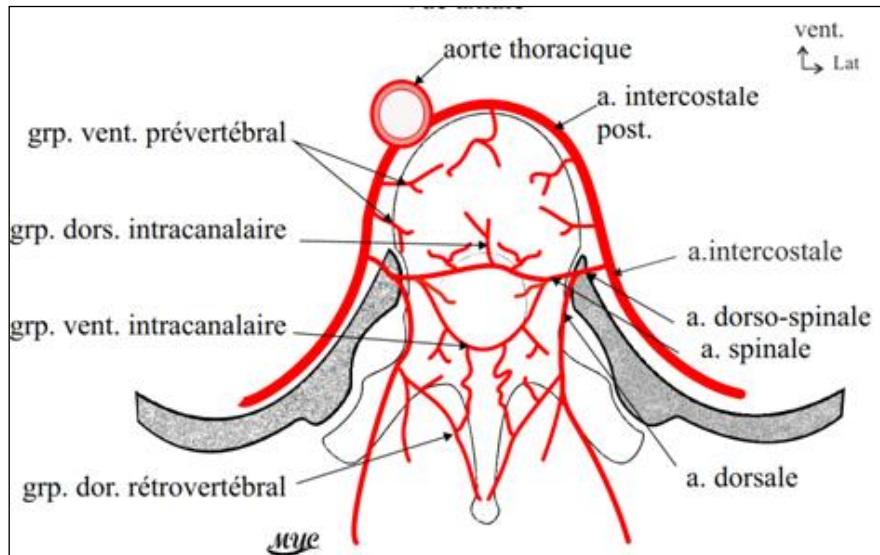


Figure 42 : Vascularisation artérielle vertébrale, vue axiale. [D'après Chiras J et al [100]]

II. DRAINAGE VEINEUX.

Le sang veineux des vertèbres thoraciques (Fig.43) (Fig. 44) rejoint deux réseaux, intra et extra rachidiens (102) . Plexiformes interconnectés ces réseaux sont présents sur toute la hauteur du rachis, du foramen magnum au hiatus sacral.

1. Réseau veineux intra rachidien thoracique.

Le réseau veineux intra rachidien est situé dans le canal vertébral, de localisation épidurale, il collecte le sang des vertèbres, de la moelle spinale, et des méninges, il est largement anastomosé au réseau crânien (103). Il comprend quatre veines longitudinales, anastomosées par des veines transversales.

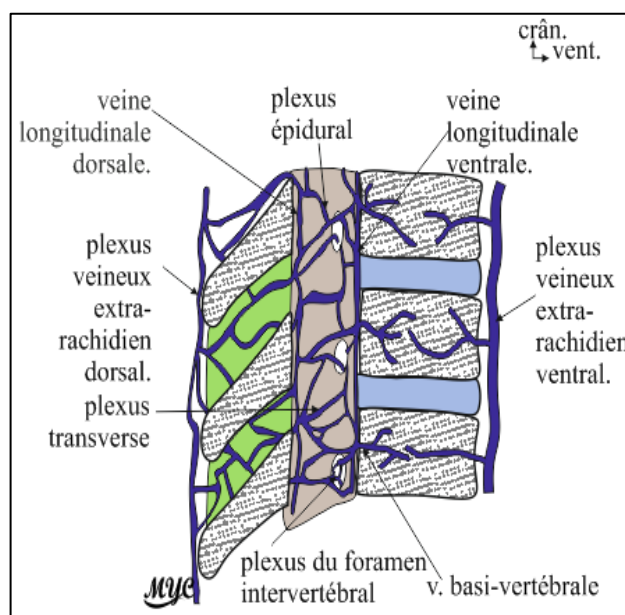


Figure 43 : Drainage veineux du rachis, coupe sagittale. [D'après Cramer DC et al (6)].

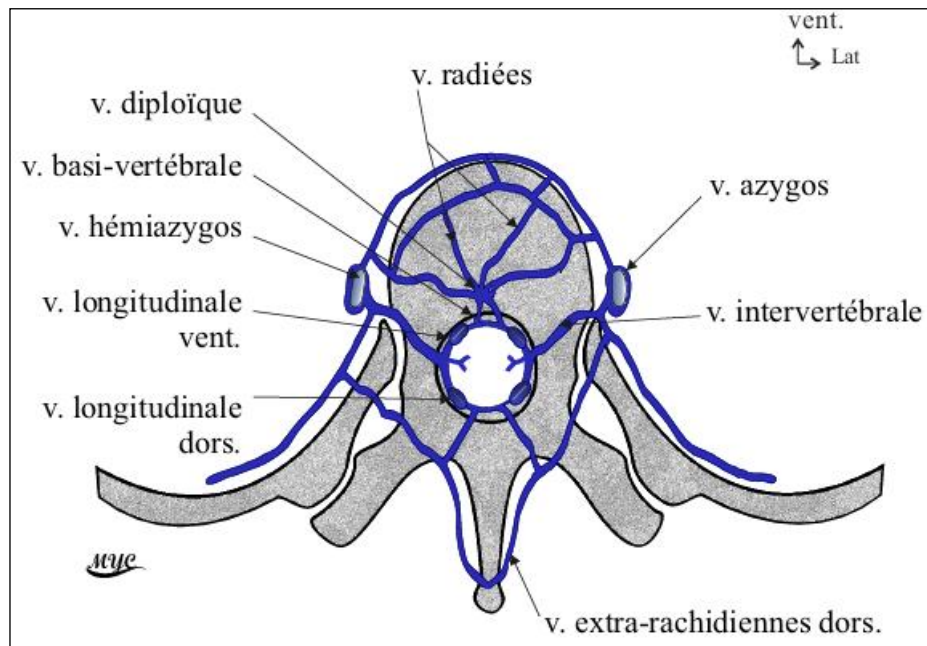


Figure 44 : Plexus veineux rachidiens, vue axiale. [D'après Monod et Duhamel [104]].

- 1-1. Deux veines longitudinales ventrales, adhérentes à la face dorsale des corps vertébraux, placées latéralement au LLP et en dedans des pédicules. Elles reçoivent les veines basi-vertébrales.
- 1-2. Deux veines longitudinales dorsales, moins importantes, placées à la face ventrale des lames et du LF, elles communiquent avec le plexus extra-rachidien dorsal par des perforantes.

Des anastomoses transversales décrivent un maillage comportant : un plexus transverse ventral, deux plexus transverses latéraux et un plexus transverse dorsal. Le réseau intra rachidien quitte le canal vertébral à chaque étage par les plexus du foramen intervertébral [41] il se déverse dans le réseau extra rachidien.

2. Réseau veineux extra rachidien thoracique.

Le réseau veineux extra rachidien thoracique se localise en avant et en arrière des vertèbres, il comprend :

- 2-1. Les veines extra-rachidiennes ventrales (Fig.41), les plus importantes sont représentées à l'étage thoracique par les veines : azygos, héli-azygos, héli-azygos accessoire, la 8^{ième} veine intercostale gauche, les veines intercostales supérieures gauche et droite.
- 2-2. Les veines extra rachidiennes dorsales, en provenance des muscles et de la peau du dos, forment un plexus non systématisable qui entoure les faces latérales de l'arc vertébral (processus épineux, lames, processus zygapophysaires). Il

communiquent avec le plexus intra rachidien par le foramen intervertébral et les veines perforantes qui traversent le ligament flavum.

3. Vascularisation veineuse de la vertèbre (Fig.44).

La voie de drainage principale du corps vertébral est assurée par la veine basi-vertébrale [52]. Elle collecte par des veines radiées le sang de la partie centrale et dorsale. Elle se déverse dans le plexus transverse ventral en avant du LLP pour rejoindre le réseau longitudinal intrarachidien ventral. Les petites veines ventro-latérales du corps rejoignent le plexus extra-rachidien ventral. L'arc vertébral se draine vers les plexus intra et extra rachidiens dorsaux.

➤ Anatomie clinique

- L'hémangiome vertébral est une tumeur vasculaire bénigne, c'est la plus fréquente des tumeurs axiales, asymptomatique, de découverte radiologique fortuite, elle prédomine au niveau des vertèbres thoraciques, elle est responsable de l'aspect trabéculaire « grillagé » typique de la vertèbre [102].
- Les plexus veineux rachidiens forment une anastomose cavo-cave, crânialement ils se drainent vers les plexus de la base du crâne et caudalement vers les plexus veineux sacrés. C'est un réseau avalvulaire et bidirectionnel [103] qui autorise le passage du sang dans les deux sens. C'est un système de déversoir et de dérivation du système cave [104]. Lorsque la pression intra abdominale augmente, il est capable d'absorber le sang et de le redistribuer vers d'autres parties de la circulation veineuse. Il draine le sang veineux : de la boîte crânienne, des parois du tronc et du pelvis en contournant les grandes veines systémiques et la circulation pulmonaire. C'est une voie de suppléance et d'anastomose entre les systèmes caves et azygos.
- Les plexus rachidiens représentent une voie de dissémination [105] [106] des cancers :
 - Les veines vertébrales communiquent avec les veines bronchiques par le système azygos, avec les veines rénales (en particulier à gauche) et avec les veines de la face postérieure de la thyroïde par les veines thyroïdiennes inférieures.
 - par les veines intercostales un cancer du sein peut métastaser vers les vertèbres,
 - un cancer de la prostate peut métastaser vers les vertèbres [107] par les plexus épидурaux.

III. DRAINAGE LYMPHATIQUE

Les lymphonœuds de la paroi thoracique sont superficiels [108]. La lymphe du rachis thoracique gagne les lymphonœuds thoraciques pariétaux dorsaux, subdivisés en nœuds intercostaux et nœuds juxtavertébraux [109]. (Fig. 41)

1. **Les lymphonœuds intercostaux**, situés à la partie postérieure de l'espace intercostal [109] ont un cheminement variable selon l'espace intercostal considéré.
 - Les lymphonœuds des deux premiers espaces rejoignent la base du cou et se terminent soit dans :
 - le nœud inférieur de la chaîne jugulaire interne,
 - la chaîne cervicale transverse,

- le confluent veineux jugulo-sub-clavier (de Pirigoff).
 - Du 3^{ème} au 6^{ème} espace la lymphe rejoint le canal thoracique à gauche, et le tronc lymphatique broncho-médiastinal droit à droite [110].
 - Du 7^{ème} au dernier espace, par un trajet descendant très sinueux elle rejoint le canal thoracique.
2. **Les lymphonoeuds juxta-vertébraux**, échelonnés le long du rachis, sont latéraux et prévertébraux, ils sont situés sur le trajet des vaisseaux efférents des lymphonoeuds intercostaux. Très nombreux au niveau des 5 derniers espaces intercostaux, les lymphonoeuds se raréfient au niveau des espaces supérieurs.

H. INNERVATION DU RACHIS THORACIQUE

L'innervation du rachis thoracique est segmentaire métamérique. Chaque niveau vertébral reçoit deux nerfs :

- le nerf sinu-vertébral, destiné aux éléments placés ventralement au plan du foramen intervertébral ;
- la branche dorsale du nerf spinal, pour les éléments postérieurs.

1. Nerf sinu-vertébral (Fig 45)

Le nerf sinu-vertébral décrit par Luschka en 1850 naît par deux racines (114), l'une spinale issue du nerf spinal ou de sa branche ventrale, l'autre issue du sympathique arrive par le rameau communicant blanc.

Par un trajet récurrent le nerf sinu-vertébral traverse le foramen intervertébral et pénètre dans le canal vertébral. Il remonte le long de la face médiale du pédicule, longe le bord supérieur du DIV, atteint la partie médiale du LLP et se termine en deux branches ascendante et descendante.

Il donne des branches :

- vertébrales pour le corps vertébral;
- discales pour les couches les plus superficielles du DIV;
- ligamentaires pour le LLP ;
- méningées.

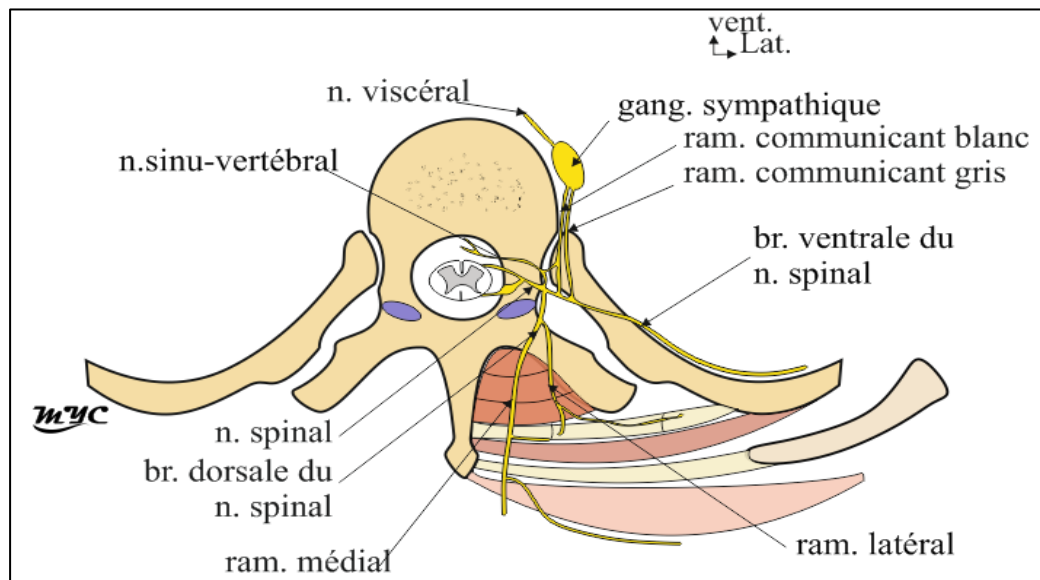


Figure 45 : Nerf spinal, vue crâniale. [D'après Lazorthes G [70]].

2. Branche dorsale du nerf spinal.

A chaque étage, à la sortie du foramen intervertébral, le nerf spinal se divise en une branche ventrale volumineuse (n. intercostal) et une branche dorsale grêle. Cette dernière se porte dorsalement et se divise aussitôt en deux rameaux : médial et latéral.

- Le rameau médial, musculo-cutané passe par un orifice ostéo-fibreux [112], délimité : en haut et en bas par les processus transverses, médialement l'articulation zygapophysaire, latéralement le ligament costo-transversaire supérieur. Le nerf se porte en arrière, plaqué contre l'articulation zygapophysaire et la lame vertébrale. Il donne trois rameaux :
 - supérieur et inférieur pour les articulations zygapophysaires sus et sous jacentes (les articulations zygapophysaires sont ainsi alimentées par deux nerfs) ;
 - un rameau postérieur pour les muscles et la peau du dos [68].
- Le rameau latéral, musculaire se porte latéralement, perd tout contact osseux, passe entre les muscles longissimus et ilio-costal aux lesquels il se destine.

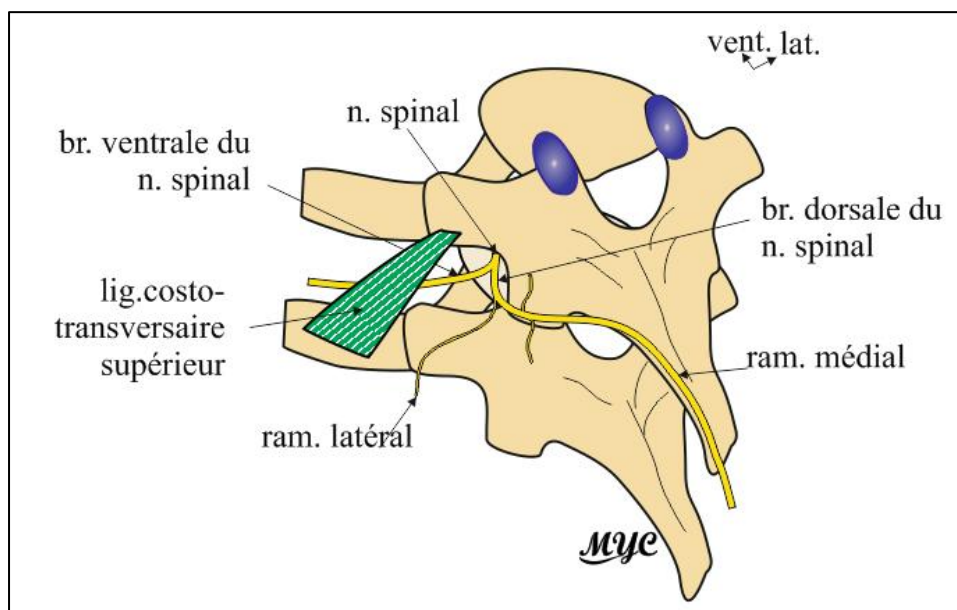


Figure 46 : Nerf spinal, vue supéro-latérale. [D'après Lazorthes G [70]].

➤ **Anatomie clinique.**

Le syndrome de la branche dorsale est une douleur tronculaire, secondaire à une compression de la branche dorsale du nerf spinal dans l'orifice ostéo-fibreux ou en regard de l'articulation zygapophysaire. L'infiltration du nerf après repérage du bord inférieur du processus transverse permet de soulager la douleur [74].

PARTIE THÉORIQUE : ANATOMIE FONCTIONNELLE DU RACHIS THORACIQUE

I. ANATOMIE FONCTIONNELLE DU RACHIS THORACIQUE.

Sur toute sa hauteur le rachis doit impérativement répondre à une triple contrainte : stabilité, mobilité et intégrité des structures nerveuses [46]. Si l'anatomie fonctionnelle du rachis cervical et lombal sont largement décrites dans la littérature, celle du segment thoracique reste insuffisante. Les attaches costales et la présence de la cage thoracique confèrent à cette portion rachidienne la caractéristique d'être immobile, c'est ici que son rôle de protection des organes prime puisque en plus de la moelle spinale il contribue à protéger les organes du médiastin.

Un segment mobile rachidien est une unité fonctionnelle comportant deux vertèbres adjacentes, le DIV qui les unie, les articulations zygapophysaires, l'ensemble des ligaments correspondants et le FIV. La mobilité des unités vertébrales prise individuellement est réduite [67], mais la sommation des mouvements élémentaires offre au rachis une amplitude articulaire avec un coefficient de mobilité de 1/6 [56] et six degrés de liberté. Sur une colonne thoracique isolée et séparée du thorax l'amplitude atteint 40° d'une position extrême à l'autre [113] et les mouvements sont : dans le plan sagittal flexion/extension, dans le plan coronal inclinaisons droite et gauche, dans le plan transversal rotations droite et gauche. Les processus zygapophysaires dirigent et guident les mouvements [54], au niveau thoracique ils sont verticaux et s'inscrivent sur la circonférence d'un cercle dont le centre est situé en avant du bord ventral de la vertèbre.

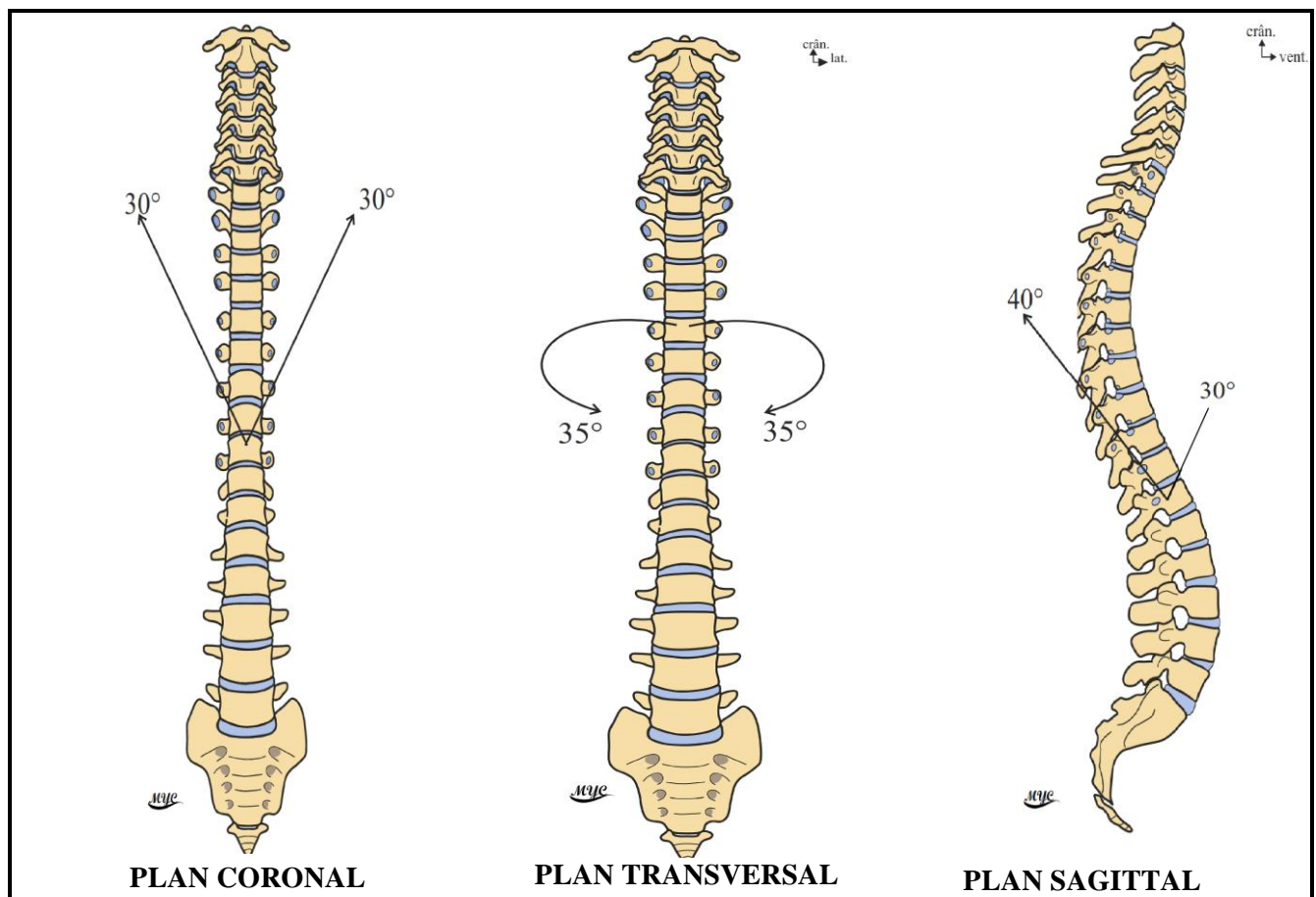


Figure 47 : Mobilités du rachis thoracique. [D'après Santini et Castaing [58]].

PARTIE THÉORIQUE : ANATOMIE FONCTIONNELLE DU RACHIS THORACIQUE

I. MOUVEMENTS DANS LE PLAN CORONAL (Fig 47).

Dans le plan coronal les mouvements d'inclinaison à droite et à gauche ou de latéralité ont une valeur moyenne de 30°. L'axe du mouvement est sagittal il passe par le centre du corps vertébral entre les processus zygapophysaire [114].

Les mouvements d'inclinaison sont facilités par la disposition presque coronale des processus zygapophysaires dont le déplacement diffère d'un côté à l'autre, du côté de la convexité les facettes articulaires glissent vers le haut, du côté de la concavité elles glissent vers le bas [34]. Les limites de ce mouvement sont du côté de l'inclinaison les butées osseuses et du côté opposé la tension des ligaments flavum, des ligaments intertransversaires et des tensions musculaires.

Les muscles de l'inclinaison sont représentés par : les muscles spinaux profonds éloignés du plan sagittal (longissimus, ilio-costal, psoas, carré des lombes) [56], les muscles opposés à l'inclinaison se contractent plus que ceux du côté de l'inclinaison. Les segments thoracolumbaires contribuent à la flexion latérale [115] du rachis thoracique.

II. MOUVEMENTS DANS LE PLAN TRANSVERSAL (Fig. 47).

La rotation axiale est le mouvement dominant du rachis thoracique, elle est 4 fois plus importante que dans les autres segments [34], sa valeur moyenne est de 35° elle se fait dans le plan transversal autour d'un axe vertical passant par le centre du cercle à la circonférence de laquelle s'inscrivent les processus zygapophysaires droit et gauche. Ce centre est situé en avant du bord ventral de la vertèbre. Lors de la rotation, le corps vertébral tourne autour de l'axe longitudinal accompagné du DIV qui subit un mouvement de vrille (rotation – torsion), les côtes accompagnent les vertèbres lors du déplacement. Les limites du mouvement sont les cisaillements du sternum et les limites de vissage du DIV. Les muscles de la rotation sont représentés par les muscles superficiels du dos. La rotation et l'inclinaison latérale sont toujours couplés [116].

III. MOUVEMENTS DANS LE PLAN SAGITTAL (Fig.47).

La flexion-extension correspond à un déplacement de la vertèbre autour d'un axe transversal placé dans le corps vertébral sous jacent, et non dans le DIV.

La flexion est une inclinaison en avant de la vertèbre, qui augmente la cyphose thoracique. Elle entraîne un écrasement ventral du DIV et un déplacement dorsal du nucléus. A l'étage thoracique la valeur moyenne est de 30°. Elle est limitée par la tension des ligaments : supra épineux ; inter épineux ; flavum ; longitudinal postérieur ; ainsi que la capsule et la verticalisation des processus zygapophysaires. Les muscles moteurs sont représentés par les muscles de la sangle abdominale : le m. droit de l'abdomen ; le m. oblique interne ; et le m. oblique externe [56].

L'extension est un mouvement d'inclinaison dorsal qui efface très légèrement la cyphose thoracique. Lors du déplacement la vertèbre sus jacente se porte en arrière écrasant la partie dorsale du DIV alors que le nucléus se porte vers la partie ventrale élargie [34]. L'amplitude moyenne de l'extension est de 40°. Elle est limitée par : la butée des processus épineux ; la butée des processus zygapophysaires inférieurs et la tension du ligament longitudinal antérieur.

PARTIE THÉORIQUE : ANATOMIE FONCTIONNELLE DU RACHIS THORACIQUE

Les muscles extenseurs sont représentés par : le muscle semi-épineux ; le muscle épineux ; le longissimus ; ilio-costal ; les muscles superficiels du dos ; le muscle splénius [56].

IV. MOUVEMENTS DES ARTICULATIONS COSTO-VERTEBRALES.

Les éléments de la cage thoracique interviennent pour diriger et limiter les mouvements du rachis thoracique. Chaque vertèbre est accompagnée lors des mobilités par les côtes, le cartilage chondro-costal et le sternum [117].

De T1 à T10 chaque vertèbre est articulée avec une paire de côtes par deux articulations synoviales de type arthrodie [34] : l'articulation costo-corporéale double arthrodie et l'articulation costo-transversaire arthrodie simple. Les puissants ligaments qui unissent ces deux articulations sont mécaniquement liées. Des mouvements simultanés de rotation autour d'un axe passant par le centre des deux articulations permettent d'élever et abaisser les côtes lors des mouvements respiratoires, c'est le mouvement «seau-poignée» qui permet d'augmenter les diamètres sagittal et transversal de la cage thoracique [34]. Bien que les côtes limitent la mobilité, leur présence offre au rachis un surcroît de stabilité dans les 3 plans de l'espace [118].

Les vertèbres T11 et T12 répondent à des côtes flottantes, dont l'extrémité ventrale est dépourvue d'attaches sternales. Cette particularité accorde au rachis thoracique distal une plus grande mobilité.

J. ANATOMIE RADIOLOGIQUE DU RACHIS THORACIQUE.

L'étude de l'anatomie radiologique des organes est un pré-requis indispensable à l'interprétation des examens d'imagerie. Pour le rachis trois examens sont essentiels [119]:

- La radiographie standard, examen de première intention actuellement supplantée par la technique numérisée qui offre une meilleure qualité d'image et des possibilités de post-traitement, de transfert et de stockage des examens. Les deux techniques offrent néanmoins les mêmes performances diagnostic.
- La tomodensitométrie (TDM), examen d'imagerie de référence malgré de nombreux inconvénients à savoir: le coût, le caractère irradiant et le recours fréquent à une injection de produit de contraste iodé [120].
- L'imagerie par résonance magnétique (IRM), non ionisante est utile pour l'étude des parties molles. Elle permet d'obtenir des vues 2D ou 3D de l'intérieur du corps de façon non invasive.

I. RADIOGRAPHIE STANDARD DU RACHIS THORACIQUE.

La radiographie standard est l'examen radiologique du rachis le plus utilisé, il permet une vue d'ensemble des structures osseuses. Les vertèbres sont bien individualisées avec la corticale très radio-opaque et l'os spongieux un peu moins. Les DIV et les interlignes articulaires sont radio-transparentes. Les DIV, les ligaments, les tendons et les muscles ne sont pas visibles.

Deux incidences antéropostérieure et latérale sont suffisantes pour explorer le rachis thoracique [121]. La superposition des structures sur les clichés sont une limite à son utilisation.

1. Incidence antéropostérieure (Photo 04).

1-1. Corps vertébral des vertèbres thoraciques est rectangulaire, concave latéralement, de volume croissant à mesure que l'on descend vers le sacrum.

1-2. Arc vertébral.

Les pédicules sont ovalaires placés dans le coin supéro-latéral des corps vertébraux de dimensions réduites en T1, avec un maximum en T11-T12. La distance inter pédiculaire est constante sur toute la hauteur du rachis thoracique. Les processus épineux sont sur une même ligne verticale, l'apex se projette sur le corps vertébral sous jacent. Les lames sont difficiles à visualiser en raison de la superposition des lames sus jacentes. Les processus transverses et zygapophysaires sont cachés par la superposition des têtes costales. Le disque intervertébral, n'est pas visible sur les radiographies, mais les espaces intervertébraux ont une hauteur constante. Les articulations costo-vertébrales et costo-transversaires ne sont pas apparentes, le scanner permettant une meilleur analyse.

2. Incidence de profil (Photo 04).

- 2-1. La courbure thoracique est une cyphose dont le sommet est en T6 [124].
- 2-2. Les corps vertébraux sont rectangulaires, mis à part T6 dont le corps est cunéiforme. La face ventrale de chaque corps est concave alors que le mur postérieur est vertical. Les plateaux vertébraux sont légèrement concaves. L'espace entre les corps vertébraux est constant d'avant en arrière.
- 2-3. L'arc vertébral [6].
 Les pédicules sont attachés à la partie supérieure de la face dorsale du corps. Leur bord supérieur est dans la continuité du plateau vertébral supérieur, le bord inférieur est concave. Leur superposition délimite les foramens intervertébraux, dont la taille et la forme ovale est constante. Les processus zygapophysaires sont en arrière des foramen intervertébraux. Les lames prolongent dorsalement les pédicules. Les processus épineux se superposent aux arcs costaux. Les processus transverses, épineux et zygapophysaire inférieur sont cachés par la superposition des têtes costales. L'espace entre les corps vertébraux est constant d'avant en arrière.

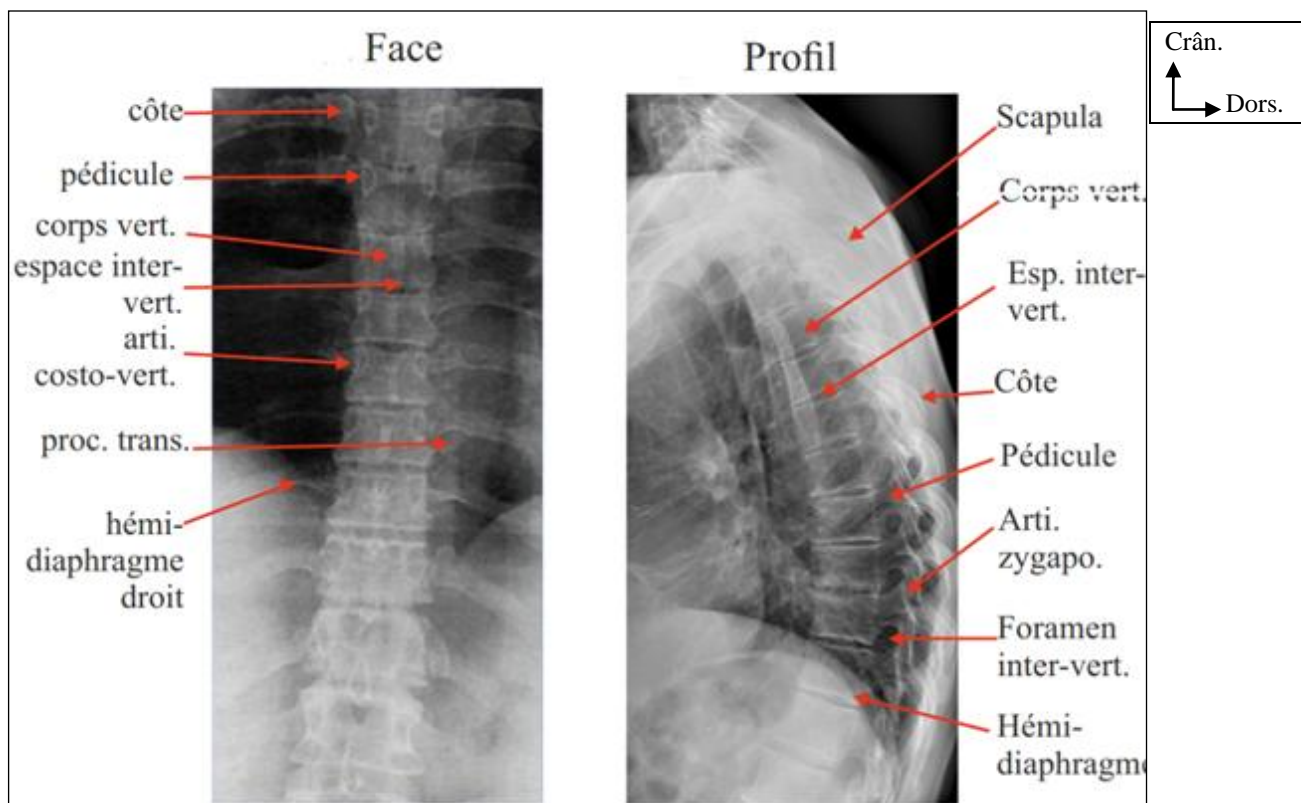


Photo 04: Radiographie standard du rachis thoracique, [images du service de radiologie CHU T-O]

II. TOMODENSITOMÉTRIE DU RACHIS THORACIQUE.

La tomodensitométrie est l'examen de choix pour l'étude du système squelettique. L'utilisation de la fenêtre osseuse est préférable pour l'inspection du rachis osseux et la fenêtre des tissus mous pour l'inspection de la musculature entourant le rachis. L'IRM est supérieure pour l'exploration de la moelle osseuse, des parties molles et de la vascularisation.

1. Dans le plan sagittal (Photo 05).

L'analyse d'un examen TDM du rachis débute toujours par l'étude de l'alignement [119]. Il se fait à partir du topogramme (image scout) et sur la reconstruction médio-sagittale. On vérifie la régularité et l'harmonie des courbures, et des différentes lignes vertébrales : la ligne vertébrale antérieure ; la ligne vertébrale postérieure ; la ligne spino-laminaire ; et la ligne des épineuses. Sur la vue coronale les bords latéraux des corps vertébraux et les processus transverses se situent sur une ligne lisse et régulière. Cet alignement permet de juger de la stabilité rachidienne [124].

L'os est facile à identifier, on étudie la morphologie et la configuration de chaque vertèbre. L'os cortical est périphérique sans discontinuité, la trame osseuse homogène dans le corps vertébral [6].

À l'étage thoracique le corps vertébral est légèrement cunéiforme, on compare les hauteurs vertébrales à celle des vertèbres adjacentes. L'espace entre les corps vertébraux est réduit. Le disque intervertébral s'étudie dans la fenêtre des tissus mous. En arrière, l'arc vertébral montre les pédicules, les processus zygapophysaires, les facettes articulaires, les lames et les processus épineux. Les foramen intervertébraux sont visibles sur les coupes para-sagittales (Photo 06), ils sont visible à tous les étages.

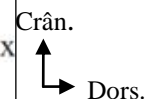
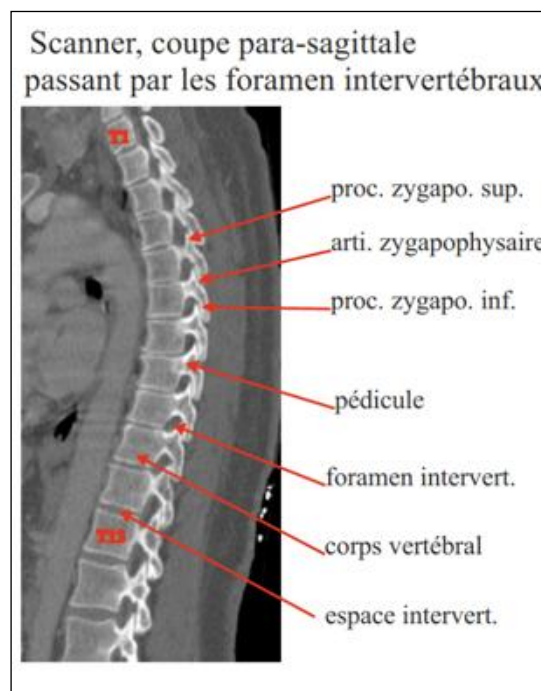
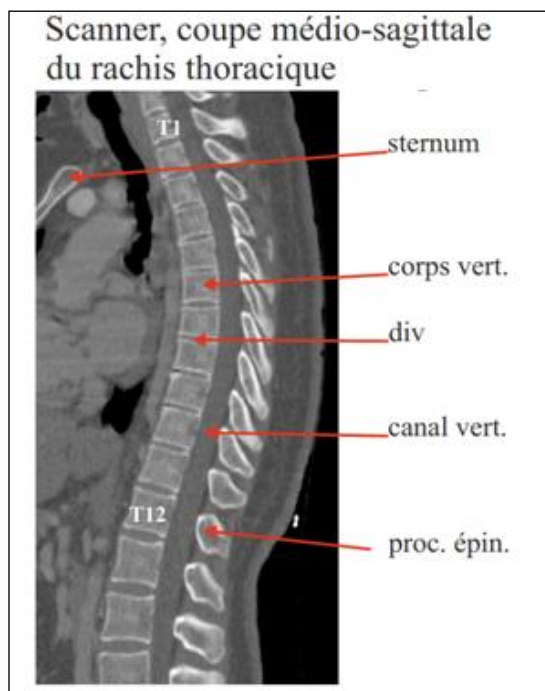
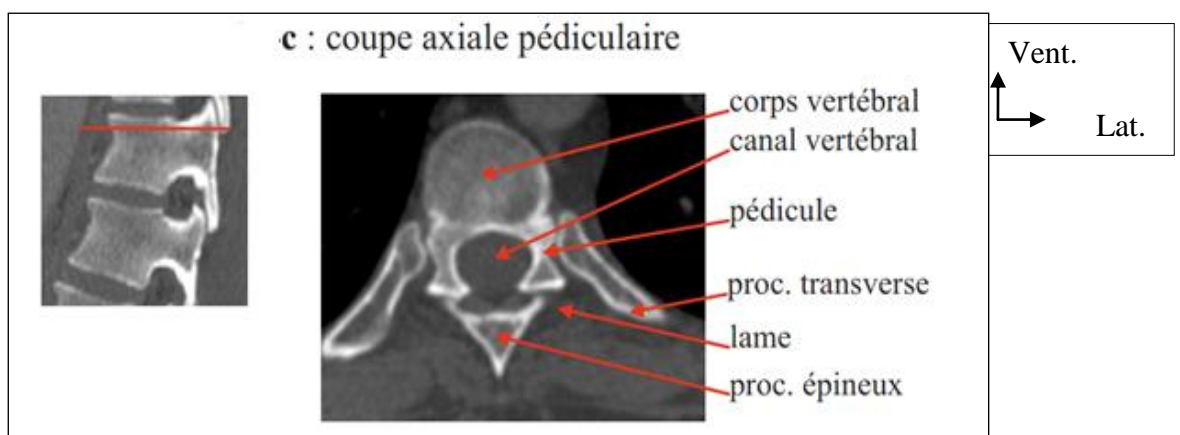
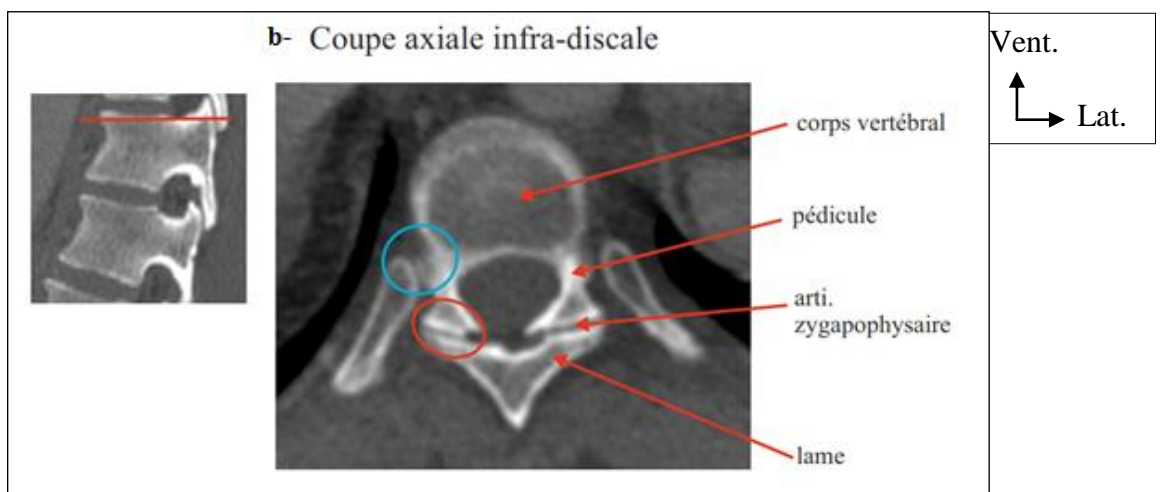
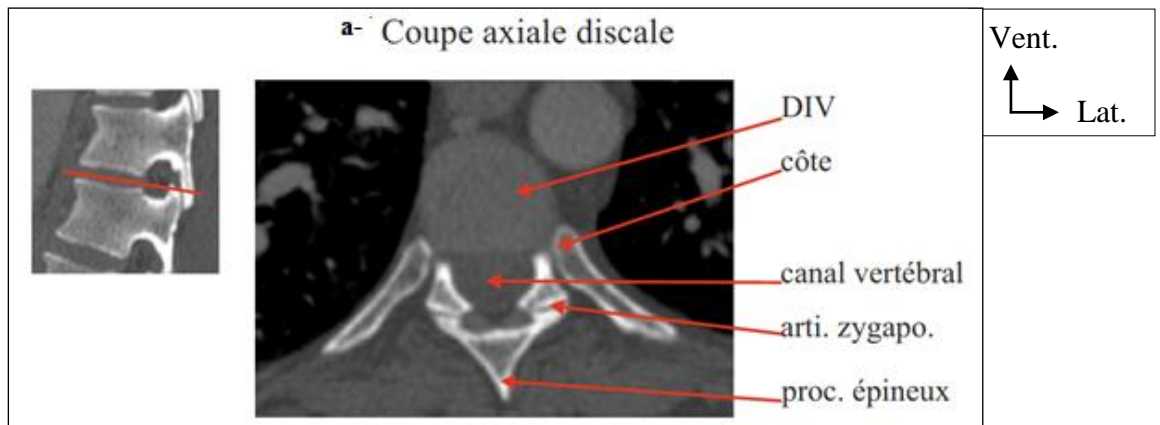


Photo 05 : Coupe TDM sagittale (à gauche). Photo 06 : Coupe TDM parasagittale (à droite). [Images du service de radiologie CHU T-O]

2. Dans le plan axial :

Cinq niveaux de coupe axiale sont utiles pour analyser les différentes structures du rachis thoracique [121] [122] :

Coupe discale (Photo 07-a) ; Coupe infra-discale (Photo 07-b) ; Coupe pédiculaire (Photo 07-c) ; Coupe pédiculo-lamaire (Photo 07-d) ; Coupe infra-pédiculaire (foraminale) (Photo 07-e).



PARTIE THÉORIQUE : ANATOMIE RADIOLOGIQUE DU RACHIS THORACIQUE

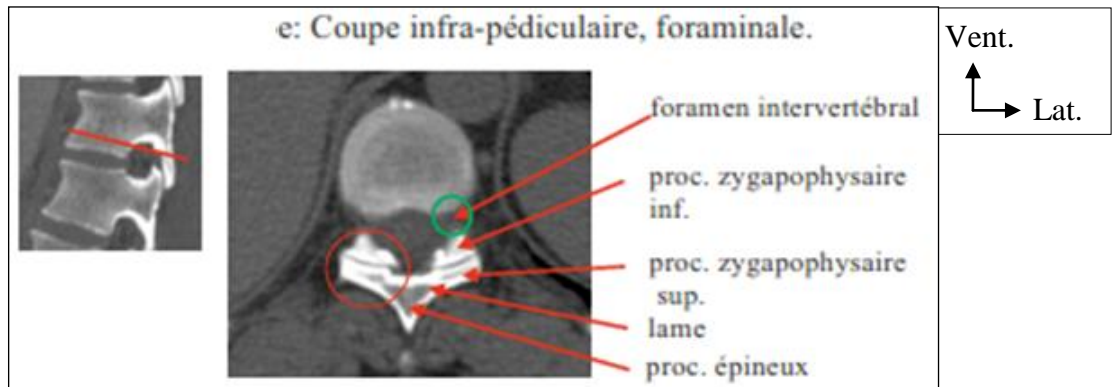
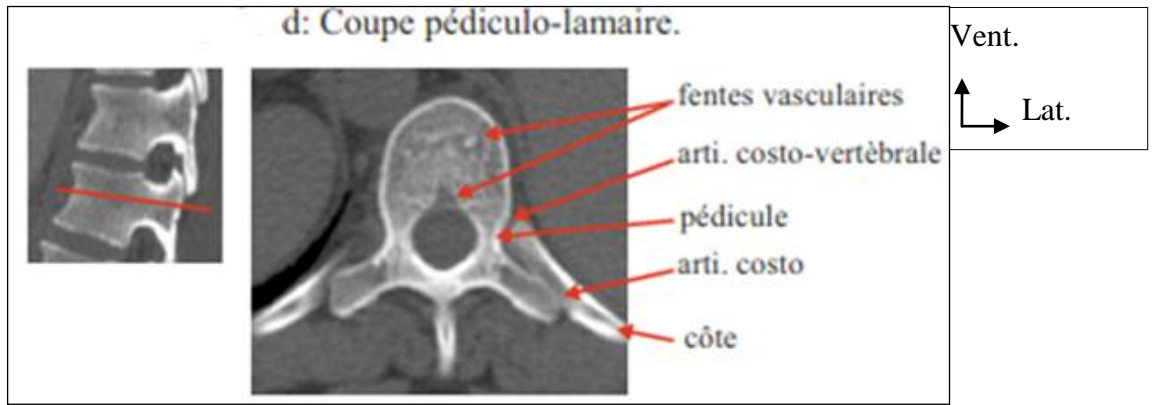


Photo 07 : Coupes TDM, vue axiale [images du service de radiologie CHU T-O, reconstructions TDM]

3. Reconstructions 3D du rachis thoracique.

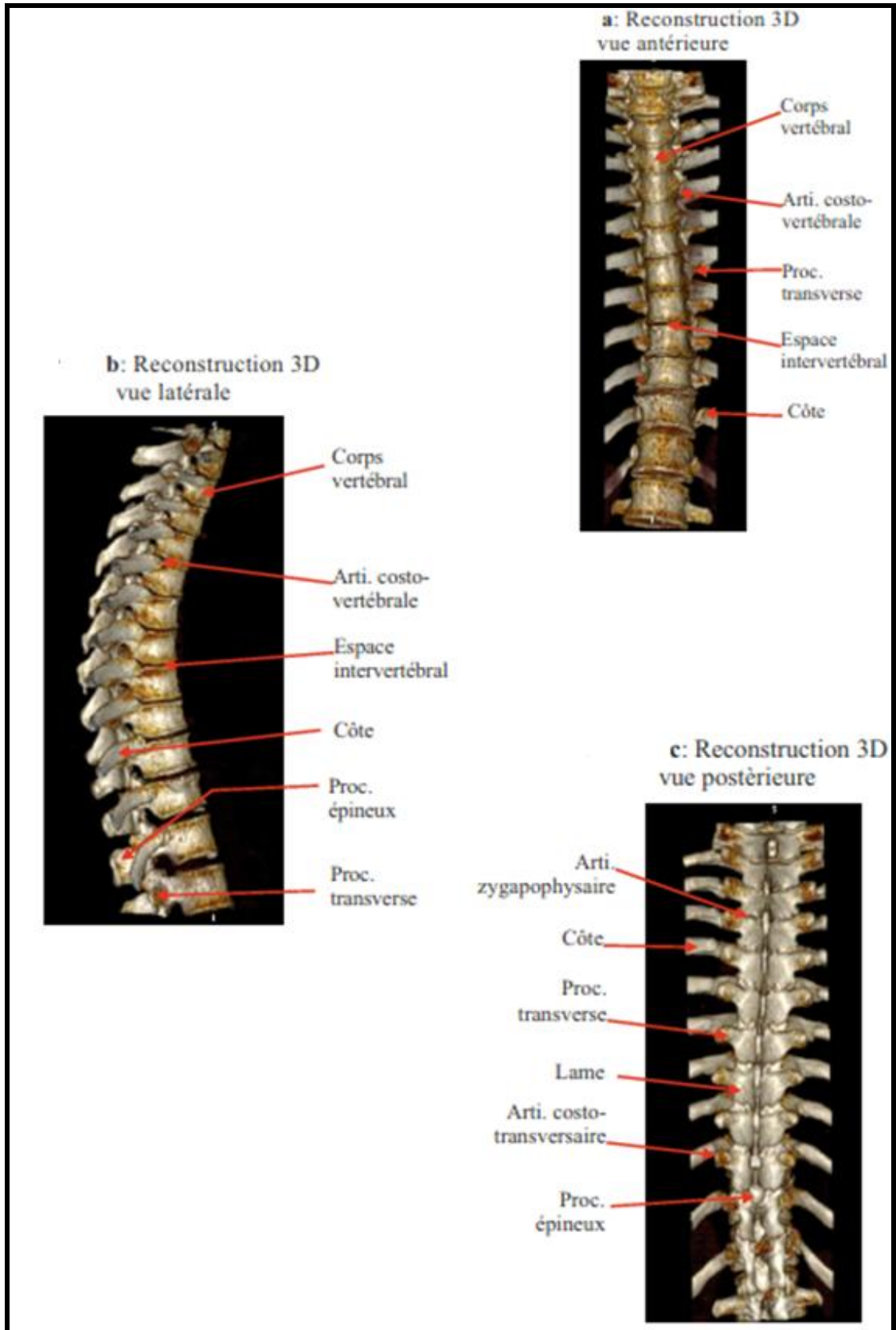


Figure 08 : Anatomie 3 D sur reconstruction TDM. [Images du service de radiologie CHU T-O]

III. IMAGERIE DU RACHIS EN IRM.

Pour l'étude du rachis l'IRM est l'examen anatomique le plus complet, il permet d'examiner le contenant et le contenu du canal vertébral sans irradier le patient. Cet examen offre une excellente visualisation des tissus mous [119] : moelle osseuse ; disques intervertébraux ; ligaments ; canal vertébral ; foramen intervertébraux ; les parties molles paravertébrales mais aussi le tissu osseux cortical et médullaire. Les structures anatomiques normales du rachis sont identifiables sur les pondérations T1 et T2 (Photo 09) (Photo 10). Pour un examen complet il est recommandé de réaliser une densité protonique avec ou sans suppression du signal de la graisse (126)].

➤ Caractères IRM des structures du rachis thoracique (127).

- Le corps vertébral est constitué de moelle osseuse hématopoïétique, de moelle grasseuse et d'os trabéculaire. Son aspect IRM varie en fonction de ces trois composants et selon l'âge, il apparaît en hypersignal sur les séquences pondérées T1 et T2.
- Les corticales osseuses, les fibrocartilages et les tendons sont en hyposignal très marqué quelque soit la pondération.
- Les muscles et les cartilages articulaires ont un signal intermédiaire. Les articulations zygapophysaires s'étudient en coupe axiale et parasagittale, la cavité articulaire est visible mais la capsule se confond en avant avec le LF et en arrière avec l'os.
- Le liquide cérébro-spinal est en hyposignal en T1 et en hypersignal en T2.
- Le DIV présente un signal intermédiaire en T1 et un hypersignal en T2 avec le nucléus visible, la couche périphérique de l'annulus est en hyposignal.
- Dans le foramen intervertébral, la graisse est en hypersignal, les racines nerveuses en hyposignal
- Le canal médullaire (Photo 11) est subdivisé en compartiment épidural, intradural extramédullaire, et intramédullaire avec la moelle spinale présentant en T1 un signal supérieur à celui du LCS.

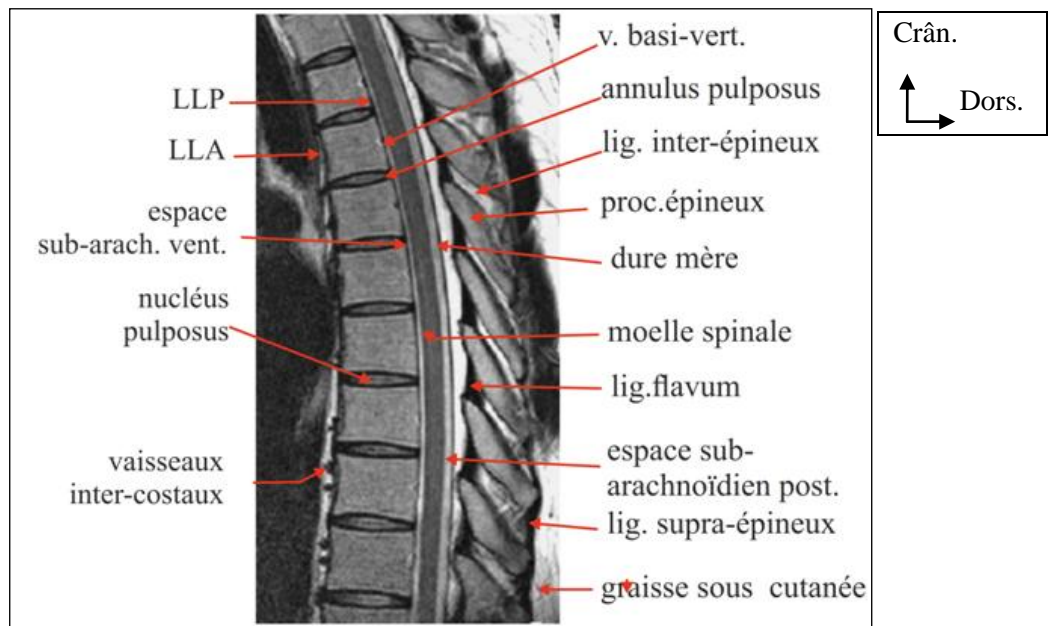


Photo 09 : IRM en coupe sagittale du rachis thoracique, pondérée en T2. [D'après Cramer et al [6]].

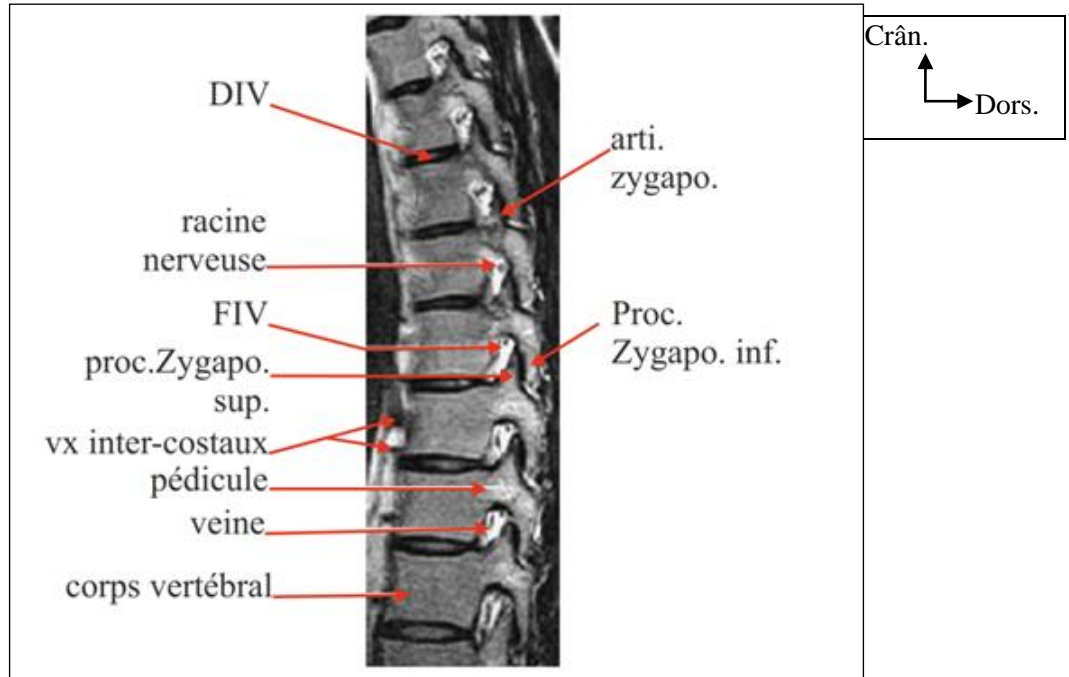


Figure 10 : IRM en coupe para-sagittale du rachis thoracique, pondérée en T2. [D'après Cramer et al [6]].

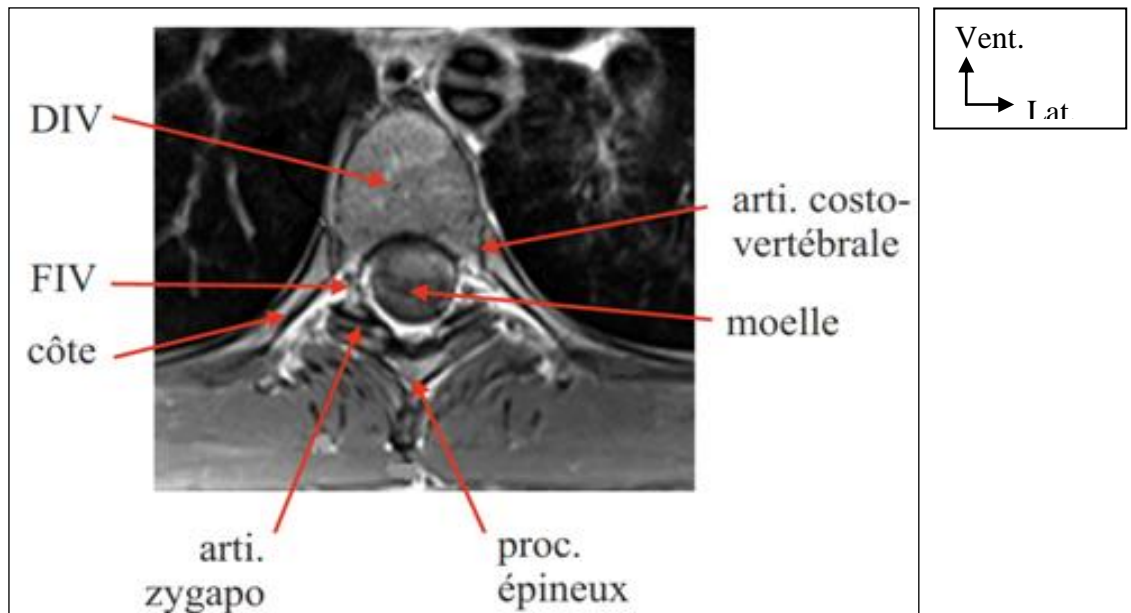


Figure 11: Coupe IRM axiale pondérée en T2. [D'après Cramer et al [6]]

K. ANATOMIE COMPARÉE

Dans le règne animal le profil rachidien de l'Homme ne ressemble à aucun autre [124], il est le seul vertébré à posséder quatre courbures alternées dans le plan sagittal, elles lui permettent de se tenir et de se déplacer debout regard à l'horizontale. La théorie de l'évolution, l'anatomie comparée et la biomécanique mettent en exergue les facteurs ayant entraîné les spécificités anatomiques du rachis humain.

IV. PLACE DE L'HOMME DANS LE RÈGNE ANIMAL.

Règne : Animal.

Embranchement : Chordés ou vertébrés, comportent des vertèbres et un crâne protégeant un cerveau.

Classe : Mammifères, caractérisés par l'allaitement.

Ordre : Primates, caractérisés par : des membres mobiles, la capacité à se déplacer de manière bipède, la capacité de préhension, la vision diurne, une augmentation de la taille de cerveau. Cet ordre comporte : les lémuriniens, les tarsiens, les singes, les grands singes et l'homme [125].

Famille : Hominidés, caractérisés par : un grand cerveau, la capacité à fabriquer des outils, l'opposition du pouce aux autres doigts et la bipédie. Cette famille comprend : les gibbons, les grands singes (orang-outan, gorille, chimpanzé) et l'homme.

Genre : Homo, du latin « homme ou être humain », caractérisé par : la bipédie sur de longues distances et de longues durées de manière stable, la capacité de la boîte crânienne supérieure à 550 cm³, la diminution du prognathisme, l'existence d'activités culturelles. Le genre homo comprend : Australopithecus Africanus, Homo Habilis, Homo Erectus et Homo Sapiens (homme moderne) dernier représentant de ce genre.

V. INTÉRÊT DE L'ÉTUDE DE L'ANATOMIE COMPARÉE DU RACHIS.

Appliquée à la médecine l'étude de l'anatomie comparée du rachis est fondamentale. Pour des raisons socioculturelles, religieuses, législatives [126] et financières, l'utilisation de modèles humains cadavériques pour développer des procédures chirurgicales, des prothèses, des implants, tester et étudier le comportement biomécanique du matériel d'ostéosynthèse reste problématique. Afin de pallier à ces difficultés l'alternative des modèles animaliers s'est imposée aux chercheurs. Le choix de modèles valides repose sur divers critères, notamment l'ensemble des similitudes et des différences structurelles présentes entre l'animal considéré et l'être humain. On privilégie les animaux dont les caractéristiques sont le plus proches de celles de l'Homme.

VI. ANATOMIE DU RACHIS DANS LE RÈGNE ANIMAL.

Tous les vertébrés comportent des vertèbres qui s'étendent le long du tronc et se répartissent sur cinq régions : cervicale, thoracique, lombale, sacrale et coccygienne [127]. La présence ou pas de membres antérieurs, postérieurs et des côtes implique des variations morphologiques du rachis.

Le groupe des animaux vertébrés comporte cinq sous groupes : les poissons, les amphibiens, les reptiles, les oiseaux, et les mammifères (129) . Les descriptions porteront sur les critères les plus pertinents.

➤ **Poissons.**

Les poissons ne possèdent pas de membres antérieures ni postérieures (Photo 12), leur colonne vertébrale se caractérise par un nombre de vertèbres important, divisées en deux régions :

- Antérieure, troncale ou préanale constituée de vertèbres comportant des côtes. Un processus dorsal attaché au corps par deux piliers délimite un canal occupé par la moelle spinale, un processus ventral délimitant un canal pour l'aorte.
- postérieure, caudale formée de vertèbres sans côtes regroupant les vertèbres lombales, sacrales et coccygiennes. La dernière vertèbre est triangulaire, verticale porte des osselets pour la nageoire terminale [128]. L'absence d'articulation crânio-vertébrale entraîne une immobilité de la tête.

Les vertèbres de poisson (Photo 13 et 14) présentent un corps caractéristique avec en arrière et en avant des cavités coniques comblées par une substance cartilagineuse.

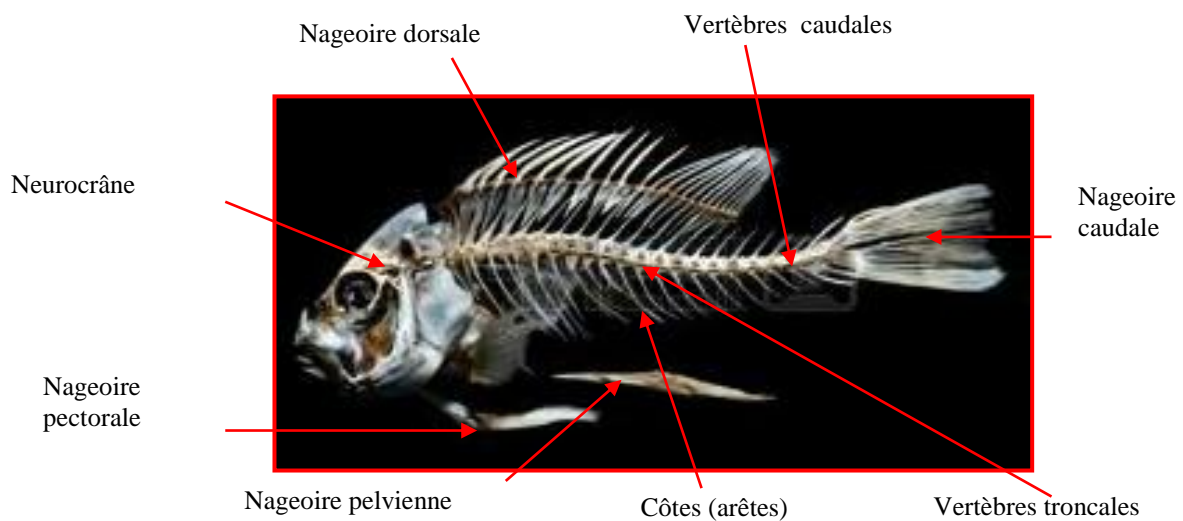


Photo 12: Squelette de poisson, vue latérale. [Image google]



Photo 13 : Vertèbre de poisson, vue axiale.
Photo 14 : vue latérale. [Image personnelle]

➤ **Amphibiens** (Photo 15).

La terrestrialisation a eu lieu il y a près de 400 millions d'années [129]. La sortie du milieu aquatique et le passage de la nage chez les poissons à la quadrupédie chez les tétrapodes a induit des modifications anatomiques [130] considérables à savoir : la perte de la respiration branchiale et la transformation des nageoires en membres chirodiens marcheurs. Chez les amphibiens, le nombre de vertèbres est variable : huit pour la grenouille et quatorze pour la Salamandre [131].

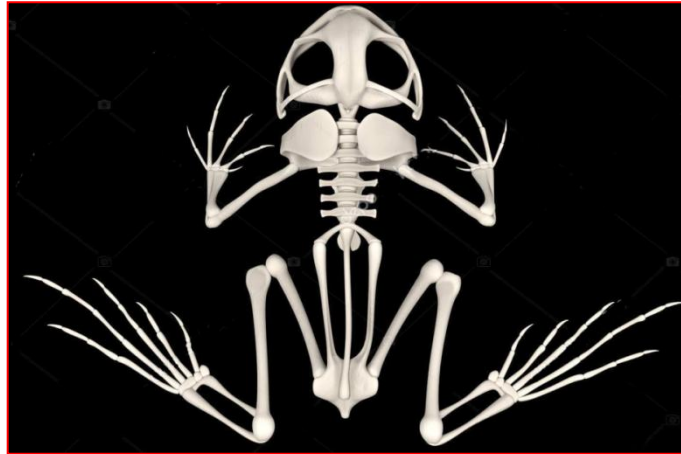


Photo 15 : Squelette de grenouille, vue dorsale.
[Image google]

Les amphibiens ne possèdent pas de côtes, il n'existe pas de différence significative entre les vertèbres, toutes sont dotées de processus transverses longs et de processus épineux réduit. Une articulation de type charnière formée de deux condyles permet le mouvement de bas en haut et de haut en bas de la tête [128]. Les membres postérieurs prépondérants se fixent sur le rachis par l'intermédiaire d'une ceinture comprenant des vertèbres sacrales. La région sacrale s'insère entre la région troncale et la région caudale qui est généralement aplatie.

➤ **Reptiles.**

C'est dans cette classe d'animaux que les modifications de la colonne sont les plus notables. La disparition des membres chez les apodes (serpents, lézards) a induit une uniformisation le long de l'axe vertébral (Photo 16). Les corps vertébraux s'articulent en genou les uns au dessus des autres facilitant les mouvements latéraux et la reptation. L'atlas s'unit au crâne par un condyle. Les vertèbres sont similaires et présentent des processus : articulaires, transverses et épineux distant les uns des autres (Photo 17), des côtes existent sur les vertèbres (à l'exception des caudales), leur nombre est de 250 chez le *Boa constrictor*. Le rachis ressemble à une longue cage thoracique. Les côtes sont libres, elles ne se rejoignent pas le long du ventre et s'écartent quand le serpent avale une grosse proie.

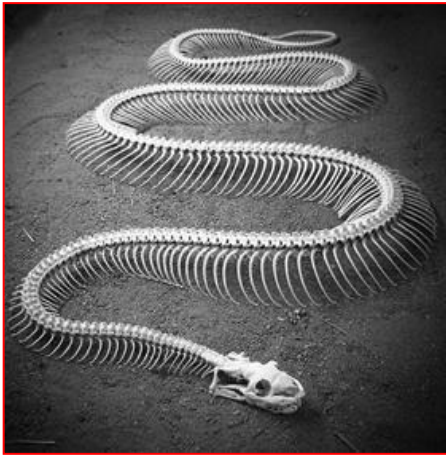


Photo 16 : Squelette de serpent. [Image google]

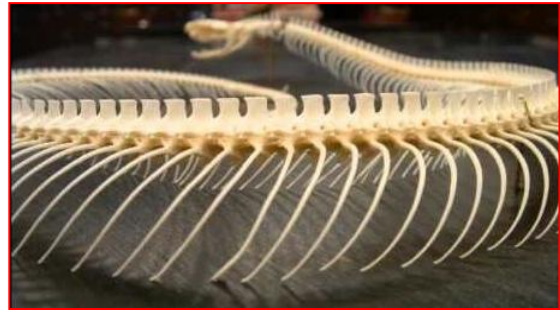


Photo 17: Squelette de serpent, vue latérale. [Image google]



Photo 18 : Squelette de crocodile. [Image google]

Les reptiles bipèdes (lézards et crocodiles) sont dotés de membres antérieurs et postérieurs et présentent cinq régions rachidiennes (Photo 18).

➤ **Oiseaux**

Le rachis des oiseaux comporte cinq régions : cervicale, thoracique, lombale, sacrale, et caudale. Dans ce sous groupe, la région cervicale peut comprendre de nombreuses vertèbres 23 pour le *Cygne*. Les vertèbres cervicales s'articulent par des saillies en segment de cylindre et non par des surfaces planes, ceci augmente l'amplitude des mouvements articulaires. Le cou des oiseaux est extrêmement mobile, les vertèbres les plus hautes ne se fléchissent qu'en avant, les plus basses uniquement en arrière, d'où l'aspect en S caractéristique (Fig.48).

À partir de la région thoracique le rachis présente une rigidification caractéristique. L'ossification du ligament postérieur et inter transversaires entraîne une fusion des vertèbres lombales aux thoraciques et aux sacrales formant une pièce osseuse : le *synsacrum* (os sacro-lombaire) [132] . Ce dernier peut être soudé au pelvis et entraîner une réduction de la mobilité et un gain de stabilité, indispensable au vol (Fig. 49). Les oiseaux qui ne volent pas comme l'*autruche* gardent leur mobilité.

Sur les vertèbres thoraciques les processus transverses sont bifurqués, chaque processus se soude à la vertèbre adjacente offrant ainsi un regain de stabilité. Les vertèbres caudales sont réduites et se terminent par un *pygostyle* (dernières vertèbres caudales soudées), sauf chez les espèces qui bougent la queue (Paon).

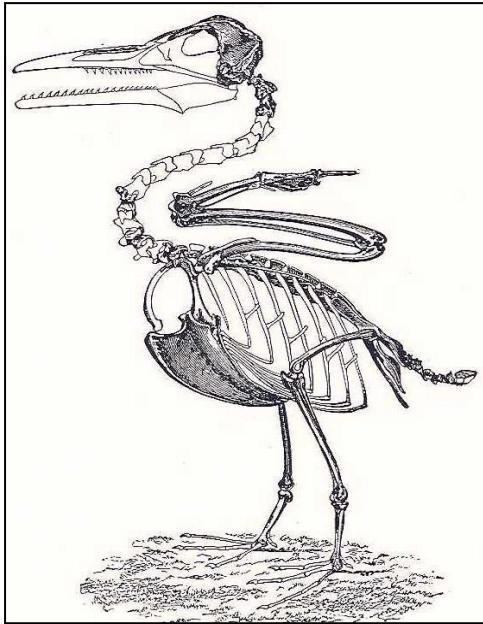


Figure 48 : Squelette d'oiseau.
[Image google]

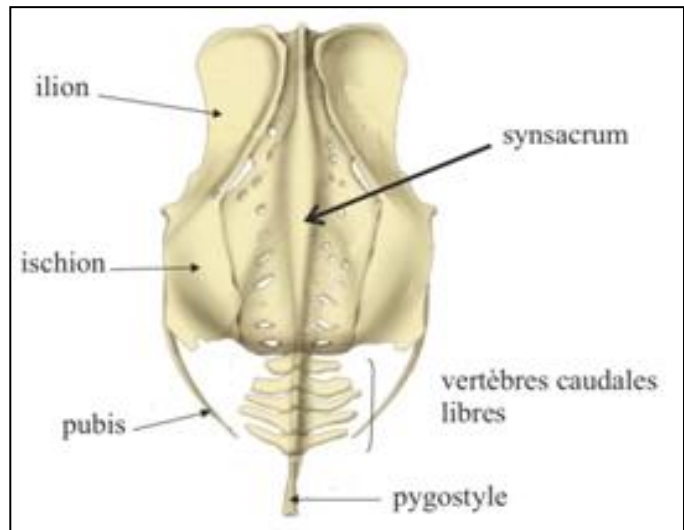


Figure 49: Synsacrum. Vue dorsale. [Image google]

Mammifères.

Les mammifères se classent suivant le type de locomotion en :

- quadrupèdes se déplaçant à quatre pattes ;
- bipèdes se déplaçant sur deux membres pelviens (*Homme*);
- mammifères marins vivant sous l'eau (*cétacés*) ;
- fousseurs sous terre (*taupe*) ;
- grimpeurs dans les arbres (*singe*) ;
- chéiroptères dans l'air (*chauve-souris*).

Le profil rachidien des quadrupèdes ne présente que deux courbures : une lordose cervicale convexe vers le sternum et une cyphose thoraco-lombale qui s'étend sans discontinuité jusqu'aux dernières vertèbres caudale [124].

Une grande variabilité est retrouvée en ce qui concerne le nombre de vertèbres, Cuvier les énumère dans le détail et souligne que:

- les vertèbres cervicales sont toujours au nombre de sept, sauf chez les *cétacés* et le *paresseux*, leur taille et leur morphologie connaissent une forte variabilité d'une espèce à une autre. Chez la plupart des mammifères *quadrupèdes* pour soutenir la tête les deux premières cervicales, l'atlas et l'axis sont nettement plus développées que les vertèbres suivantes. La longueur du cou dépend de la hauteur des corps vertébraux et non du nombre de vertèbres [133], elle reflète la difficulté à atteindre la nourriture. La *girafe* a le cou le plus long : 1.82m pour 7 vertèbres cervicales, leur nourriture est en hauteur sur les arbres. Les *cétacés* ont le cou le plus court puisque leur nourriture arrive dans leur cavité orale sans devoir effectuer aucun mouvement. La brièveté du cou est compensée par la capacité à porter les aliments à la bouche (la main chez l'*Homme*, la trompe pour l'*éléphant*).

PARTIE THÉORIQUE : ANATOMIE COMPARÉE DU RACHIS THORACIQUE XXX

- La longueur du segment lombal est responsable de l'aspect mince ou ramassé des animaux (Photo 19): le *Lori* est l'animal le plus grêle il possède 9 vertèbres lombales, le *gnou* 2, le *rhinocéros* 3.
- La région sacrale est toujours soudée, son volume témoigne de la capacité de l'animal à maintenir la position bipède [128], les *ruminants* possèdent un sacrum réduit. Les *cétacés* ne présentent pas de bassin, il n'existe pas de distinction entre vertèbres lombales, sacrales et coccygiennes.
- La région coccygienne est la plus variable, le nombre de vertèbres varie énormément : le *fourmilier* en présente 40, la *roussette* aucune. La queue aplatie du castor est due à la présence de processus transverses très développés.

Concernant les caractéristiques morphologiques chez les quadrupèdes : Broca, Cuvier et Hollar relèvent que :

- Les corps vertébraux cervicaux et les processus épineux sont robustes et volumineux, en raison des contraintes imposées par le poids de la tête.
- les processus épineux des vertèbres thoraciques crâniales sont longs et robustes (Photo 20), ils donnent insertion au puissant ligament nuchal chargé de relever la tête. Les processus épineux des dernières vertèbres thoraciques et des lombales sont antéversées, ils ne subissent pas l'action du muscle érecteur du rachis.
- La longueur des processus transverses des vertèbres lombales est réduite. Minimale sur L1, elle s'accroît progressivement et devient longues sur L5. Broca souligne que c'est surtout par leur direction que les processus transverses deviennent caractéristiques de la marche sur deux ou sur quatre pattes.



Photo 19 : Squelette de chien, [Collection du laboratoire d'anatomie d'Alger]



Photo 20 : Squelette de primate. [Collection du laboratoire d'anatomie d'Alger]

PARTIE 3. LA MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE.

La modélisation tridimensionnelle consiste à produire un modèle numérique, interactif manipulable dans les trois plans de l'espace, à partir d'un modèle physique, sur un ordinateur grâce à un logiciel dédié. En sciences morphologiques trois grands domaines ont bénéficié de cette technologie : l'enseignement de l'anatomie, l'anatomie clinique et la morphométrie [134].

A. MODÈLES ANATOMIQUES TRIDIMENSIONNELS POUR L'ENSEIGNEMENT.

Les modèles anatomiques 3 D sont physiques (maquettes en papier mâché ou en plastique, pièces de prosection, organes plastinés...), ou numériques. Ils sont largement utilisés en anatomie pour faciliter l'apprentissage en permettant à l'utilisateur d'explorer et découvrir le modèle.

Les modèles 3D numériques sont générés de différentes manières : à partir de coupes cadavériques segmentées, de données de l'imagerie médicale, ou créer artificiellement par des programmeurs informatiques.

I. PROJET VISIBLE HUMAN

The Visible Human Project est un projet initié en 1987, par la *National Library of Medicine* (NLM). Cette dernière saisit l'essor et l'ampleur que devraient prendre les reconstructions tridimensionnelles du corps humain dans l'avenir, elle souligne la nécessité d'offrir et de proposer à ses lecteurs une bibliothèque d'images numériques du corps humain, d'un homme et d'une femme qui servirait de référence commune à tous les chercheurs. Un comité ad hoc constitué de 33 membres représentant toutes les spécialités médicales et les domaines informatiques de pertinence est créé en 1989. La réalisation du projet est confiée à l'école de médecine de l'université du Colorado et en 1994 la base de données *Visible Human Male* est disponible, elle comprend des radiographies, des images IRM, des images TDM et des coupes cadavériques cryo-sectionnées transversales d'un seul corps d'homme (*Visible human male*) [135].

Le corps sélectionné pour le projet masculin est celui de Joseph Paul Jenigan âgé de 38 ans, condamné à mort et exécuté par injection létale le 5 Aout 1993 dans la prison de Huntsville au Texas, il avait donné son corps à la science, sans être au courant du projet VH. Le traitement du corps a été confié à l'université du Colorado sous la direction de M. Ackerman. Une prise en charge précoce de la dépouille est réalisée avant l'apparition des phénomènes cadavériques et des altérations consécutives à l'injection. 16 litres d'une solution de formol à 1% et d'anticoagulant ont été perfusés, pour assurer la conservation du corps. Des images radiographiques, IRM, et TDM ont été réalisées sur le cadavre frais, suivies après submersion du cadavre dans de la paraffine liquide et congélation à -160° , d'une découpe en quatre blocs (pieds et jambes, genoux et cuisses, pelvis et abdomen, thorax-cou et tête) puis découpes en série, transversale de 1mm d'épaisseur à l'aide d'un cryo-macrotome spécialement conçu pour le projet. Chaque coupe est photographiée à l'aide d'un appareil photo numérique haute résolution.

Au final la base de données comprend 1878 coupes anatomiques cadavériques cryo-sectionnées et TDM de 1 mm d'épaisseur de la totalité du corps, elles sont numérotées de 1001 à 2878 et nommées a_vm XXXX et c_vmXXXX. Les coupes IRM de la tête espacées de 4 mm portent le nom m_vmXXXX. La base de données correspond à un fichier de 15 gigabites.

Un projet féminin analogue est disponible, l'épaisseur des coupes sur le cadavre de la femme est de 0.33 mm, soit 5189 coupes pour une taille de fichier de 40 gigabites.

La NLM met gratuitement à disposition des chercheurs via Internet la base de données en mode sécurisé FTP (mot de passe et login) à l'adresse (<http://www.nlm.nih.gov>). Des projets similaires à celui réalisé aux USA ont été mis en œuvre en Chine CVH en 2001 et en Corée VK en 2002. les procédures de préparation des corps et de l'acquisition des images sont différentes, chaque projet présente des avantages et des inconvénients [136].

La base de données VHP est la ressource d'images anatomiques digitales la plus utilisée à travers le monde, 3500 licences dans plus de 64 pays ont été accordées. Les principaux projets réalisés à partir de VHP sont consacrés à l'enseignement de l'anatomie et de la radiologie. Des atlas anatomiques ont été réalisés, des modèles 3D reconstruits à des fins de pédagogie et de simulation. Le but ultime de VHP étant la reconstruction tridimensionnelle de l'organisme dans sa totalité avec la possibilité d'interagir avec le modèle dans un environnement virtuel afin de simuler avec précision le corps humain [137].

Le Dr Spitzer pionnier de la recherche humaine numérique estime que la segmentation des images est le plus grand défi à accomplir pour utiliser au maximum les potentialités de VHP. L'étape initiale et essentielle à l'exploitation de la base de données est la reconnaissance des structures visibles sur les coupes cadavériques cryo-sectionnées, seuls les yeux experts des anatomistes sont à ce jour en mesure de segmenter avec précision par identification visuelle et utilisation des connaissances a priori l'ensemble du corps, certaines structures ont une taille inférieure à celle du pixel (nerfs, lymphatiques) ce qui rend leur identification problématique. Bien qu'il existe des logiciels de segmentation automatiques aucun n'est en mesure de segmenter la totalité des structures de VHP.

Projets réalisés à partir du projet Visible Human.

- Applications d'anatomie 3D : Visible body ; Primal Picture, Interactelsevier ; et Zygote.
- Projet IMAIOS d'anatomie radiologique pour l'enseignement et l'interprétation des images (Photo 21).
- Application VH Dissector (Photo 22).
- Constructions d'atlas d'anatomie.
- Construction de programme pour l'éducation des patients.
- Programme de simulation chirurgicale.
- Colonoscopie virtuelle.
- Industrie automobile pour la simulation de crash.
- Jeux interactifs.

PARTIE THÉORIQUE : MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE

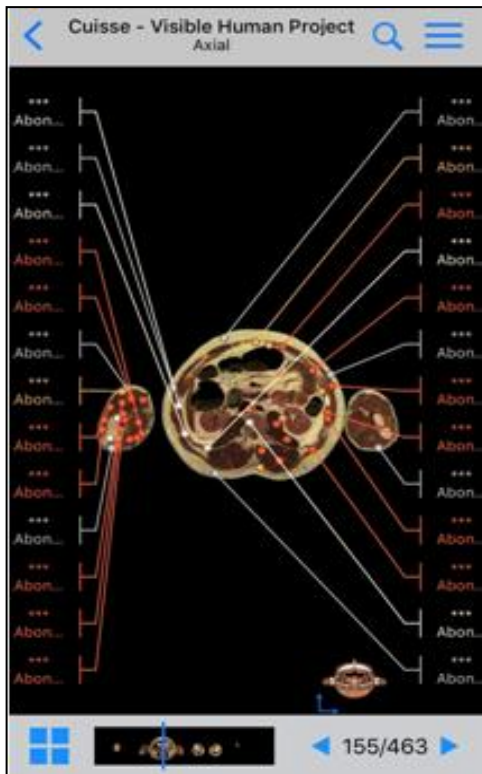


Photo 21: Application d'anatomie IMAIOS. (Capture d'écran)

Applications d'anatomie 3 D pour l'enseignement.

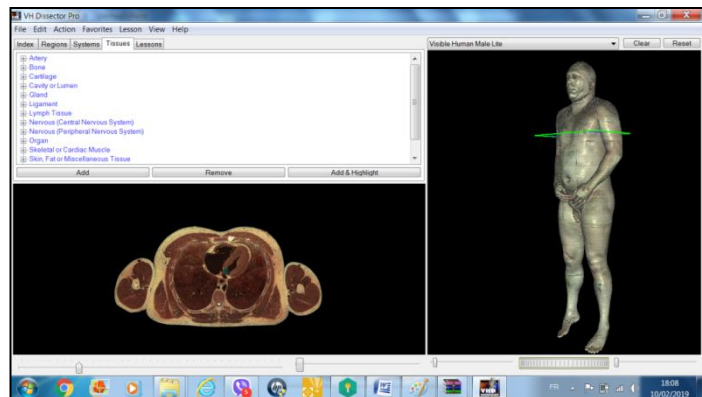


Photo 22 : Application d'anatomie VH-DISSECTOR (Capture d'écran).

II. MODÈLES ET APPLICATIONS ANATOMIQUES NUMÉRIQUES 3D

Il existe de nombreuses applications d'anatomie 3D, Lewis TL et al en ont dénombré 646 en 2013 (142) elles permettent de visualiser les systèmes du corps humain partiellement ou dans sa globalité, la plupart d'entre elles sont commerciales, réalisées par des développeurs informatiques et utilisées dans les laboratoires d'anatomie à travers le monde (143) :

- Visible Body: est l'une des meilleures applications payantes d'anatomie 3D, elle contient une visualisation de l'ensemble des structures du corps humain en 3D, elle comprend 4000 structures d'anatomie systémique et régionale, des quizz, des coupes et des animations, elle relève également les corrélations anatomo-cliniques. Elle est destinée aux étudiants en anatomie et en médecine. C'est une application largement conseillée [140], c'est celle choisie par l'université de Lyon 1 pour ses étudiants.
- Zygote body 2012 : a remplacé Google body 2011, il s'agit d'une application d'anatomie humaine produite par les ingénieurs de Google, elle propose une visualisation 3D en ligne gratuite de l'anatomie. Le logiciel et les modèles téléchargeables sont payants, Elle est surtout utilisée pour la réalisation d'application de Réalité Virtuelle (RV) et de Réalité Augmentée (RA).
- Primal's 3D interactif.
- Netter's 3D (Interact Elsevier) l'accès en ligne se fait par un code d'activation individuel d'un montant de 49.14 dollars.
- Biodigital human : application

- Anatomage (Photo 23), est la première table de dissection virtuelle, elle est utilisée par de nombreuses universités Algériennes. Elle permet d'étudier l'anatomie générale en 2D et 3D à partir des coupes VHP, ainsi que l'anatomie radiologique grâce à une base de données TDM et IRM incluses par le fabricant dans le logiciel de la table, ou chargement d'une base personnelle.
- 3D4 medical, pour android, est une application payante facturée de 10 à 120 euros, en fonction du nombre de module téléchargé. C'est l'application d'anatomie la plus complète [138], elle comporte le plus grand nombre de structures anatomiques. Les structures les plus complexes sont abordées dans le détail, d'utilisation intuitive offrant la possibilité d'annoter les modèles 3D et de les enregistrer. Elle contient des animations d'anatomie fonctionnelle. Elle est conseillée pour les étudiants en médecine et les résidents de chirurgie et de médecine physique.
- LINDSAY *Presenter*, est le logiciel utilisé par l'université de Calgary (Canada), il permet aux professeurs d'anatomie et aux étudiants de modéliser, interagir et annoter des modèles 3D, il contient du texte, des questionnaires et des liens [140].
- Anatronica, est une application en téléchargement gratuit.

De nombreuses critiques sont portées à l'encontre de ces applications [141] à savoir : le coût, le manque de détails, les insertions tendineuses et musculaires approximatives ainsi que l'aspect artificiel irréaliste des structures.



Photo 23 : Table de dissection Anatomage.

III. MÉTHODES DE RECONSTRUCTION DE MODÈLE 3D

L'élément de base pour la création de modèles 3D numériques fidèles et réalistes est la segmentation des images par la reconnaissance et la délimitation des structures. En anatomie deux méthodes sont employées pour reconstruire des organes tridimensionnels [142] :

- Les méthodes vectorielles ou surfaciques, qui représentent en 3D la surface externe de l'organe. Le surfacique construit des modèles vides à l'intérieur, ce qui diminue considérablement la taille des fichiers informatiques et autorise la manipulation des modèles

dans les trois plans de l'espace en temps réel. Ces modèles sont obtenus par la construction d'un maillage à partir de nuages de points. L'empilement de coupes segmentées et l'interpolation d'une coupe à l'autre construit un meshage 3D. La jonction des points par triangulation délimite des polygones dont les surfaces forment les facettes de la surface de l'objet, elle utilise l'algorithme des Marching Cubes (modélisation polygonale). L'intérêt de ces modèles surfacing est la visualisation.

- Les méthodes volumiques ou *volume rendering* (VRT) présentent le volume interne de la structure en plus de la surface externe, ils utilisent la technique du ray-tracing [143]. Ils utilisent des logiciels vendus avec les machines de radiologies ou des logiciels en Open source Osirix, 3 D slicer...

Le choix du type de modélisation dépend de l'usage que l'on souhaite faire du modèle. Les logiciels de reconstruction 3 D les plus populaires sont :

- Blender ;
 - Maya ;
 - 3D max ;
 - SketchUp ;
 - Tinkercad ;
 - Rhino ;
 - Amira [144] ;
 - Ansys [145] ;
 - Mimics [146] ;
 - 3 D doctor [144] ;
 - 3 D Slicer ;
 - Osirix [147] [148].
- } largement utilisées en biomécanique .

B. MODÉLISATION 3D POUR LA CLINIQUE : LA FRACTURE VERTÉBRALE OSTÉOPOROTIQUE.

Les reconstructions tridimensionnelles d'examen TDM et IRM sont largement utilisés en clinique, que ce soit pour établir un diagnostic, ou préparer une intervention chirurgicale. Pour une affection telle que l'ostéoporose cette modélisation présente un intérêt incontestable. Dans le monde 200 millions de personnes souffrent d'ostéoporose [149], cette pathologie est un véritable problème de santé publique [150] [151]. C'est une affection généralisée du squelette, caractérisée par une masse osseuse basse et une détérioration de la microarchitecture du tissu osseux, responsable d'une fragilité osseuse, à l'origine d'une élévation du risque de fracture [152] [153].

Les fractures ostéoporotiques conséquence de la fragilité osseuse sont à l'origine du surcoût de la maladie, il est clair que le vieillissement de la population va entraîner une augmentation de leur incidence dans les prochaines décennies [154]. Une femme sur deux et un homme sur cinq âgés de 50 ans feront une fracture ostéoporotique avant la fin de leur vie [155]. Les femmes ménopausées sont des sujets à risque élevé [156], selon les critères de l'OMS, 30% des femmes ménopausées ont une ostéoporose [157].

En Algérie [158] l'espérance de vie a connu un gain de 10 ans en l'espace de 23 ans (1990-2013). A l'horizon 2050, la part de la population âgée entre 60 et 79 ans atteindra 20,5% (163), soit près de 1/5 de la population. A l'instar des autres régions du monde notre pays sera confronté au lourd problème de la prise en charge des seniors et au fardeau socio-économique de l'ostéoporose.

La fracture vertébrale est le meilleur indicateur de la santé osseuse [160], c'est aussi la plus commune des fractures ostéoporotiques [161]. Une fracture vertébrale prévalente est une indication à traiter [162], lorsqu'elle existe elle augmente le risque de fracture non vertébrale [163] [164] et annonce la cascade fracturaire [165]. Son diagnostic est primordial, il rend éligible au traitement anti ostéoporotique et permet le suivi des patients à risques.

La fracture vertébrale est cependant sous diagnostiquée dans le monde entier [166] [167], sur les examens scanners elle est souvent oubliée et passe inaperçue [168]. En pratique clinique deux approches sont utilisées pour le diagnostic radiologique de cette fracture [169] [170], visuelle et quantitative (Photo 24). La méthode la plus utilisée est l'analyse semi-quantitative de Genant [171]. Elle consiste à donner un grade aux vertèbres en fonction de leur morphologie et de la réduction de la hauteur antérieure, moyenne ou postérieure (Fig. 50) du corps vertébral. C'est une méthode simple, qui ne repose que sur la connaissance de l'anatomie des vertèbres et qui présente une très bonne reproductibilité [172].

PARTIE THÉORIQUE : MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE

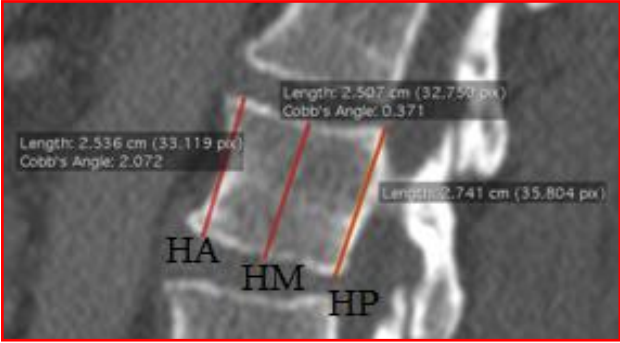


Photo 24: les hauteurs vertébrales sur reconstruction TDM. [Image personnelle]

La modélisation anatomique 3D des structures anatomiques offre cette double possibilité [73], effectuée à partir de données de l'imagerie médicale, elle permet d'obtenir de manière non invasive et à grande échelle des renseignements morphologiques, sur tous les organes du corps humain. Pour le rachis les reconstructions 3D à partir de TDM offrent une excellente qualité de visualisation des vertèbres. Pour le diagnostic et le suivi des fractures vertébrales, elle représente un outil de surveillance supplémentaire, appréciable dans la prise en charge et le suivi de l'ostéoporose.

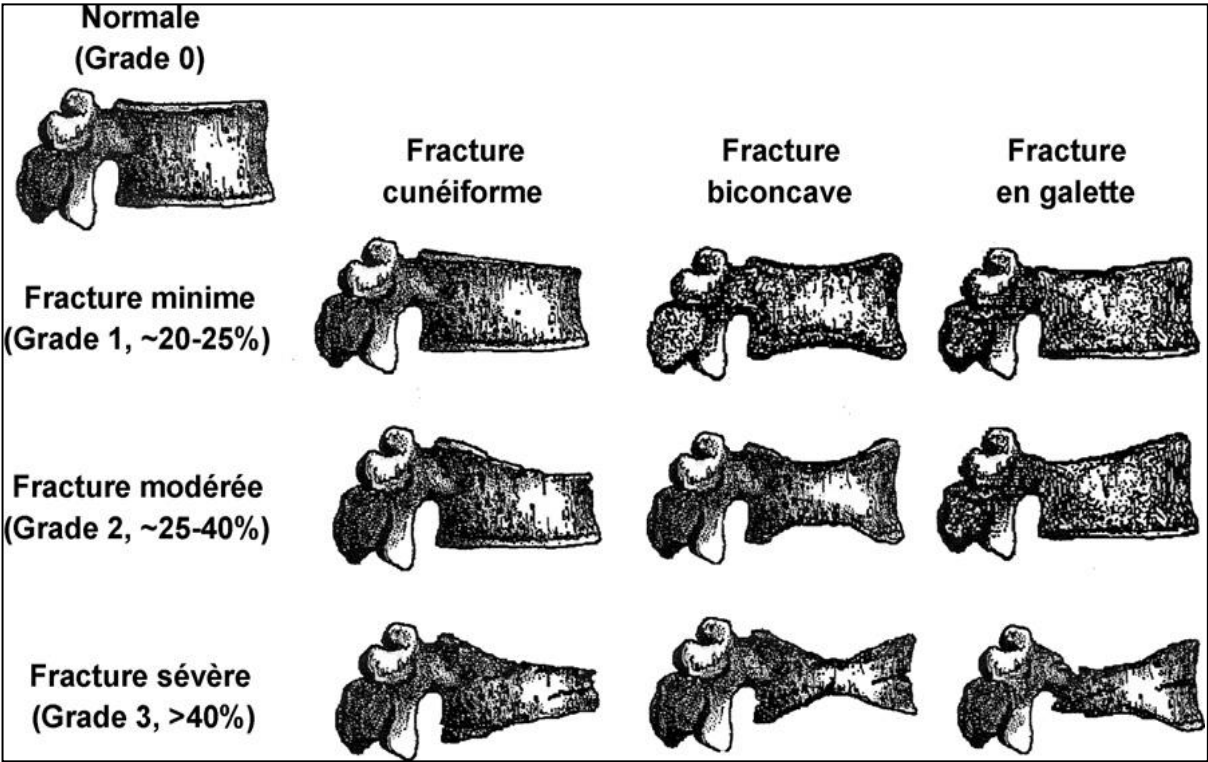


Figure 50: Atlas morphologique de Genant [171].

PARTIE PRATIQUE

ORGANISATION DE LA PARTIE PRATIQUE

La partie pratique de cette thèse se focalise sur la modélisation 3D en morphologie, elle explore cette technologie pour répondre à trois questionnements :

- ✓ Comment produire un modèle anatomique 3D pour la pédagogie ;
- ✓ Comment diagnostiquer et grader une fracture vertébrale ostéoporotique sur les reconstructions 3 D ;
- ✓ La morphométrie vertébrale sur modèle 3D est-elle une technique de mesure valide ?

Nous avons répondu à ces questions par la mise en œuvre de trois parties indépendantes les unes des l'autres :

- ✓ La partie pratique A est consacrée à la création, d'un modèle tridimensionnel du rachis thoracique à partir de *Visible Human Project (VHP)* dans un but pédagogique.
- ✓ La partie pratique B. à la construction d'un atlas morphologique 3D des fractures vertébrales similaire à celui de Genant. Nous avons également réalisé lors de cette étude une base de données normative des hauteurs vertébrales.
- ✓ La partie pratique C, à l'étude statistique de répétabilité, reproductibilité et concordance des mesures 3D versus 2D, afin de juger de l'interêt de la biométrie 3 D en morphologie.

A. MODÉLISATION 3 D DU RACHIS THORACIQUE POUR LA PÉDAGOGIE

I. INTRODUCTION :

Une réflexion profonde est menée au sein de l'université algérienne pour trouver et mettre en œuvre les moyens de hisser l'enseignement supérieur aux standards internationaux. En anatomie des laboratoires numériques se mettent en place au sein des facultés de médecines, un peu partout dans le monde, dans le but d'adapter l'enseignement des sciences morphologiques au défi digital du 21^{ème} siècle. L'avènement d'internet et l'essor des nouvelles technologies ont profondément modifié la façon qu'ont les étudiants en médecine de se former et de compléter leurs connaissances. L'utilisation et la généralisation des Smartphones et des applications d'anatomie 3D mettent l'accent sur la nécessité de diversifier les techniques pédagogiques et proposer des modèles anatomiques précis et expertisés.

II. OBJECTIFS :

L'objectif principal est l'élaboration d'un modèle tridimensionnel surfacique du rachis thoracique à partir des coupes cadavériques de *Visible Human Project (VHP) Male* à des fins de réalité virtuelle, utile à l'enseignement de l'anatomie. Nous présentons une méthodologie qui permet de créer le modèle 3D et la façon de réaliser des vidéos pédagogiques et des illustrations anatomiques.

III. MATÉRIEL ET MÉTHODES :

La construction du modèle 3 D du rachis thoracique est réalisée à partir des coupes cadavériques de la base de données *Visible Human Project (VHP) Male*, à l'aide du logiciel de modélisation Winsurf version 4.3, sur un ordinateur portable (core i 7, windows 7, 4GB de RAM) avec tablette graphique Wacom. Les logiciels Photoshop et Corel Draw pour l'infographie. Sketchup pour l'impression 3D.

Les coupes utiles à la construction du rachis thoracique vont de la coupe 1275 à la coupe 1586, soit un total de 311 coupes à 1 mm d'intervalle.

1. Structures d'intérêt.

Les structures d'intérêt (tableau 19) sont squelettiques, articulaires, vasculaires et tégumentaires soit 143 structures. Elles permettront de reconstruire le rachis thoracique et de l'expertiser.

2. Travail préparatoire sur la base de données.

La base de données utilisée pour notre reconstruction 3 D est la base d'images cadavériques cryo-sectionnées *Visible Human Project (VHP) Male*, distribuée lors du séminaire de formation en anatomie numérique de décembre 2014. Cette base comporte un ensemble d'anomalies responsables d'aberrations et de distorsions des modèles, qu'il est indispensable de prendre en charge et de corriger avant de procéder à la segmentation des images.

Le travail préliminaire sur la base de données consiste à :

**PARTIE PRATIQUE A: MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE
POUR LA PEDAGOGIE**

Système	Structures
Squelettique	<ul style="list-style-type: none"> - Vertèbres thoraciques T1 à T12. 12 structures - Sternum 1 - Côtes droites et gauches 24
Articulaire	<ul style="list-style-type: none"> - DIV 12 - LLA 1 - LLP 1 - LF droit et gauche 24 - Ligaments inter-épineux 12 - Ligament supra-épineux. - Cartilages sterno-costaux 24 - Articulations zygapophysiales thoraciques. 24
Vasculaire	<ul style="list-style-type: none"> - Crosse aortique - Tronc artériel brachio-céphalique - Artère Sub-Clavière droite - Carotide commune droite - Artère carotide commune gauche - Aorte thoracique - Artère sub-Clavière gauche
Tégumentaire	<ul style="list-style-type: none"> - Peau

Tableau A: Structures reconstruites

- a. Retourner transversalement la base de données
 Les coupes transversales de *Visible Human Project (VHP) Male* (Photo 25-a) sont celles d'un sujet en décubitus dorsal, numérotées de crâniale en caudale, les images correspondent à des vues supérieures du segment distal. Cette présentation des coupes bien qu'étant celle des coupes anatomiques classiques aboutit lors de la reconstruction 3D à des organes en position inversée (Photo 25-c). Pour remédier à ce problème après avoir identifié et sélectionné dans le dossier Male Slice les coupes nécessaires, nous avons utilisé le logiciel Photoshop pour effectuer une rotation transversale des images (Photo 25-b), la création d'un script et le traitement des images par lot proposé par le logiciel facilitent cette opération. L'utilisation du logiciel Paint et Picture Manager de Microsoft est également possible, le retournement transversale des coupes se fait alors manuellement coupe par coupe.
- b. Identifier les coupes transversales qui comportent la structure anatomique à segmenter.
- c. Créer un dossier regroupant les coupes *Visible Human Project (VHP) Male* utiles à la reconstruction de la structure d'intérêt. Le chargement et la manipulation des données est ainsi plus rapide et plus simple.

**PARTIE PRATIQUE A : MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE
POUR LA PEDAGOGIE**



Photo 25-a : Coupe *Visible Human Project (VHP)*



Photo 25-b : Coupe *Visible Human Project (VHP)* retournée horizontalement

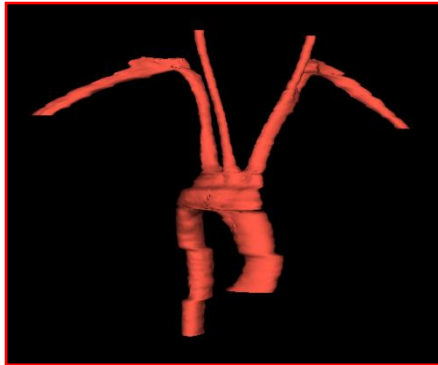
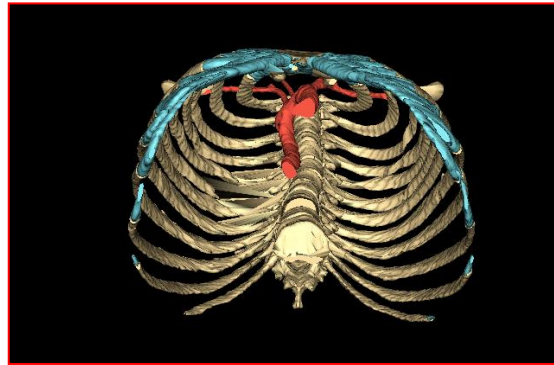


Photo 25-c : Aorte thoracique en position inversée avant le retournement des coupes VHP Male



- d. La base de données comporte de nombreuses coupes noires, on constate que toutes les coupes a_vm multiples de 5 sont absentes, elles provoquent sur le modèle des discontinuités sous forme de bandes noires (Photo 26). Pour remédier à ce problème nous avons, dans la base de données, supprimé toutes ces coupes noires, puis nous avons sélectionné la coupe sous-jacente que nous avons copiée et renommée au numéro a_vm de la coupe supprimée. Il est impératif de vérifier que toutes les coupes soient remplacées, une seule coupe absente bloque le chargement du modèle.
- e. Les coupes altérées par des images d'eau congelée, visible sur les coupes a_vm 1506 et a_vm 1507 doivent être remplacées de la même façon.
- f. L'alignement axial des coupes n'est pas respecté, il existe de nombreux décalages transversaux, responsables de distorsions du modèle (Photo 27). Dans notre cas le premier décalage apparaît à la coupe 1361, il se fait vers la droite, et se poursuit jusqu'à la coupe 1390 soit 30 coupes au total. Un second décalage se fait de la coupe 1417 à 1461, soit 44 coupes. La correction des décalages s'est faite coupe par coupe dans le logiciel Paint, les nouvelles images sont enregistrées dans la base de données en respectant le numéro a_vm de chacune des coupes. Ces décalages se produisent au niveau des sections en blocs du cadavre [135].

PARTIE PRATIQUE A: MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE POUR LA PEDAGOGIE

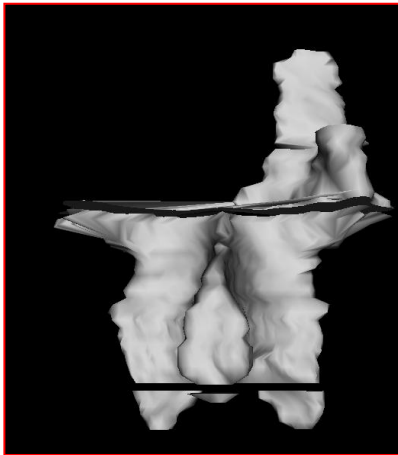


Photo 26 : Bandes noires dues aux coupes

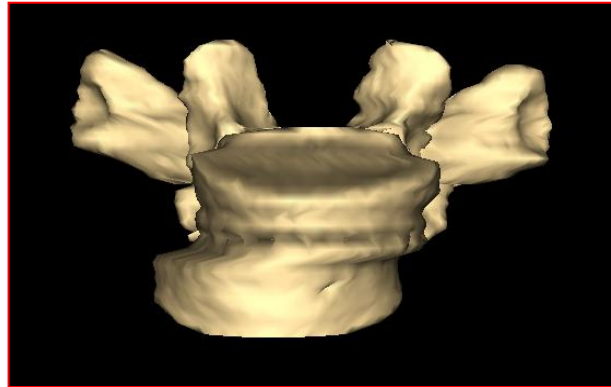


Photo 27 : Distorsion du modèle par décalage des coupes cryosectionnées.

3. Identification des structures à segmenter.

L'identification des structures anatomiques sur les coupes cadavériques a permis de réaliser des tableaux d'identification, Annexes (1 à 12). Pour notre modèle 311 coupes sont prises en charge. Chaque vertèbre est identifiée et subdivisée sur l'ensemble des coupes, ceci facilite le repérage de chacune des structures et par la suite son contourage.

L'identification a été effectuée par un seul anatomiste à 6 mois d'intervalle, les livres d'anatomie classiques ont été consultés afin de vérifier les niveaux vertébraux sur les numéros de coupes *Visible Human Project (VHP)*.

4. Gestion et organisation des fichiers 3D.

Il est essentiel d'organiser les fichiers afin de pouvoir afficher et manipuler les structures 3D le plus aisément possible.

Au début du projet il est souhaitable de créer un dossier Anatomie 3D et y placer :

- la base de données corrigée ;
- le logiciel Winsurf ;
- les fichiers xdv ;
- les fichiers xdf ;
- le dossier ajustement ;
- le dossier Movie Frame ;
- les vidéos.

5. Création du modèle 3D à l'aide du logiciel WinSurf.

Le logiciel WinSurf version 4.3, est la version récente du logiciel SurfDriver.

C'est le logiciel distribué par l'université Paris Descartes lors du séminaire de formation en Anatomie Numérique. Peu cité dans la littérature et sur le net.

Le logiciel permet de segmenter manuellement les structures et de les reconstruire en 3D. Une période d'apprentissage et de familiarisation est nécessaire pour une prise en main du logiciel.

PARTIE PRATIQUE A: MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE POUR LA PEDAGOGIE

Après chargement, le logiciel Winsurf est visualisé par une icône (Photo 28) qui permet l'ouverture et l'affichage de la page d'accueil (Photo 29).



Photo 28 : Icône WinSurf.

file

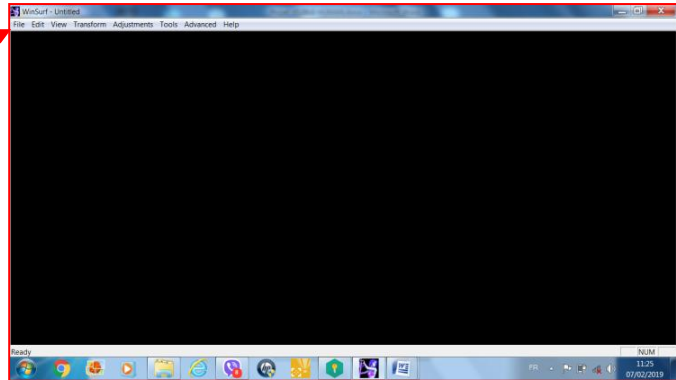


Photo 29: Écran d'accueil du logiciel WinSurf (Capture d'écran).

Sur l'onglet fichier (*file*) plusieurs Item sont proposés :

Cliquer sur *New Contour File* pour dessiner les nouveaux contours d'une structure d'intérêt (Photo 31).

Le logiciel demande de sélectionner le nom du dossier où se trouvent les coupes à contourer et le paramétrage du logiciel. Pour notre travail nous avons pris les paramètres suivants 600/1/1 (Photo 32).

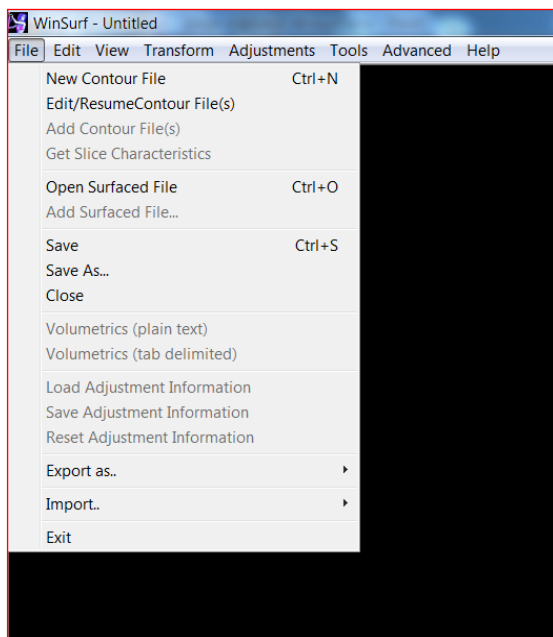


Photo 30: Nouveaux contours.

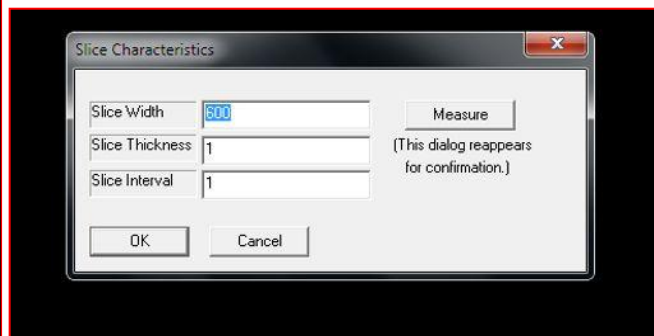


Photo 31: Paramétrage du logiciel WinSurf

**PARTIE PRATIQUE A: MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE
POUR LA PEDAGOGIE**

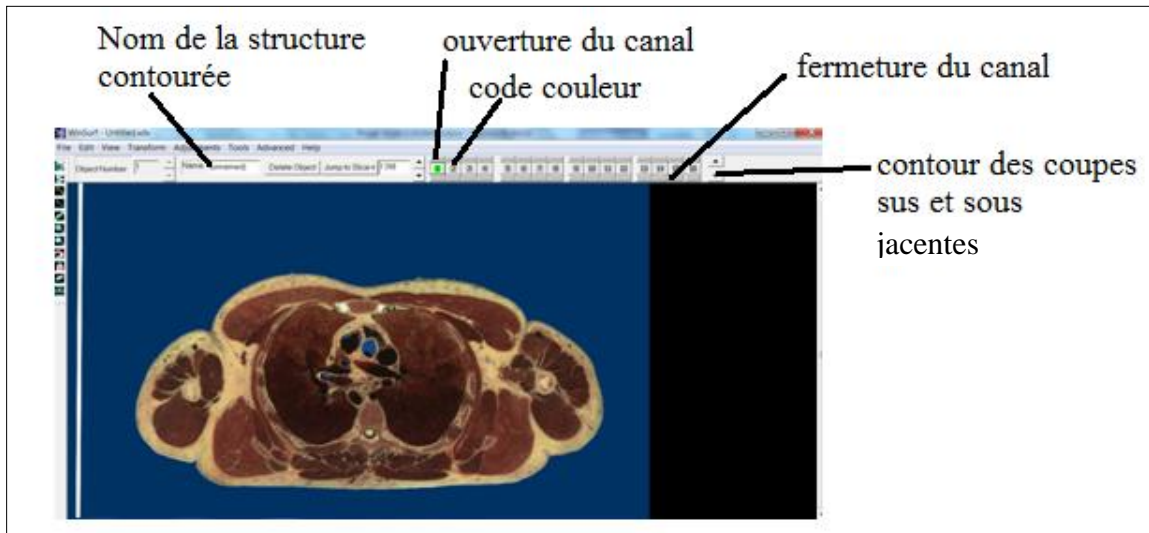


Photo 32 : Écran 2D du logiciel WinSurf.

Le logiciel charge la base de données VHP Male sur la coupe souhaitée. Un écran 2D (Photo 32) propose une liste d'outils pratiques pour délimiter et contourer les structures présentes sur la coupe (Photo 33).



Visualisation de l'objet 3D.
Ajustement des contours.
Segmentation automatique.
Segmentation linéaire.
Segmentation point par point.
Zoom avant.
Zoom arrière.
Déplacement des points.
Ajout de points.
Suppression de points.

Photo 33 : Liste des outils 2D.

PARTIE PRATIQUE A: MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE POUR LA PEDAGOGIE

- Avant de débiter le contourage, nommer l'objet à contourer, l'enregistrer dans un dossier spécifique avec la commande *Save as* (Photo30) ou directement sur l'écran 2D (Photo 32).
 - o Pour la vertèbre nous avons choisi de créer deux objets par vertèbre :
 - un objet Corps vertébral ;
 - un objet Arc vertébral.
 - o Cette subdivision nous permet de séparer les deux objets, de visualiser séparément le corps vertébral et l'arc vertébral et de montrer la disposition centrale de la moelle spinale.
- Faire défiler les coupes afin de visualiser l'ensemble de la structure, son début et sa fin.
- Pour contourer utiliser l'outil crayon (Photo 33), il permet un positionnement précis des points. L'utilisation d'une tablette graphique facilite la procédure.
- Choisir un canal couleur (Photo 32) et l'ouvrir en haut lorsqu'on entame le contourage de la partie crâniale de l'objet, fermer le canal en bas une fois la structure entièrement contournée.
- Les flèches ascendante et descendante à droite des canaux couleur (Photo 32) permettent de visualiser les tracés sus et sous jacents, ils sont utiles pour vérifier et rectifier la localisation de certains nœuds.
- Le contourage se fait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, le premier point et le dernier ne se touchent pas (Photo 34).
- L'écran 3 D permet de visualiser la reconstruction (Photo 35), il affiche un ensemble d'outils (Photo 36)

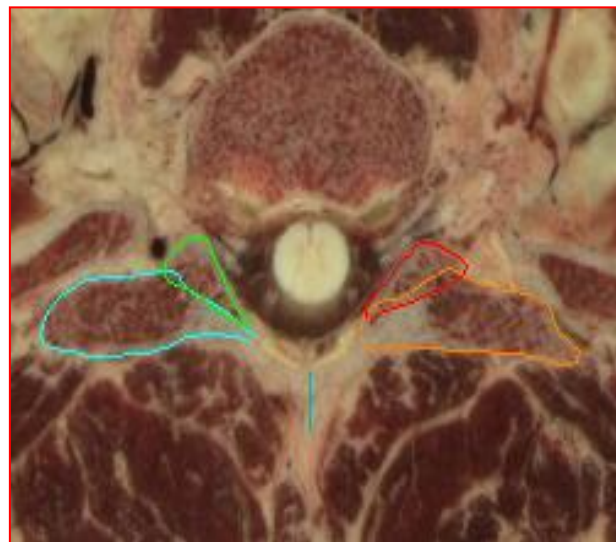


Photo 34: Contourage de l'arc vertébral

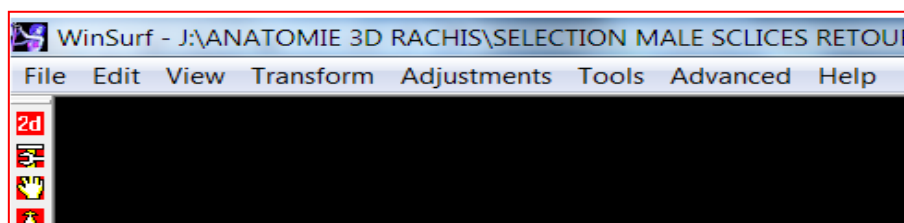


Photo 35: Écran 3D de Winsurf.

PARTIE PRATIQUE A: MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE POUR LA PEDAGOGIE


	Basculer vers l'écran 2D.
	Outils d'ajustement.
	Déplacement.
	Zoom.
	Déplacement 3D.
	Rotation selon l'axe vertical.
	Rotation selon l'axe transversal.
	Couleur de l'interface.
	Prise de photo au format bitmap.
	Prise de mesure.
	Pose de repère.

Photo 36: Liste des outils 3D de Winsurf.

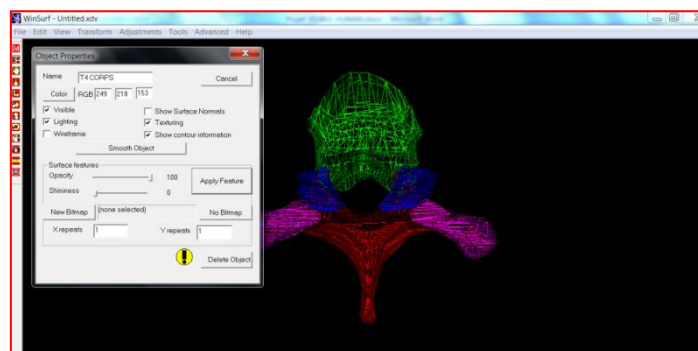


Photo 37: Propriétés de l'objet 3D.

- L'obtention d'un objet 3D harmonieux se fait au prix d'allées retours fréquents de l'objet 2D vers l'objet 3D, des modifications dans le positionnement des points ou de leur nombre sont nécessaires à l'équilibre du modèle.
- L'affichage des caractéristiques de l'objet 3D s'obtient en double cliquant sur l'objet. Les propriétés de l'objet peuvent être modifiées : le choix de la couleur, le mode de visualisation (transparence ; maillage ; vertice), le lissage (*smoothe*), l'opacité et la brillance (Photo 37). L'esthétique du modèle en dépend.
- Un clic droit sur le modèle 3D affiche la liste de tous les objets présents sur l'écran 3D, un double clic sur le nom de l'objet en affiche les propriétés.

PARTIE PRATIQUE A: MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE POUR LA PEDAGOGIE

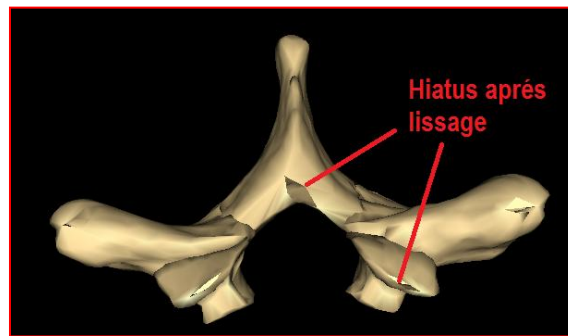


Photo 38: Lissage et hiatus.

Pour notre modèle nous avons sélectionné les couleurs suivantes :

- Os : 249/218/153
- DIV : 198/198/255
- Cartilage chondro-costaux : 119/221/230

Les modifications apportées au modèle se sauvegardent en cliquant sur *save ajustement information*. Les artéfacts (arêtes saillantes et irrégularités) se suppriment par lissage du modèle. Ceci optimise l'esthétique, réduit le nombre de nœuds ainsi que la taille du fichier. Des trous et hiatus (Photo 38) apparaissent à partir de trois lissages, altérant la qualité et la résolution du modèle.

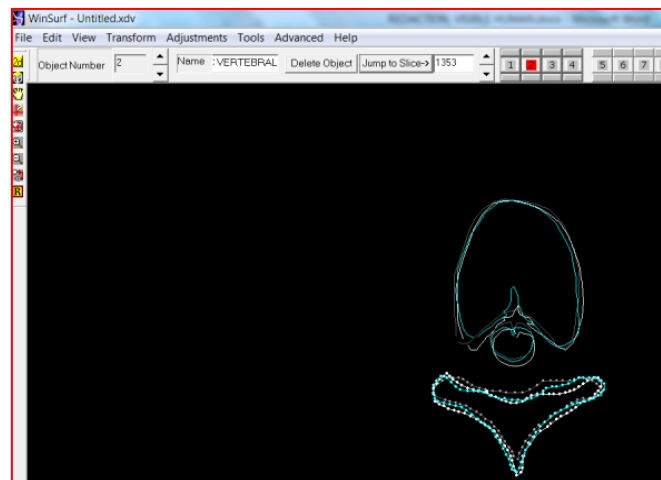


Photo 39: Ajustement du modèle.

Certains oublis et erreurs de contourage induisent des anomalies du modèle 3D :

- Canal non ouvert au démarrage d'un contour, corrigé en cliquant sur la flèche au dessus du canal couleur.
- Pour débiter le contourage un objet en hauteur il est souhaitable de démarrer par un trait droit.
- Lorsque des objets se rejoignent pour n'en former qu'un seul, faire chevaucher les contours sur deux ou trois slices afin de d'obtenir un emboitement et une meilleure congruence.

PARTIE PRATIQUE A: MODELISATION 3D DU RACHIS THORACIQUE POUR LA PEDAGOGIE

- Pour corriger un décalage transversal, cliquer sur l'icône outil ajustement située sous l'icône 3D. L'ensemble des points d'une même coupe apparaissent sur un tracé blanc sur-brillant, les contours sus et sous jacents sont en bleu (Photo 39).
- Les lignes transversales noires sont la conséquence de coupes noires dans la base de données ou de coupes non contournées.

6. Sauvegarde des fichiers

Les contours sont sauvegardés au format .XDV. Sous ce format les fichiers sont modifiables par la commande *edit contour file*.

L'objet 3D final, non modifiable est sauvegardé au format .XDF (*drawing exchange format*), il peut être ouvert et manipulé dans d'autres logiciels 3D : AutoCAD, Maya, 3Dmax, Scketchup...

Pour réunir plusieurs objets finis, il suffit de les sélectionner en .XDF et cliquer sur *save*.

7. Réalisation d'animations

Pour réaliser une vidéo du modèle, cliquer sur *Tools* (outils) puis sur *Movie Frame*, cet outil de WinSurf permet de réaliser un flux de photos à partir du modèle, les images du film se placent dans le dossier *Movie Frame* qui se place automatiquement dans le dossier *Anatomie 3D* que nous avons créé au début de notre travail.

Le traitement des photos par infographie à l'aide de logiciels dédiés (Photoshop, Corel Paint ou Illustrator) permet de retoucher et d'annoter les photos afin d'obtenir un meilleur rendu. L'application *Movie Maker* de Microsoft permet de réaliser le montage vidéo au format .vtmp, le rythme conseillé pour le passage des photos est de 25 photos par seconde. La production d'un flux horizontal puis vertical dans *Movie Frame* et l'assemblage de toutes les photos permet d'obtenir un film complet de l'organe 3D.

8. Illustrations anatomiques

Les modèles numériques tridimensionnels interactifs dans les trois plans de l'espace offrent des angles de vues impossibles à mettre en œuvre sur des sujets cadavériques. Les photos et les captures d'écran de vues 3D permettent de générer de nouvelles illustrations. Les photos prises avec WinSurf sont exportées vers le logiciel Corel Draw puis traitées par infographie (Photo 40).

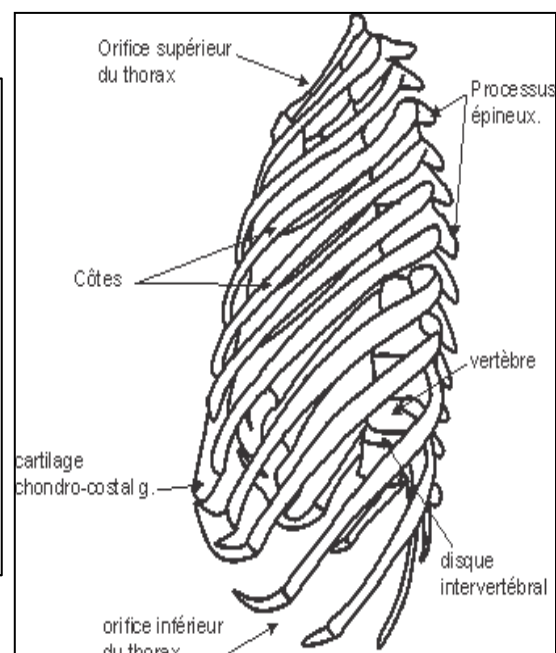
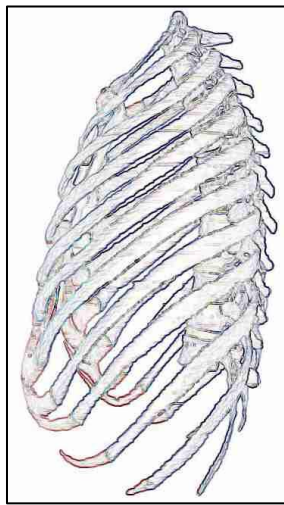
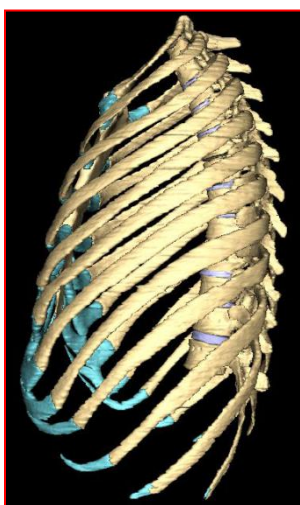


Photo 40: Création d'illustration anatomique à partir de modèle 3D

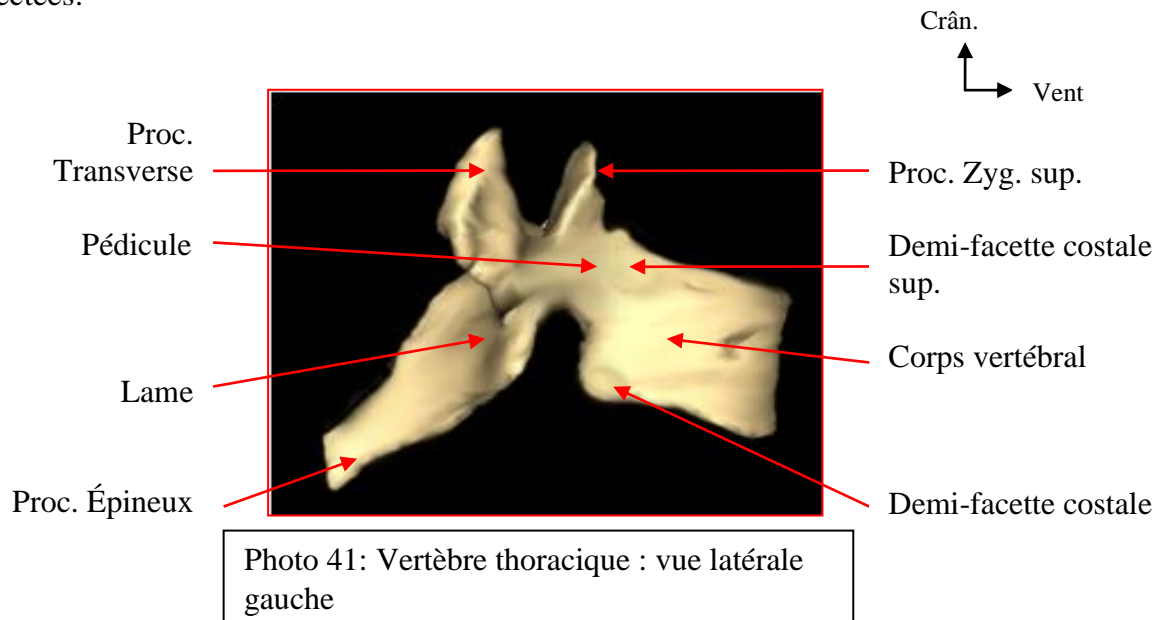
IV. RÉSULTATS

1. Anatomie du modèle 3 D.

Nous avons reconstruit le rachis thoracique en 3D dans sa globalité. La cyphose est respectée, les douze vertèbres et les douze DIV sont présents sur le modèle (Photo 41 à la photo 58).

L'anatomie de la vertèbre thoracique (Fig.92) est conforme aux descriptions des ouvrages anatomiques classiques, les détails ainsi que les spécificités des vertèbres sont visibles :

- le corps vertébral montre : les foramina vasculaires et l'orifice de la veine basi-vertébrale .
- en arrière l'arc vertébral porte les sept processus osseux ;
- les corps vertébraux et les processus transverses présentent des facettes costales ;
- au centre de la vertèbre le foramen vertébral est de forme arrondie ;
- les FIV sont parasagittaux visibles entre les pédicules à tous les étages ;
- T1 montre des processus semi-lunaires , des facettes costales entières et des processus zygapophysaires inclinés à 45° ;
- T11 ne présente qu'une facette costale, les processus transverses sont atrophiés sans facettes costales ;
- les processus zygapophysaires inférieurs de T12 sont convexes et regardent latéralement ;
- l'inclinaison et la projection des processus épineux sur les corps vertébraux sont respectées.



PARTIE PRATIQUE A: RÉSULTATS



Vertèbres



Vertèbres
et DIV



Vertèbres, DIV,
lig. Supra et
inter épineux



Vertèbres, DIV
et LLA

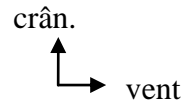


Photo 42: Chronologie de la reconstruction 3D

PARTIE PRATIQUE A: RÉSULTATS

Les douze DIV sont modélisés, ils s'interposent entre les corps vertébraux. Dorsalement sur les arcs vertébraux, on distingue les articulations zygapophysaires, les ligaments flavum (LF) et les ligaments inter-épineux discontinus sont visibles à tous les étages. L'hiatus médian du LF est apparent.

Les ligaments longitudinaux antérieur, postérieur et supra-épineux sont continus.

Le LLA recouvre la face ventrale des corps vertébraux, le LLP est présent à la face dorsale, il délimite ventralement le canal vertébral.

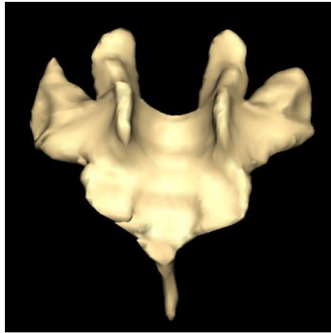


Photo 43: Arc vertébral, vue ventrale.

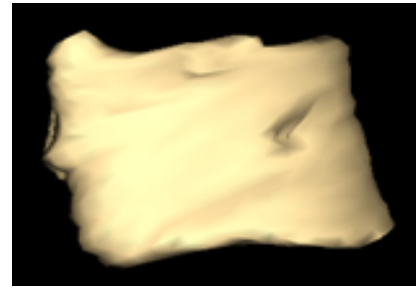
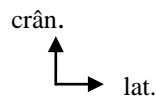


Photo 44: Corps vertébral, vue latérale.

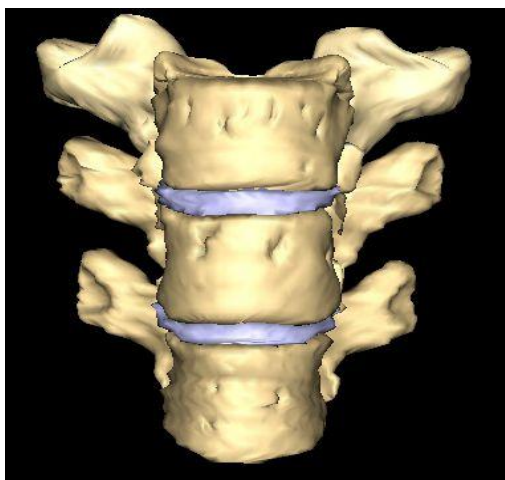
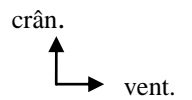


Photo 45: T1-T2-T3, vue ventrale.

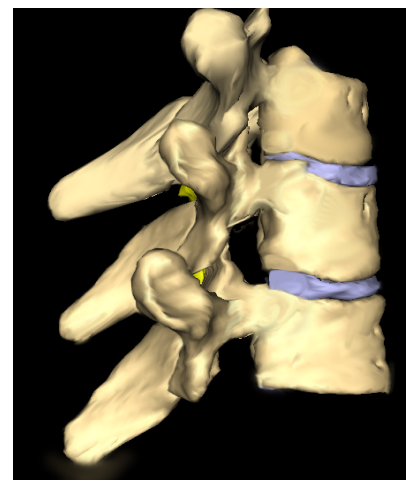
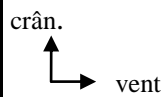


Photo 46: T1-T2-T3, vue latérale.

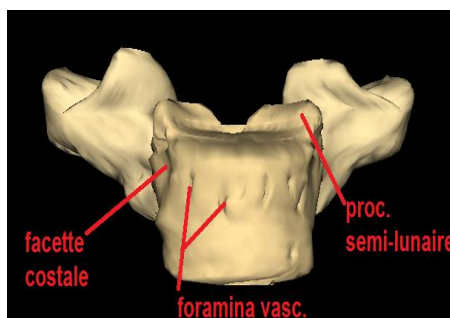
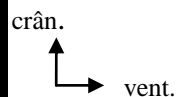


Photo 47: T1, vue ventrale.

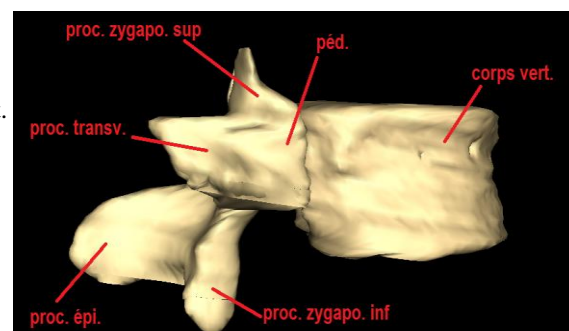
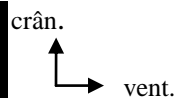
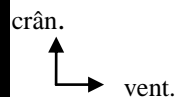


Photo 48: T12, vue latérale.



PARTIE PRATIQUE A: RÉSULTATS

La reconstruction de la vertèbre en deux objets distincts : corps vertébral et arc vertébral permet de visualiser la moelle spinale à l'intérieur du canal.

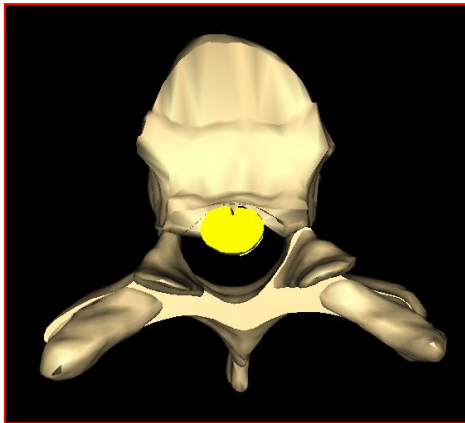


Photo 49: T4 et moelle spinale, vue axiale

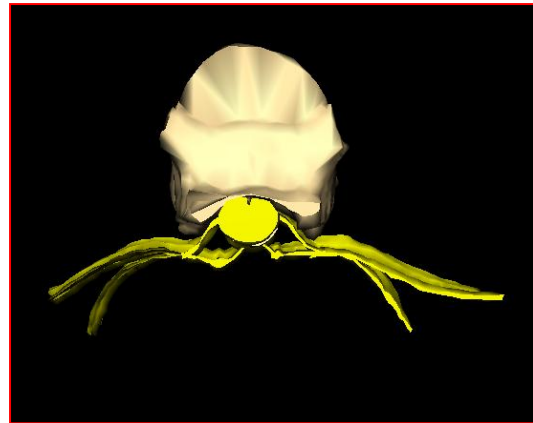


Photo 50: Corps de T4 et moelle spinale, vue axiale

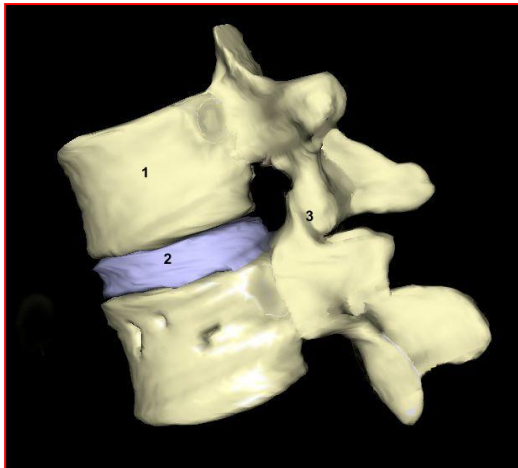


Photo 51: T11- T12, vue latérale.

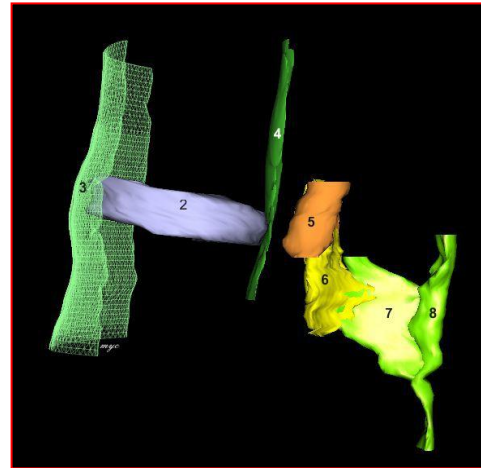


Photo 52: Segment mobile rachidien, vue latérale.



Photo 53: Segment mobile rachidien, vue axiale.

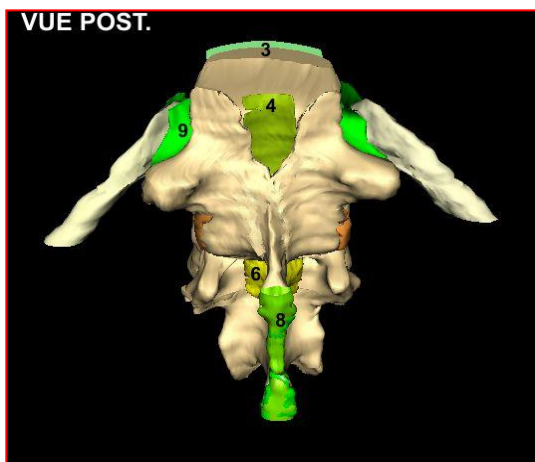


Photo 54: Segment mobile rachidien, vue dorsale.

2. Expertise du modèle

Pour procéder à l'expertise du modèle 3 D du rachis thoracique nous avons choisi de vérifier la projection des organes sur les vertèbres (photos : 55, 56, 57,59):

- le bord crânial du manubrium sternal se projette en T2 ;
- le processus xyphoïde du sternum en T10 ;
- l'apex de la scapula se projette en T7 ;
- la crosse aortique se projette en T4.

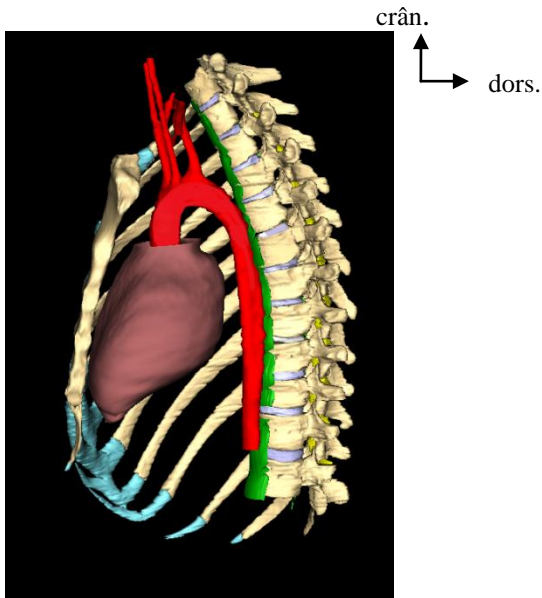


Photo 55: Projection du cœur et de l'aorte sur le rachis thoracique.

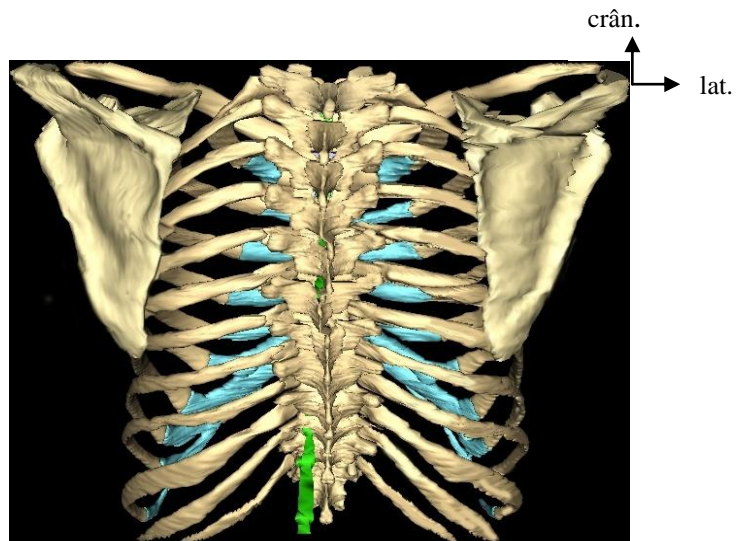


Photo 56: Projection des scapula sur le rachis thoracique.

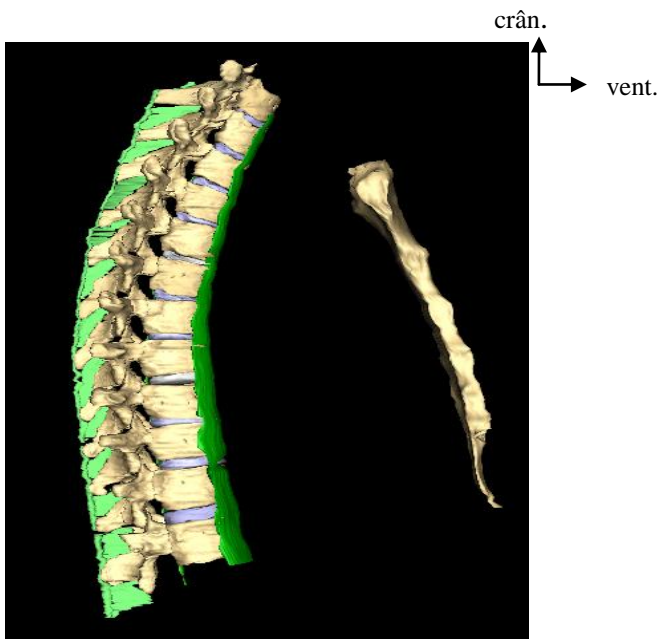


Photo 57: Projection du sternum sur le rachis thoracique.

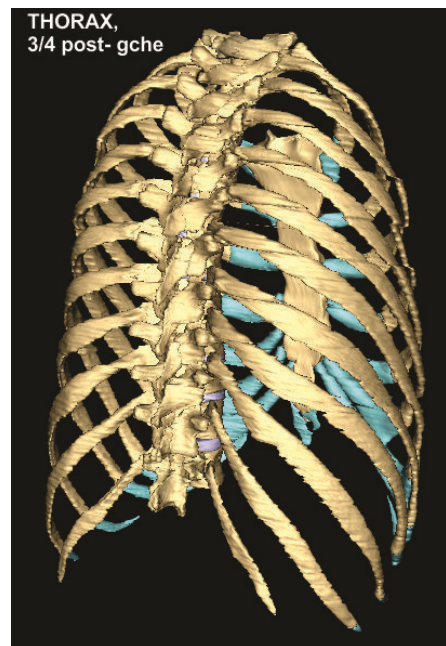
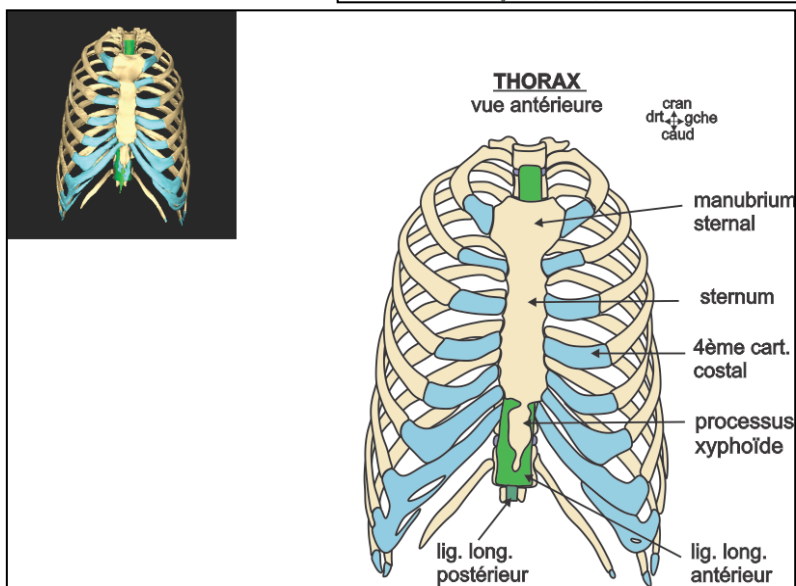
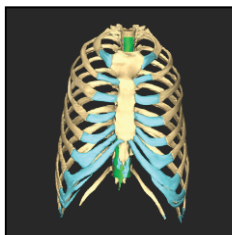
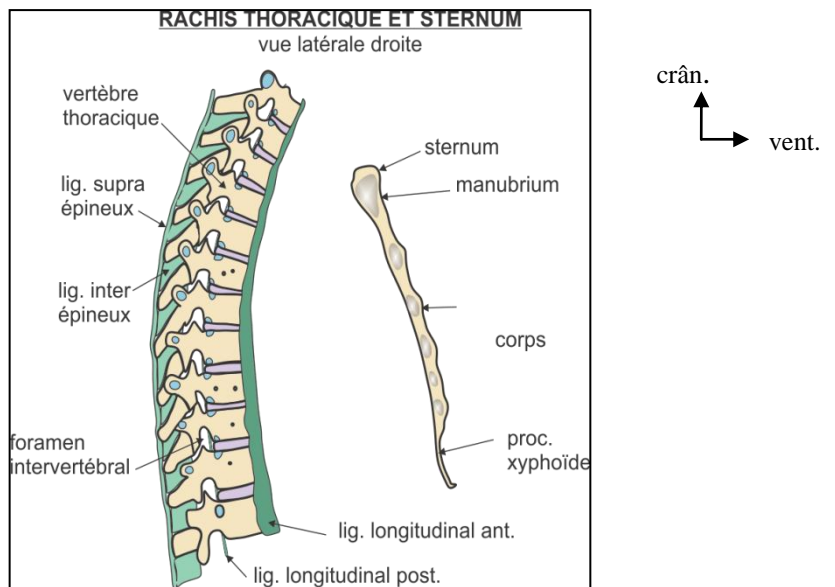
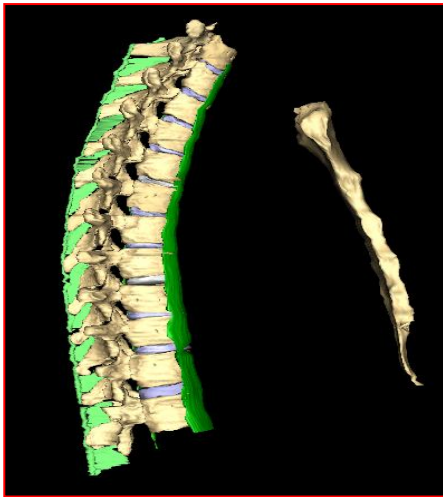
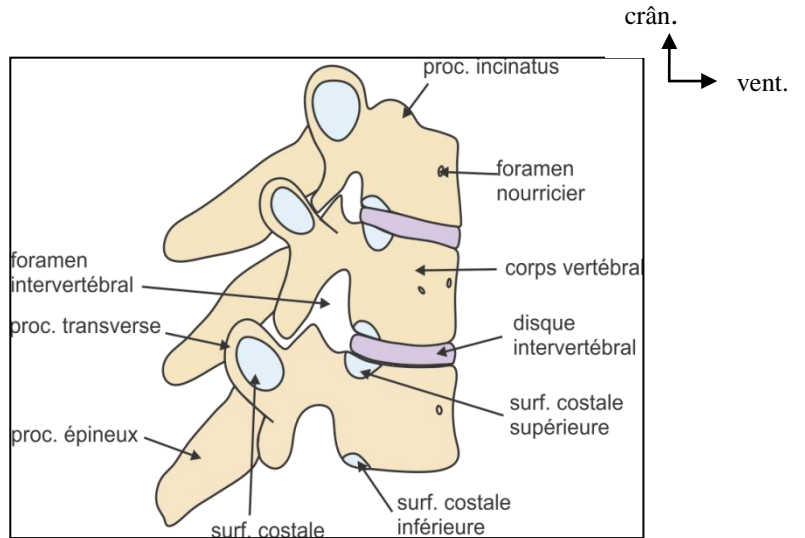
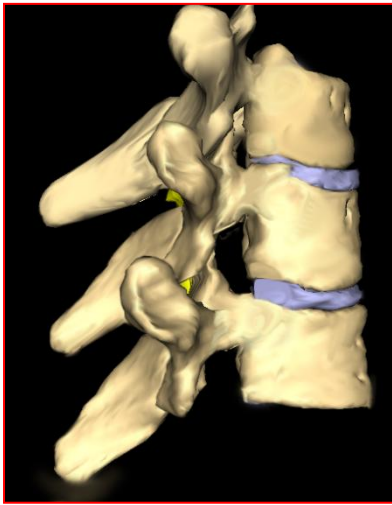


Photo 58: Modèle 3D, vue postérieure

3. Illustration à partir de modèle 3 D



Photos et figures 59 : Exemples d'illustrations réalisées à partir de reconstructions 3D.

V. DISCUSSION

L'objectif de notre modélisation était la création du rachis thoracique en 3 D à des fins de pédagogie à partir de *Visible Human Project (VHP) Male* et du logiciel WinSurf.

Pour cela, nous avons utilisé la base de données VHP Male distribuée lors du séminaire national de formation en anatomie numérique. Cette base de données présente de nombreuses défaillances et fait l'objet de diverses critiques : l'âge du donneur, l'épaisseur des coupes rendant impossible la segmentation de structures inférieures à 0.33 mm, l'injection de formol ayant altéré la couleur des structures et la segmentation de la base de données qui n'a jamais été partagée et diffusée. Nous avons pour notre part mis en évidence d'autres anomalies, à l'absence de coupes, les décalages transversaux qui entraînent des distorsions des modèles.

Des solutions ont été apportées. Une base de données corrigée en haute résolution existe, mais n'était pas en notre possession, nous aurions dû par le biais de notre université demander une licence sur le site de VHP.

Le logiciel WinSurf version 4.3 utilisé dans notre travail est un logiciel 3D ancien et obsolète, il nous a cependant permis d'effectuer le contourage manuel de la base de données, structure par structure, ceci est une méthode extrêmement chronophage (3 heures sont nécessaires à la reconstruction d'une vertèbre) mais qui s'adapte à tous les éléments anatomiques. Winsurf est très peu utilisée dans la littérature, exception faite du laboratoire d'anatomie numérique de l'université Paris Descartes, il est peu intuitif et fastidieux d'utilisation, l'obtention d'un modèle réaliste ne se fait qu'au prix d'un positionnement précis des points de contourage et d'un va-et-vient continu entre les écrans 2 D et 3D afin de s'assurer de la qualité de la segmentation et de visualiser la reconstruction au fur et à mesure de sa conception. L'utilisation d'autres logiciels de reconstruction 3 D permettrait de comparer les capacités de chacun d'entre eux à générer un modèle 3D réaliste, précis et imprimable. Le logiciel Slicer est largement conseillé.

Nous sommes parvenus à construire un modèle 3D du rachis thoracique (Photo 60), comportant 12 vertèbres et décrivant une cyphose concave ventralement, à sommet en T 6. Les DIV, le LLA, le LLP, les ligaments flavum, supra épineux et inter-épineux ainsi que les articulations zygapophysaires sont visibles. Les noms employés pour les structures anatomiques sont ceux de la Nomina Anatomica et de la FMAID, l'utilisation de cette nomenclature a également permis d'organiser les fichiers .xdv et .xdf.

Le modèle peut être visualisé et assemblé élément par élément, comme nous le faisons dans un cours d'anatomie ou alors chargé d'emblée dans sa totalité. Il est manipulable dans les trois plans de l'espace. Les détails sont visibles par zoom, la compréhension des rapports est facilitée par les rotations verticale et horizontale, les translations et la transparence des objets. La possibilité offerte par le logiciel de rendre des objets invisibles permet d'éplucher le modèle et de réaliser une dissection virtuelle Dissection Anatomique Assistée par Ordinateur (DAAO).

L'option Movie Frame de Winsurf permet de réaliser un flux de photos à partir du modèle, le traitement par infographie des photos à l'aide de logiciels de retouche d'image tels que Photoshop, Corel Paint ou Illustrator permet d'annoter et retoucher les photos (Fig.59) afin d'obtenir un meilleur rendu. L'application Movie Maker de Microsoft permet

de réaliser le montage vidéo au format .vimp et de l'insérer dans une présentation Power Point.

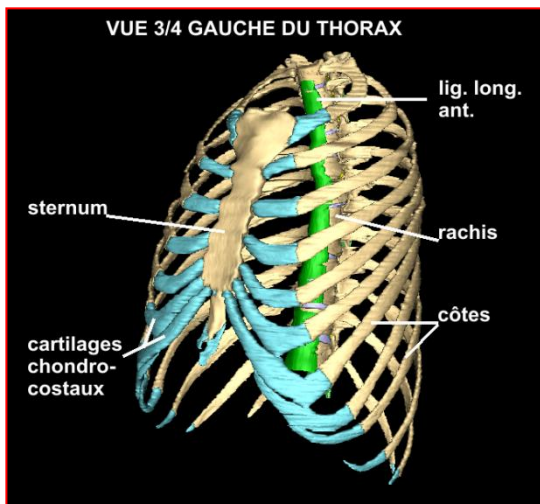
Pour diffuser et partager les modèles 3D de l'anatomie humaine, il est possible d'intégrer dans un document pdf un modèle 3D pdf interactif.

Par ailleurs, la conception de nouvelles illustrations est envisageable afin d'actualiser et de renouveler les ouvrages d'anatomie. Les effets spectaculaires des logiciels d'infographie permettraient de dynamiser l'iconographie anatomique.

Au final, la création de modèles tridimensionnels des organes à partir de la base de données VHP est accessible à tous les enseignants spécialisés en anatomie humaine. L'étape primordiale et essentielle à la reconstruction 3 D à partir des coupes cadavériques est l'identification visuelle et la segmentation manuelle des images. Fastidieuse et chronophage, c'est une étape incontournable pour l'obtention d'un modèle 3D précis, expertisé et réaliste, utile à la pédagogie et à la réalité virtuelle.

VI. CONCLUSION

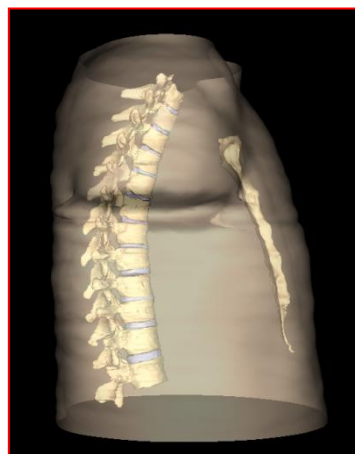
Les modèles anatomiques numériques existent depuis la fin des années 1980, il aura fallu la démocratisation d'internet et des nouvelles technologies pour qu'ils prennent de l'essor et se diffusent. La validité d'un modèle digital relève de son niveau de précision et de la qualité de son expertise. Nous proposons dans cette thèse un modèle 3D du rachis thoracique comportant les vertèbres, les DIV, les ligaments. Nous avons modélisé d'autres structures qui nous permettent de placer le modèle dans son environnement (Photo 60). Nous sommes parvenus à la construction d'un modèle tridimensionnel réaliste, interactif, manipulable dans les trois plans de l'espace offrant l'alternative de pratiquer de la dissection virtuelle. Ce modèle 3D de visualisation à visée pédagogique, nous offre la possibilité de créer et d'actualiser les outils d'enseignements de l'anatomie humaine : modèles 3D digital, illustrations, vidéos, conception de maquettes. La dissection de cadavre dans un laboratoire est le meilleur moyen de comprendre l'anatomie, ne pouvant offrir cette expérience unique à nos étudiants, nous devons impérativement saisir, nous anatomistes, l'opportunité et les potentialités apportées par la technologie numérique pour donner un renouveau à notre science, nous devons construire, élaborer et mettre en place des outils pédagogiques à la hauteur leurs espérances.



60-a



60-b



60-c

Photos 60-a ; 60- b ; 60-c : Rendu final du modèle 3D

PARTIE PRATIQUE B
ATLAS MORPHOLOGIQUE 3D DES FRACTURES VERTÉBRALES
OSTÉOPOROTIQUES.

I. INTRODUCTION

Deux méthodes sont décrites dans la littérature pour établir le diagnostic de fracture vertébrale non traumatique et notamment ostéoporotique, l'une visuelle semi-quantitative, l'autre morphométrique quantitative.

Chacune de ces méthodes s'appuie sur la comparaison à un référentiel :

- l'atlas morphologique des fractures vertébrales de Genant permet de faciliter le dépistage et le classement des fractures vertébrales ostéoporotiques (FVO) sur les modalités d'imagerie 2 D.
- les tableaux normatifs des hauteurs vertébrales et de leurs ratios permettent d'identifier les FVO, par comparaison des écarts-types.

Il n'existe pas dans la littérature d'atlas morphologique tridimensionnel des fractures vertébrales qui permettent sur les reconstructions 3D de grader et classer les vertèbres fracturées. Nous n'avons pas, non plus retrouvée de base de données des hauteurs vertébrales de la femme algérienne, sachant que celles-ci sont spécifiques à chaque population (177) (178). La comparaison des vertèbres à celles d'une population de même race, sexe et âge est souhaitable (179) lors d'études de la FVO par la méthode morphométrique.

II. OBJECTIFS

- L'objectif principal est l'élaboration d'un atlas morphologique tridimensionnel des fractures vertébrales ostéoporotiques, semblable à celui de Genant, utile au diagnostic visuel des FV sur les reconstructions 3 D.
- L'objectif secondaire est la création d'une base de données normative des hauteurs vertébrales à partir d'un échantillon de femme algérienne.

III. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Matériel

Il s'agit d'une étude transversale rétrospective de 102 TDM-TAP de patientes adressées au service de radiologie du CHU de Tizi-Ouzou pour des raisons diverses, sur une période de six mois (août 2017 - janvier 2018).

La lecture des TDM-TAP est effectuée sur un micro-ordinateur Apple, à l'aide du logiciel d'imagerie open source Osirix 32 bit et d'une tablette graphique.

Les mesures des hauteurs vertébrales sont enregistrées et traitées dans Excel, l'analyse visuelle semi-quantitative dans le logiciel SPSS.

2. Méthodes

Cette étude comporte deux objectifs, explorés selon deux protocoles. :

- Pour élaborer l'atlas morphologique 3D des fractures vertébrales ostéoporotiques, nous étudions la prévalence de ces fractures sur les examens TDM - TAP des femmes âgées de 50 ans et plus.
- La base de données normative est réalisée à partir de mesures effectuées sur les examens TDM - TAP des femmes de 20 à 49 ans.

3. Critères d'inclusion.

Cette étude concerne toutes les patientes âgées de 20 ans et plus, adressées au service de radiologie du CHU Nedir Mohamed de Tizi-Ouzou pour un examen tomodensitométrique thoraco-abdomino-pelvien (TAP) durant la période allant de Août 2017 à Janvier 2018.

4. Critères d'exclusion.

Sont exclus de notre étude :

- Les examens ne mentionnant pas l'âge de la patiente sur le cd-rom de l'examen TDM-TAP,
- les examens inexploitable pour la reconstruction 3D,
- les rachis présentant une pathologie maligne.

5. Création de l'atlas morphologique 3D des fractures vertébrales ostéoporotiques.

La méthode semi-quantitative de Genant est largement employée en clinique et en recherche (175) pour le diagnostic de FV. Elle permet d'identifier la fracture, d'en préciser le grade et le type par comparaison à un atlas morphologique 2 D.

La prévalence de la fracture vertébrale ostéoporotique est plus élevée chez la femme ménopausée (180), âgée de 50 ans et plus (169), nous menons notre étude dans ce groupe de patientes.

Sur les reconstructions sagittales du rachis, on apprécie, le profil rachidien et l'aspect des vertèbres, afin d'établir un diagnostic différentiel et d'éliminer les FV non ostéoporotiques.

Les examens sont classés selon un mode binaire en : vertèbre non fracturée, vertèbre fracturée (Organigramme 1).

Toutes les vertèbres fracturées sont comparées aux vertèbres de l'atlas morphologique de Genant, par superposition d'un calque.

Sont considérées fracturées les vertèbres présentant : une perte de parallélisme des plateaux vertébraux, une rupture de la corticale, une dépression d'un plateau vertébral, une perte de la continuité verticale, un coin vertébral antérieur ou postérieur.

Une diminution de la hauteur vertébrale permet de grader la FV,

- grade 1 : diminution de 20-25% est une fracture minime.
- grade 2 : diminution de 25-40% est une fracture modérée.
- grade 3 : diminution >40 % est une fracture sévère.

Le type est déterminé par l'aspect de la vertèbre (Fig 50):

- cunéiforme,
- biconcave,
- en galette.

PARTIE PRATIQUE B : ATLAS MORPHOLOGIQUE 3D DES FRACTURES VERTÉBRALES OSTÉOPOROTIQUES

Cette méthode ne nécessite pas de comparaison à une population de référence, elle est basée sur l'expérience du radiologue et l'atlas morphologique de Genant.

Pour évaluer la répétabilité et la reproductibilité de la lecture, 31 vertèbres L5 ont été examinées par deux lecteurs. Une fois par le lecteur A, et deux fois par le lecteur B à 15 jours d'intervalle, avec les mêmes instruments. Un grade et un type est assigné à chaque FV.

Le comptage et le numérotage des vertèbres est établi après repérage de L1, première vertèbre sans côtes.

Pour certaines vertèbres le diagnostic de FV était incertain, nous avons réalisé une morphométrie vertébrale et considéré fracturées les vertèbres présentant un écart-type $\leq 3SD$ par rapport à la population de référence, en accord avec la méthode de Eastell (181).

6. Création de la base de données normatives des hauteurs vertébrales.

Pour créer la base de données normative des hauteurs vertébrales nous réalisons une étude de morphométrie des rachis de femmes jeunes, ne présentant ni anomalie de courbure, ni fracture vertébrale.

Il s'agit d'une méthode quantitative basée sur la mesure des hauteurs antérieure, moyenne et postérieure H_A , H_M , H_P (en millimètre) du corps vertébral. Six points sont placés manuellement sur chaque vertèbre, en respectant les recommandations de Hurxthal (182) et Smith-Bidman (169). Elles permettent le calcul de ratios H_A/H_P ; H_M/H_P et $H_P/H_{P\pm 1}$.

Les dimensions vertébrales sont corrélées à la stature de l'individu, l'utilisation de ratios permet de normaliser les hauteurs vertébrales en rapportant les hauteurs du corps vertébral à la hauteur postérieure de celui-ci.

La répétabilité et la reproductibilité de la méthode sont évaluées à partir des mesures effectuées par deux lecteurs.

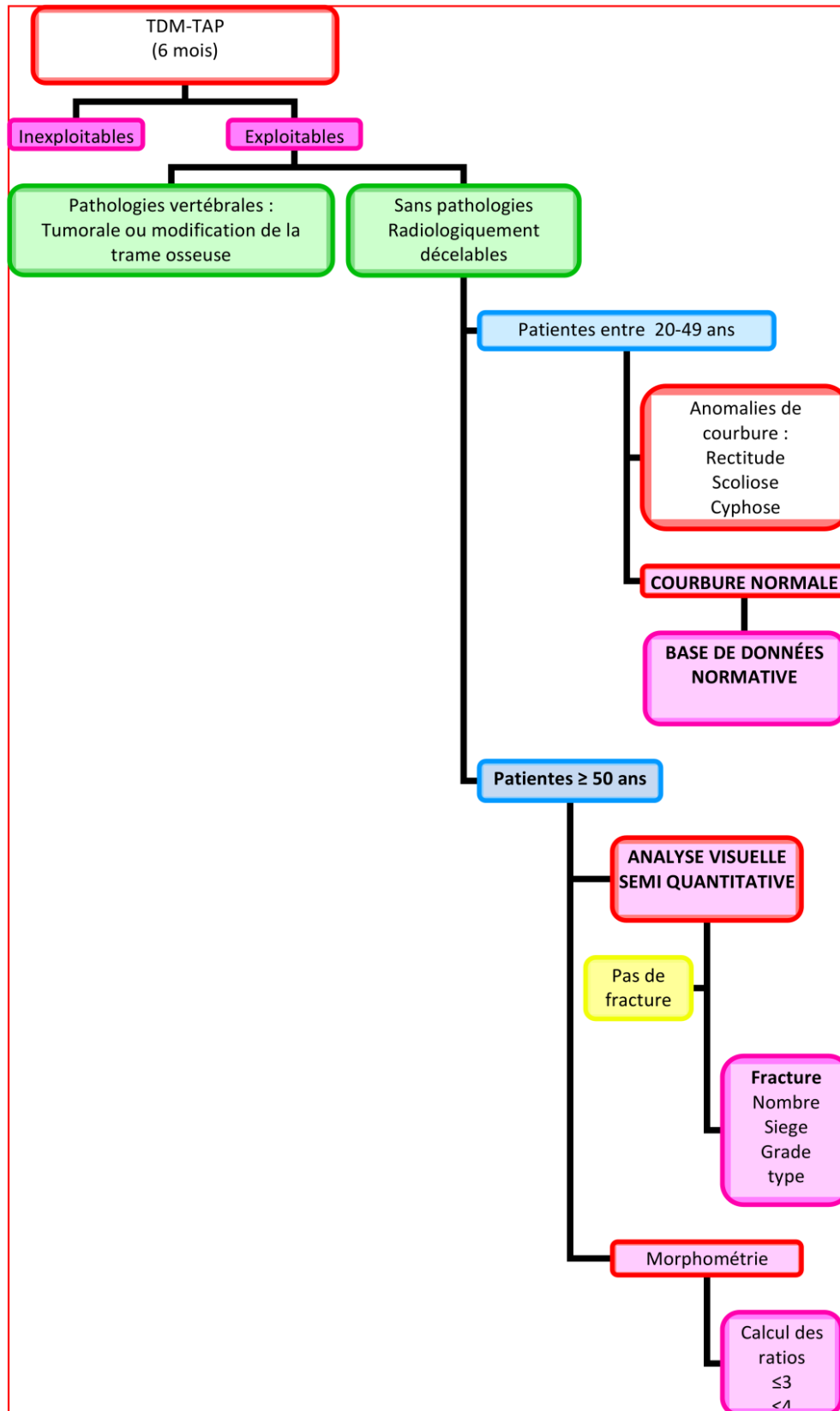
Les ratios renseignent sur le profil morphologique du corps vertébral (174), ce dernier est assimilé de manière globale à un rectangle avec le ratio $H_A/H_P = 1$.



Photo 24: Hauteurs vertébrales. [images TDM personnelle]

- $H_A/H_P < 1$, indique un aspect cunéiforme antérieur (index de cunéisation) ;
- $H_A/H_P > 1$, indique un aspect cunéiforme postérieur ;
- $H_M/H_P < 1$, indique un aspect concave ou biconcave (index de concavité) ;
- $H_P/H_{P\pm 1}$, compare la hauteur postérieure à celle des vertèbres sus et sous jacentes (index de déformation postérieure).

PARTIE PRATIQUE B : ATLAS MORPHOLOGIQUE 3D DES FRACTURES VERTÉBRALES OSTÉOPOROTIQUES



Organigramme 1 : Protocole d'étude

IV. RÉSULTATS.

L'étude statistique est réalisée à l'aide des logiciels Excel 2007 et SPSS version 21.

1. Statistiques descriptives de l'ensemble de la base de données.

Tableau 1 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE L'ENSEMBLE DE LA BASE DE DONNEES

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
Age de la patiente	102	21	95	54,83	13,490
N valide (listwise)	102				

Nous avons collecté 131 TDM-TAP sur une période de 6 mois, au service de radiologie du CHU Nédir Mohamed, les patientes étaient toutes adressées pour des raisons autres que rachidiennes. Après triage et respect des critères d'inclusion et d'exclusion nous retenons 102 patientes.

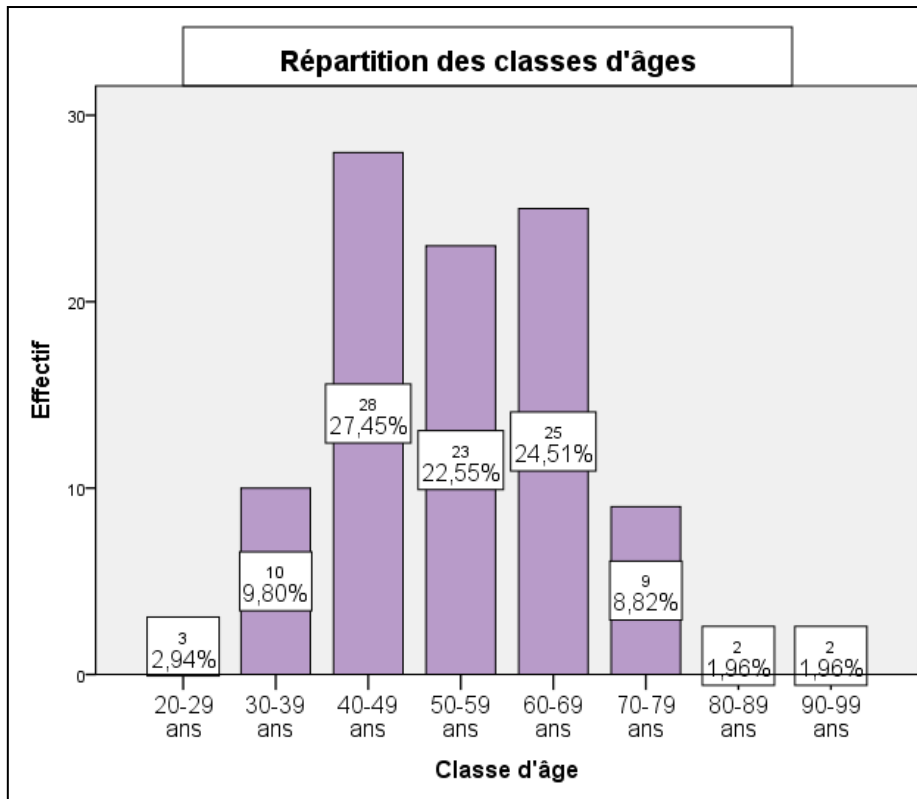
La moyenne d'âge des patientes est de 54.8 ans (± 13.5), la moins âgée a 21 ans et la plus âgée a 95 ans, la classe d'âge de 40-49 ans est la plus représentée (Tabl 1 et 2), (Diag. 1).

Tableau 2 : CLASSE D'ÂGE DES PATIENTES

	Effectifs	Pourcentage	Pourcentage valide
20-29 ans	3	2,9	2,9
30-39 ans	10	9,8	9,8
40-49 ans	28	27,5	27,5
50-59 ans	23	22,5	22,5
Valide 60-69 ans	25	24,5	24,5
70-79 ans	9	8,8	8,8
80-89 ans	2	2,0	2,0
90-99 ans	2	2,0	2,0
Total	102	100,0	100,0

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS

Diag.1



Diag.2

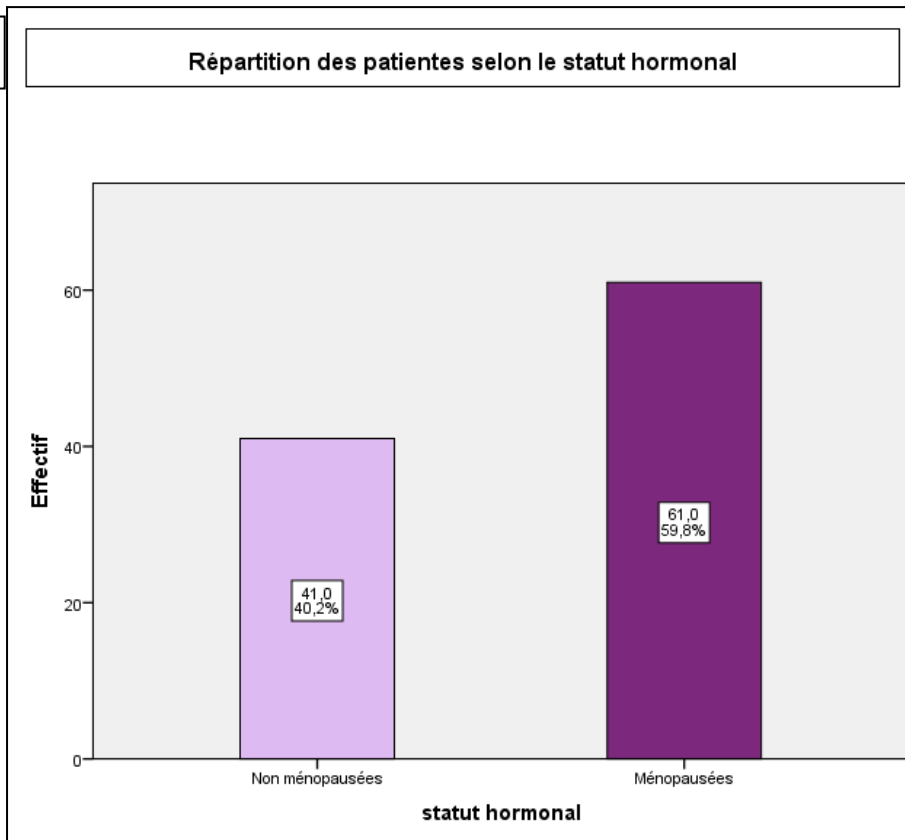


TABLEAU 3 : PROFIL RACHIDIEN ET EXISTENCE D'UNE FRACTURE VERTEBRALE (FEMMES PRÉ-MÉNOPAUSÉES)

		Existence d'une fracture vertébrale		Total
		oui	non	
Profil rachidien	Courbure normale	3	31	34
	Scoliose	2	1	3
	Rectitude	3	1	4
Total		8	33	41

Interprétation :

- 41 patientes ont moins de 50 ans et sont donc pré-ménopausées, 61 patientes ont plus de 50 ans et sont ménopausées (Diag. 2).
- Le groupe de femmes pré-ménopausées, est retenu pour la création de la base de données normatives des hauteurs vertébrales, on ne prend en considération que les rachis qui ne présentent ni anomalies de courbure ni fractures vertébrales. Trente et une (n= 31) patientes sont retenues pour la création de la base de données normative des hauteurs vertébrales par méthode morphométrique (Tabl 3).
- Toutes les patientes âgées de plus de 50 ans (n= 61) sont sélectionnées pour l'étude de la prévalence de la fracture vertébrale ostéoporotique par la méthode de Genant. Les rachis fracturés sont retenus pour la construction de l'atlas 3D des fractures vertébrales ostéoporotiques.

Intérêt :

La répartition des patientes de la base de données en deux catégories pré-ménopausées et ménopausées, est utile à:

- la création de la base de données des hauteurs vertébrales normales, est réalisée chez la femme jeune avant l'altération du tissu osseux consécutif à la ménopause sur des rachis normaux.
- la sélection des fractures vertébrales ostéoporotiques est effectuée chez les femmes de plus de 50 ans, les FVO sont plus fréquentes après la ménopause.

2. Étude de la prévalence de la fracture vertébrale ostéoporotique et création de l'atlas morphologique 3D.

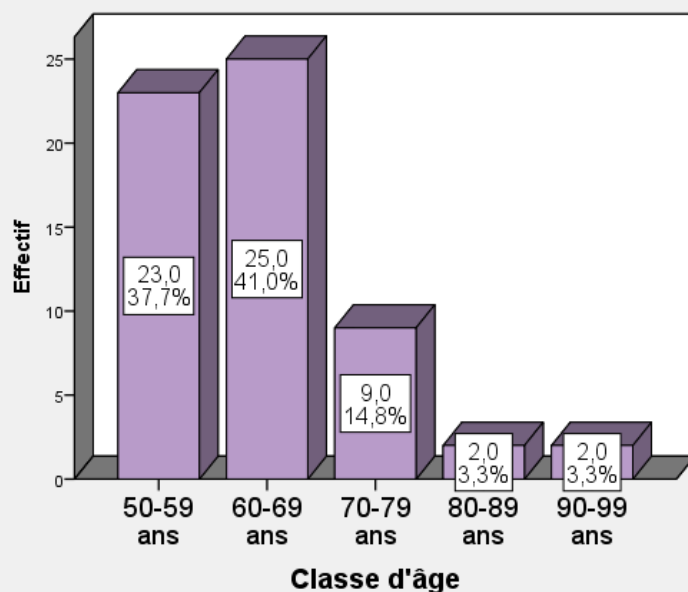
a. Données démographiques des patientes de plus de 50 ans

N	Valide	61
	Manquante	0
	Moyenne	63,51
	Ecart-type	9,206
	Minimum	51
	Maximum	95

	Effectifs	Pourcentage	Pourcentage valide
50-59 ans	23	37,7	37,7
60-69 ans	25	41,0	41,0
70-79 ans	9	14,8	14,8
80-89 ans	2	3,3	3,3
90-99 ans	2	3,3	3,3
Total	61	100,0	100,0

Diag. 3

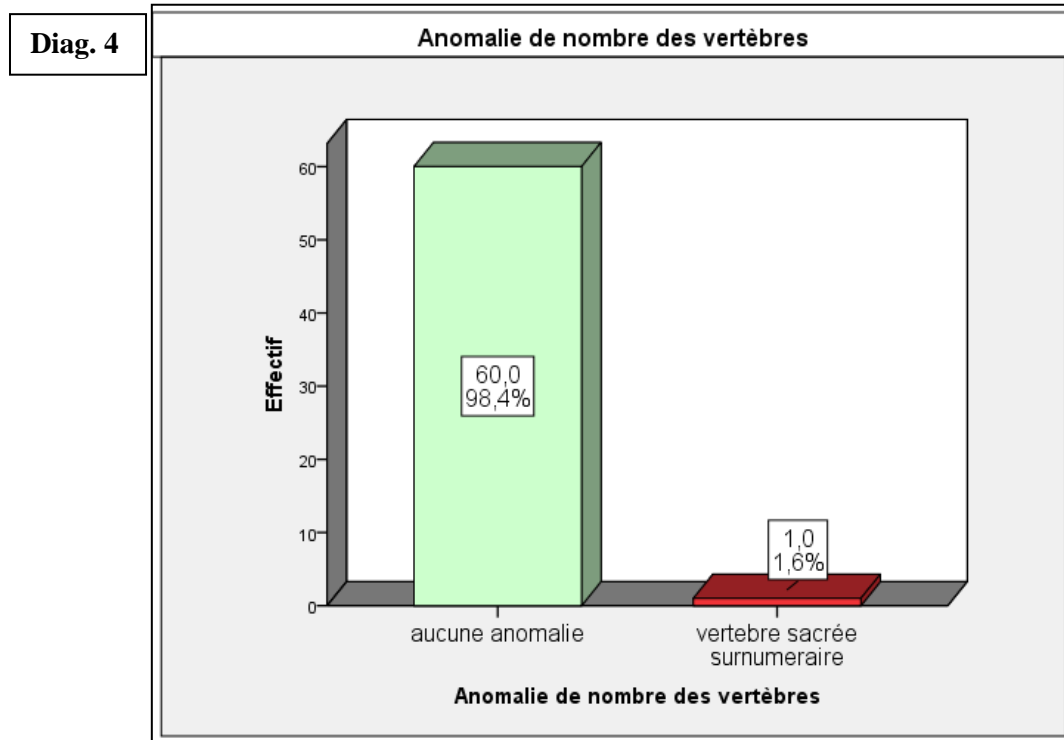
Répartition par classe d'âge



Interprétation : La classe d'âge la plus représentée est celle de 60-69 ans. Les classes d'âge les plus reculées sont peu représentées.

Intérêt : La classe d'âge la plus représentée est celle qui présente dans la littérature le plus de FVO.

b. Anomalies vertébrales congénitales.



Interprétation :

Une seule vertèbre anormale de type vertèbre sacrale surnuméraire est retrouvée. Les anomalies vertébrales congénitales sont peu fréquentes dans notre échantillon.

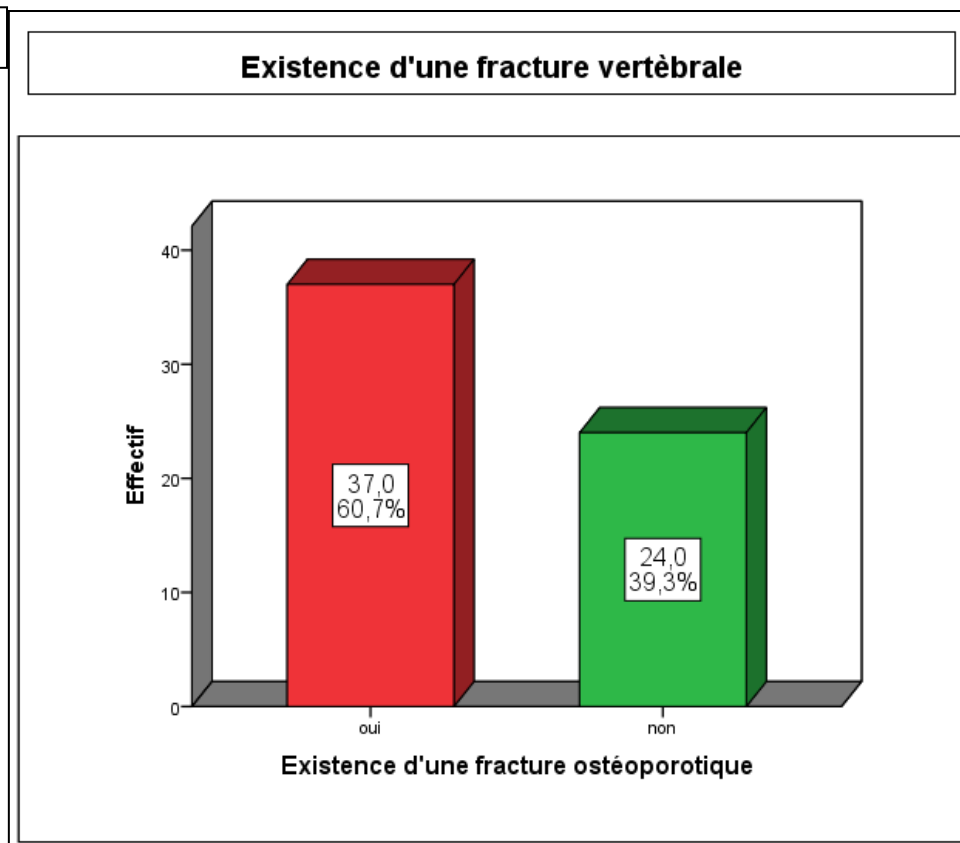
Intérêt :

L'anomalie vertébrale congénitale est un diagnostic différentiel de la fracture vertébrale.

c. Prévalence de la fracture vertébrale

TABLEAU 5 : EXISTENCE DE FRACTURE VERTÉBRALE					
		Effectifs	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	oui	37	60,7	60,7	60,7
	non	24	39,3	39,3	100,0
Total		61	100,0	100,0	

Diag. 5

**Interprétation**

La prévalence de la fracture vertébrale ostéoporotique chez la femme âgée de 50 ans et plus est de 60.7%.

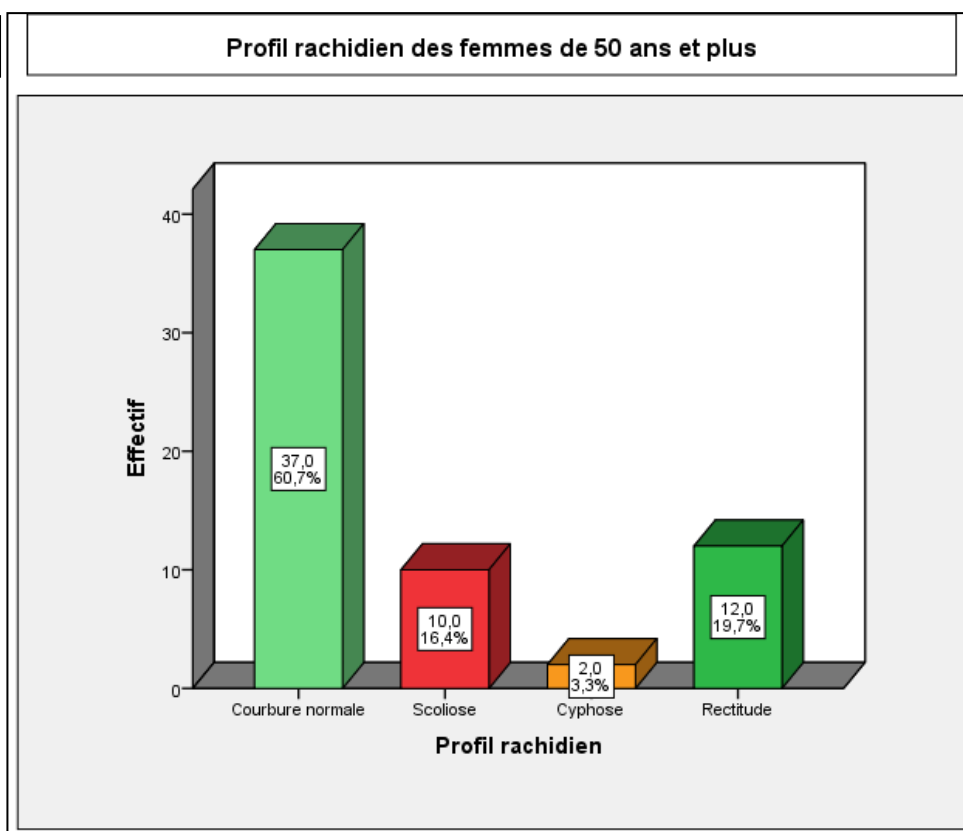
Intérêt :

La fracture vertébrale ostéoporotique est une fracture fréquente, elle doit être recherchée systématiquement chez les patientes ménopausées.

d. Étude du profil rachidien

TABLEAU 6 : PROFIL RACHIDIEN			
		Effectifs	Pourcentage
Valide	Courbure normale	37	60,7
	Scoliose	10	16,4
	Cyphose	2	3,3
	Rectitude	12	19,7
Total		61	100,0

Diag. 6 :



Interprétation

Dans notre étude seulement 60,7% des patientes ont un profil rachidien normal.

19.7 % des femmes de plus de 50 ans ont un rachis en rectitude, et 16.4 % ont une scoliose et 2% ont une scoliose.

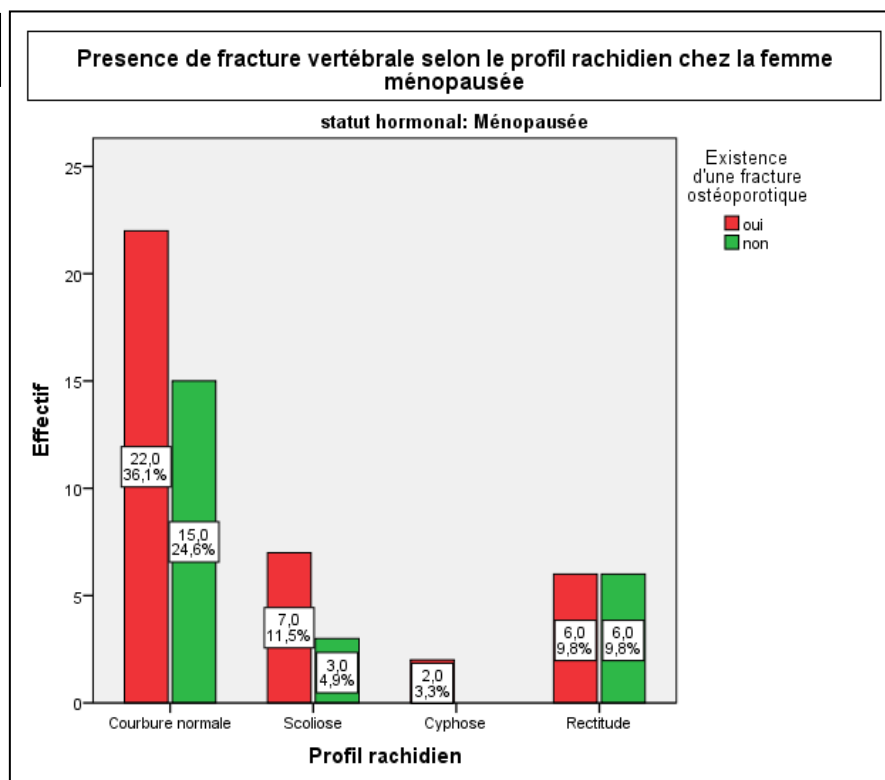
Intérêt :

En plus des modifications de la densité osseuses liées à l'âge, les variations de courbure du rachis, perturbent les charges appliquées sur les vertèbres augmentant le risque de fracture.

e. Fracture vertébrale et profil rachidien.

Tableau 7 : PROFIL RACHIDIEN ET EXISTENCE D'UNE FRACTURE VERTEBRALE					
			Existence d'une fracture vertébrale		Total
			oui	non	
Plus de 50 ans	Profil rachidien	Courbure normale	22	15	37
		Scoliose	7	3	10
		Cyphose	2	0	2
		Rectitude	6	6	12
Total			37	24	61

Diag. 7



Interprétation

Sur les 10 rachis scoliotiques, 7 présentent des fractures soit 11.5%. Les deux rachis cyphotiques sont fracturés, la rectitude n'influence pas la fréquence de fracture. La recherche d'une corrélation par la méthode de Spearman ($r = -0.026$ et $p = 0.855$) indique une corrélation significative et négative entre le profil rachidien et la présence de fracture : l'existence de fractures vertébrale diminue sur les profils rachidiens normaux.

Intérêt :

Les rachis déformés prédisposent à la fracture vertébrale ostéoporotique.

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS

f. Existence de fracture vertébrale ostéoporotique chez la femme de plus de 50 ans, sans scoliose.

TABLEAU. 8 : EXISTENCE DE FRACTURES VERTÉBRALES CHEZ LES FEMMES DE PLUS DE 50 ANS SANS SCOLIOSE.					
		Effectifs	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Plus de 50 ans	oui	30	58,8	58,8	58,8
	non	21	41,2	41,2	100,0
	Total	51	100,0	100,0	

Diag. 8

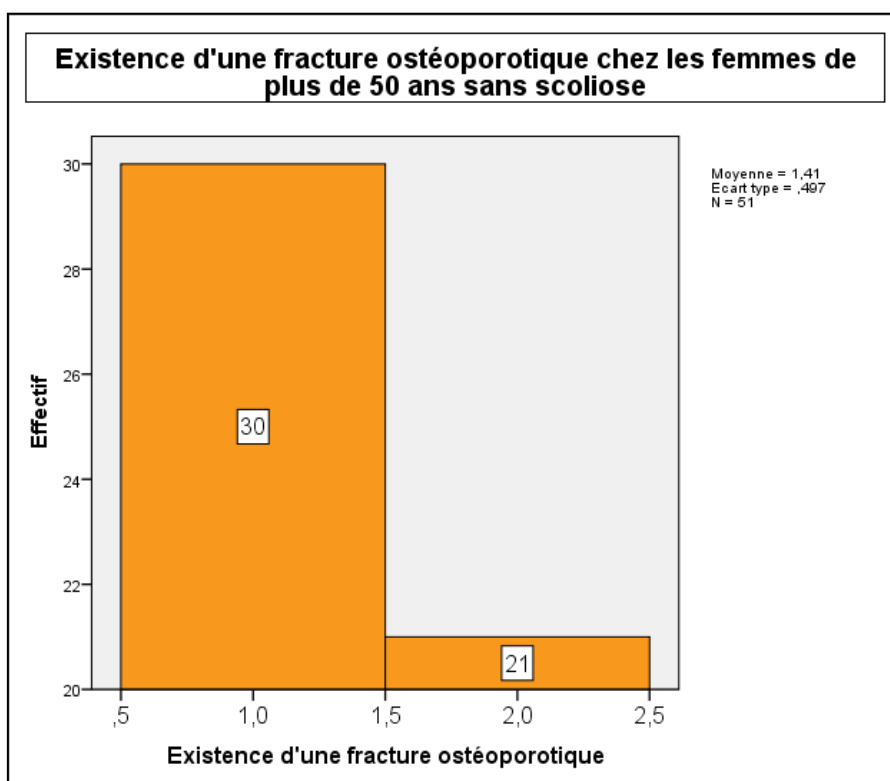


TABLEAU 8' : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES FVO					
	N	Minimu m	Maximu m	Moyenn e	Ecart type
Nombre de fracture	30	1	9	3,50	2,418

Interprétation :

Après retrait des 10 rachis scoliotiques, l'existence de FVO est retrouvée dans 58.8 % des cas. Le nombre moyen de fractures est de 3.5, atteignant un maximum de 9 fractures chez une même patiente.

Intérêt : La scoliose est une déformation de la vertèbre dans les trois plans de l'espace. Elle peut être confondue avec une fracture vertébrale (diagnostic différentiel).

g. Classe d'âge et présence de fracture vertébrale

TABLEAU 9: CLASSE D'ÂGE ET EXISTENCE DE FRACTURE VERTÉBRALE

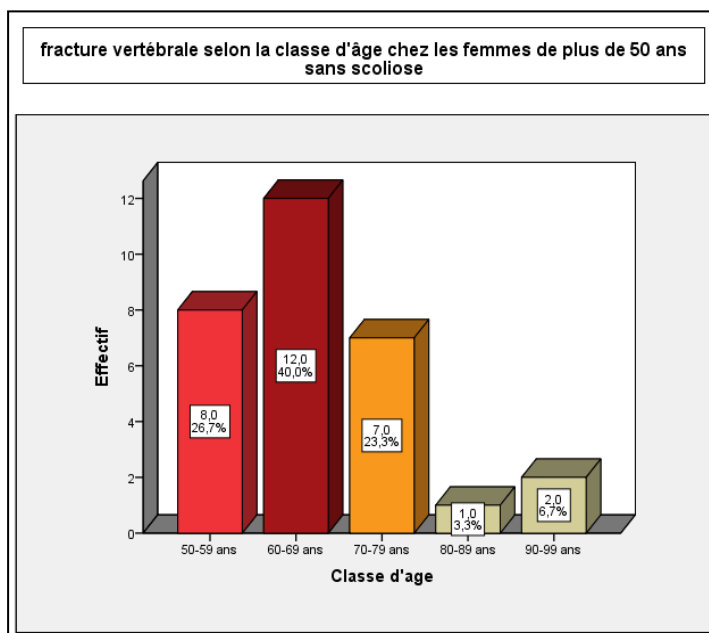
		Existence d'une fracture vertébrale	Total
		oui	
Classe d'age	50-59 ans	8	8
	60-69 ans	12	12
	70-79 ans	7	7
	80-89 ans	1	1
	90-99 ans	2	2
Total		30	30

TABLEAU 9' : CORRÉLATION NOMBRE DE FRACTURE ET CLASSE D'ÂGE.

		Nombre de fractures	Classe d'âge
Rho de Spearman	Coef de corrélation	1,000	0,381*
	Sig. (bilatérale)	.	0,038
	N	30	30
	Coef de corrélation	0,381*	1,000
	Sig. (bilatérale)	0,038	.
	N	30	30

*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

Diag. 9



Interprétation

La classe d'âge la plus touchée par la fracture vertébrale est la classe 60-69 ans. 40% des fractures vertébrales y sont retrouvées.

La recherche d'une relation entre le nombre de fractures et la classe d'âge par la corrélation de Spearman ($r = 0.381$ et $p < 0.05$) indique qu'il n'y a pas d'indépendance des variables, il existe un lien significatif entre le nombre de fractures et la classe d'âge de la patiente.

Intérêt : Plus une patiente est âgée, plus elle présente un nombre élevé de fractures vertébrales.

h. Siège de la fracture vertébrale

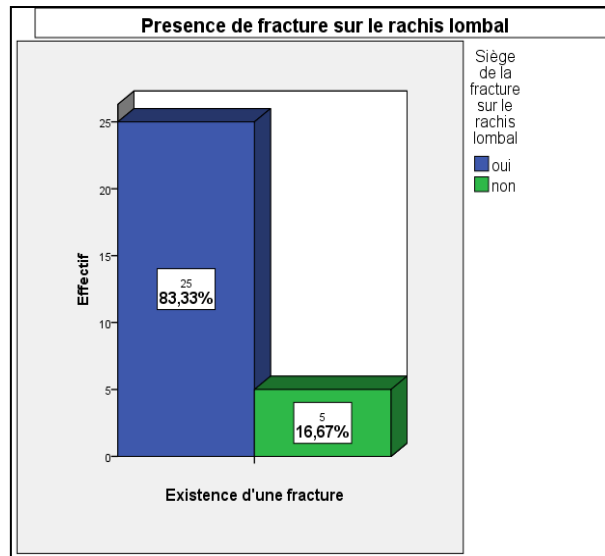
TABLEAU 10 : SIÈGE DE LA FRACTURE SUR LE RACHIS THORACIQUE.				
		Existence d'une fracture vertébrale		Total
		oui		
Siège thoracique	oui	18		18
	non	12		12
Total		30		30

TABLEAU 11 : SIÈGE DE LA FRACTURE SUR LE RACHIS LOMBAL				
		Existence d'une fracture vertébrale		Total
		oui		
Siège de la fracture sur le rachis lombal		oui	25	25
		non	5	5
Total		30		30

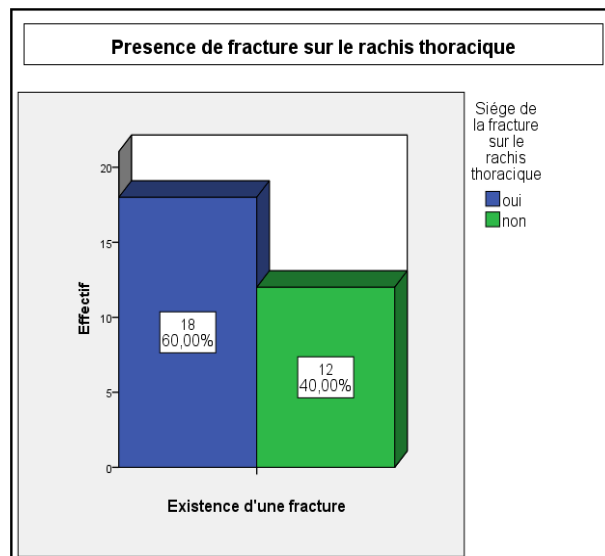
TABLEAU 12 : SIÈGE DE LA FRACTURE SUR LE RACHIS THORACIQUE ET LOMBAL				
		Siège de la fracture sur le rachis lombal		Total
		oui	non	
Siège de la fracture sur le rachis thoracique	oui	13	5	18
	non	12	0	12
Total		25	5	30

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS

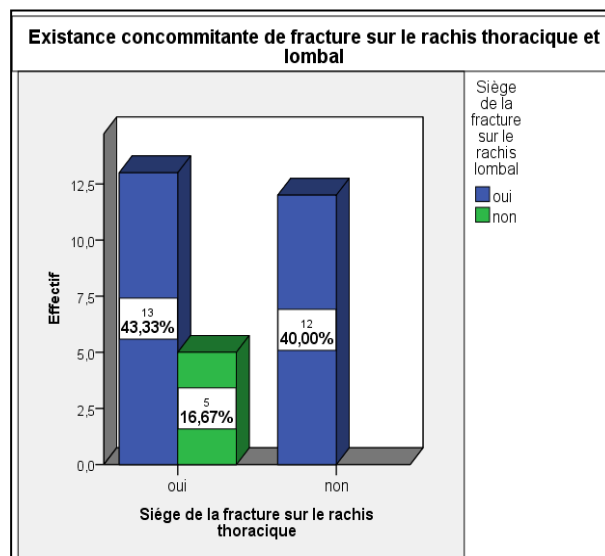
Diag. 10



Diag. 11



Diag. 12



Interprétation

Les fractures lombales sont présentes dans 83.3% des cas, les fractures thoraciques dans 60% des cas. Les fractures siègent aussi bien sur le rachis thoracique, que sur le rachis lombal, on constate néanmoins une nette prédominance lombale. Une existence concomitante sur les deux segments rachidiens est retrouvée dans 43.3% des cas.

Intérêt :

Le rachis lombal est le segment rachidien à privilégier lors de la recherche de FVO.

i. Nombre de fractures par patiente

TABLEAU 13 :											
CLASSE D'AGE ET NOMBRE DE FRACTURE VERTÉBRALE D'UNE PATIENTE											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Classe d'âge	50-59 ans	2	3	2	1	0	0	0	0	0	8
	60-69 ans	2	1	3	3	2	1	0	0	0	12
	70-79 ans	1	1	2	1	0	0	1	1	0	7
	80-89 ans	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	90-99 ans	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Total		5	6	7	5	2	1	1	2	1	30

Interprétation :

La patiente la plus âgée a le plus grand nombre de fractures.

La corrélation de Pearson est significative et positive, plus les patientes avancent en âge, plus elles présentent de FVO.

Intérêt :

Les patientes très avancées en âge présentent des FVO multiples pouvant entraîner des déformations rachidiennes de type cyphotique.

j. Nombre de fracture selon la vertèbre

TABLEAU 14 : NOMBRE DE FRACTURE PAR NIVEAU VERTÉBRAL		
	N	Somme
Fracture T1	30	0
Fracture T2	30	0
Fracture T3	30	0
Fracture T4	30	1
Fracture T5	30	2
Fracture T6	30	3
Fracture T7	30	6
Fracture T8	30	5
Fracture T9	30	3
Fracture T10	30	6
Fracture T11	30	8
Fracture T12	30	7
Fracture L1	30	10
Fracture L2	30	10
Fracture L3	30	11
Fracture L4	30	15
Fracture L5	30	16
N valide	30	

Interprétation

Les fractures vertébrales apparaissent à partir de T4. Leur nombre croit progressivement jusqu'à L5, cette vertèbre est fracturée dans 53.3 % des cas, les vertèbres T1, T2 et T3 ne sont pas atteintes. T7 située au sommet de la cyphose thoracique l'est dans 20 % des cas.

Intérêt :

. La vertèbre L5 est la plus concernée par la fracture vertébrale ostéoporotique, une exploration précise de cette vertèbre est essentielle lors d'examen d'imagerie.

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS

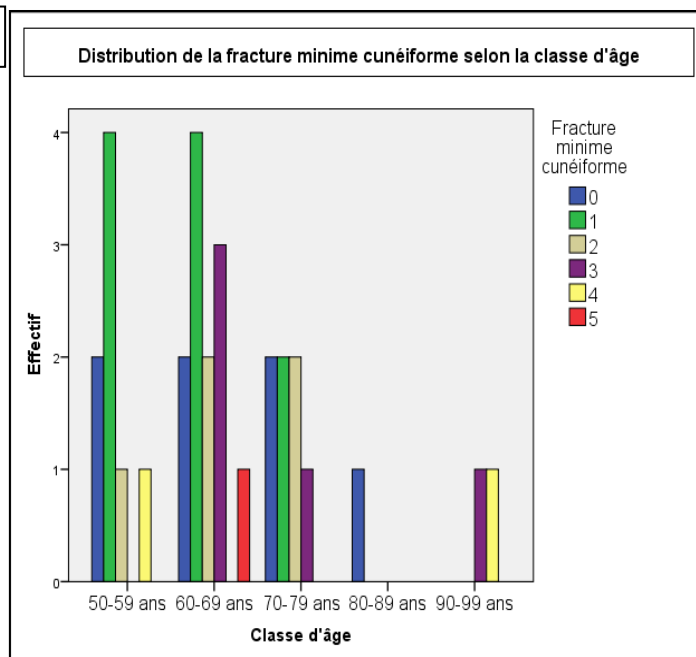
k. Nombre de fracture par grade

TABLEAU 15 : TYPES FRACTURAIRES		
	N	Somme
Fracture minime cunéiforme	30	48
Fracture minime biconcave	30	25
Fracture minime en galette	30	9
Fracture modérée cunéiforme	30	5
Fracture modérée biconcave	30	9
Fracture modérée en galette	30	5
fracture sévère cunéiforme	30	2
fracture sévère biconcave	30	1
Fracture sévère en galette	30	0
N valide (listwise)	30	

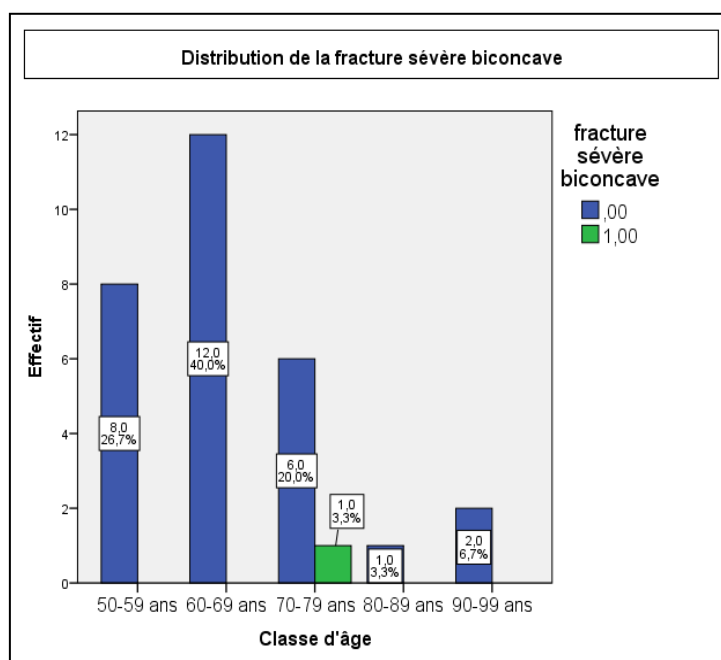
TABLEAU 16 : CLASSE D'ÂGE ET FRACTURE MINIME CUNÉIFORME							
	Fracture minime cunéiforme						Total
	0	1	2	3	4	5	
Classe d'âge 50-59 ans	2	4	1	0	1	0	8
60-69 ans	2	4	2	3	0	1	12
70-79 ans	2	2	2	1	0	0	7
80-89 ans	1	0	0	0	0	0	1
90-99 ans	0	0	0	1	1	0	2
Total	7	10	5	5	2	1	30

TABLEAU 17 : CLASSE D'ÂGE ET FRACTURE SÉVÈRE BICONCAVE				
		fracture sévère biconcave		Total
		,00	1,00	
Classe d'âge	50-59 ans	8	0	8
	60-69 ans	12	0	12
	70-79 ans	6	1	7
	80-89 ans	1	0	1
	90-99 ans	2	0	2
Total		29	1	30

Diag. 13



Diag. 14



Interprétation :

- Sur un total de 510 vertèbres explorées chez la femme âgée de plus de 50 ans sans scoliose, 48 vertèbres présentent une fracture minime cunéiforme soit 9.4%.
- Ces fractures sont plus élevées dans les classes d'âge 50-59 ans et 60-69 ans.
- 10 patientes présentent une seule fracture minime cunéiforme.
- Une seule patiente totalise 5 fractures minimales cunéiformes.

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS

- Les fractures sévères ne sont pas fréquentes dans notre étude, nous n'avons pas pu établir de relation positive et significative entre la classe d'âge et la sévérité des fractures. Le nombre de patientes dans les classes d'âge les plus reculés étant faible.

Intérêt :

Une attention particulière doit être accordée à l'exploration des rachis des patientes entre 50 et 69 ans, les fractures minimales ne doivent pas être sous diagnostiquées

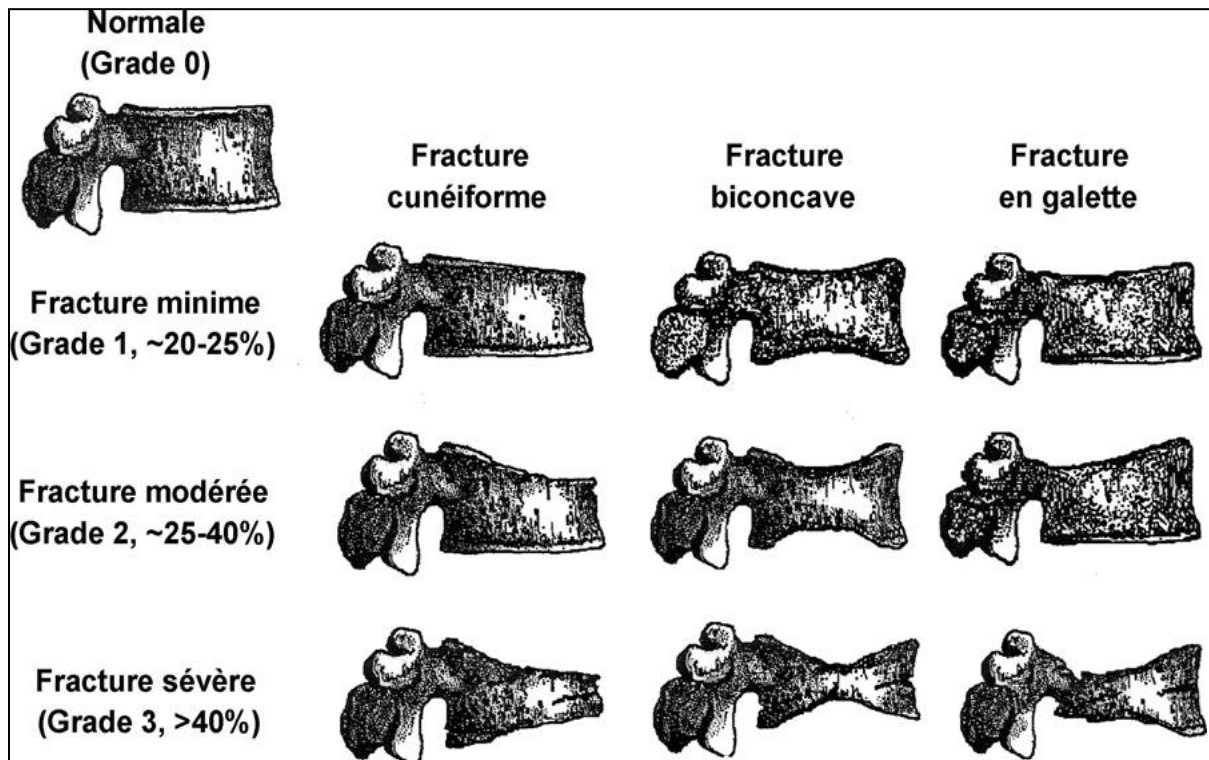


Figure 50: Atlas morphologique de Genant [171].

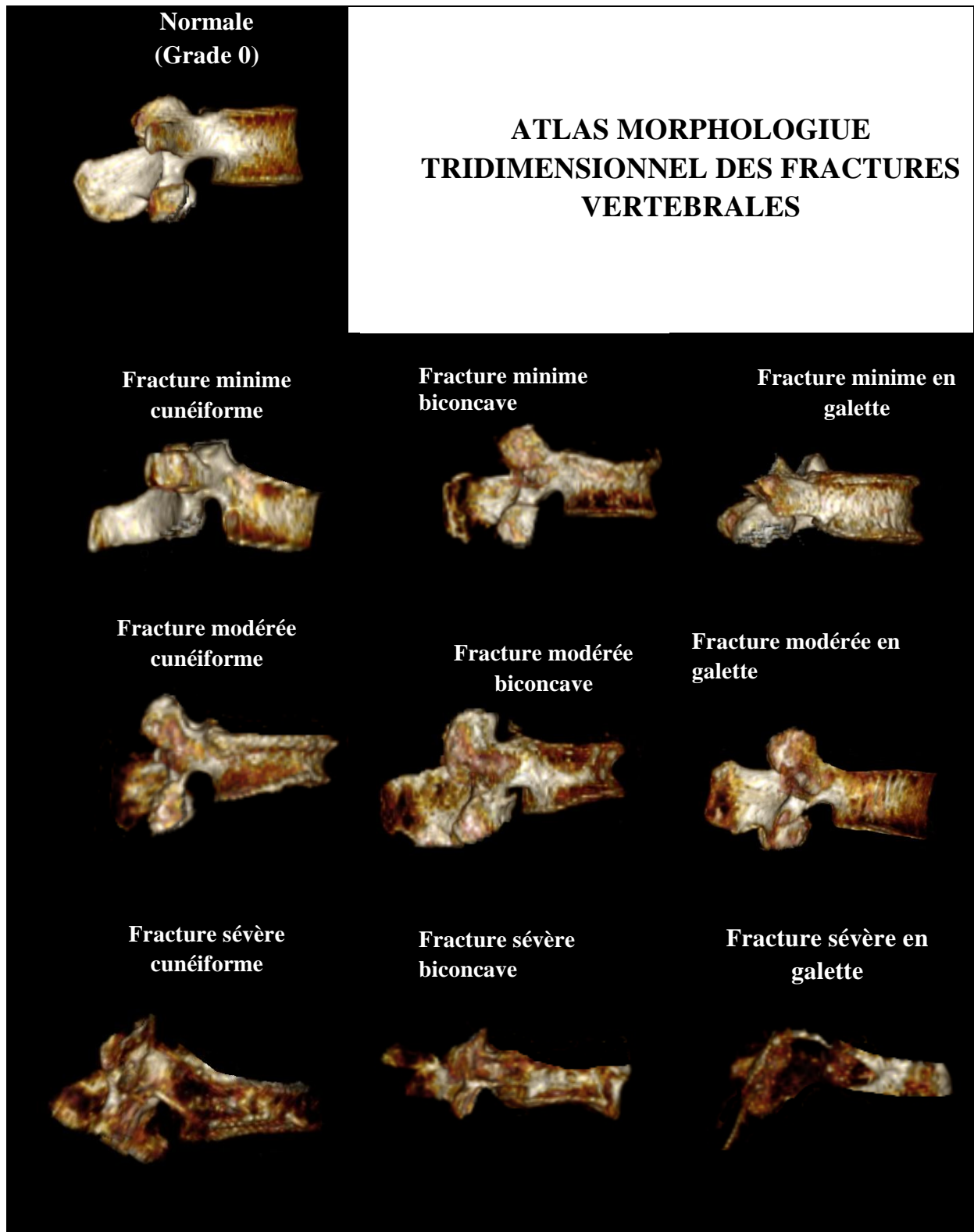


Photo 61 : Atlas morphologique 3D des fractures vertébrales ostéoporotiques.

3. Contribution à la création de la base de données normatives nationales des hauteurs vertébrales.

3-1. Objectif :

Création d'une base de données des hauteurs vertébrales.

3-2. Matériel et méthodes :

On mesure les hauteurs vertébrales antérieures HA, moyennes HM et postérieures HP sur les examens TDM-TAP de 41 patientes non ménopausées.

La fiabilité de la méthode de mesure des hauteurs vertébrales est évaluée par le score Alpha de Cronbach $\alpha = 0.992$, la reproductibilité intra – observateur par le coefficient intra classe (ICC = 0.998, $p < 0.005$). Pour la reproductibilité inter-observateur, un test de corrélation tau b de kendall ($\tau = 0.907$, $p < 0.000$).

Les coefficients de variation pour H_A, H_M, H_P sont respectivement de 1.33%, 0.84%, 1.65%.

3-3. Résultats

Les hauteurs vertébrales antérieures, moyennes, postérieures et les écarts types de l'échantillon sont résumés dans le tableau 19. Les ratios et les écarts types dans le tableau 19.

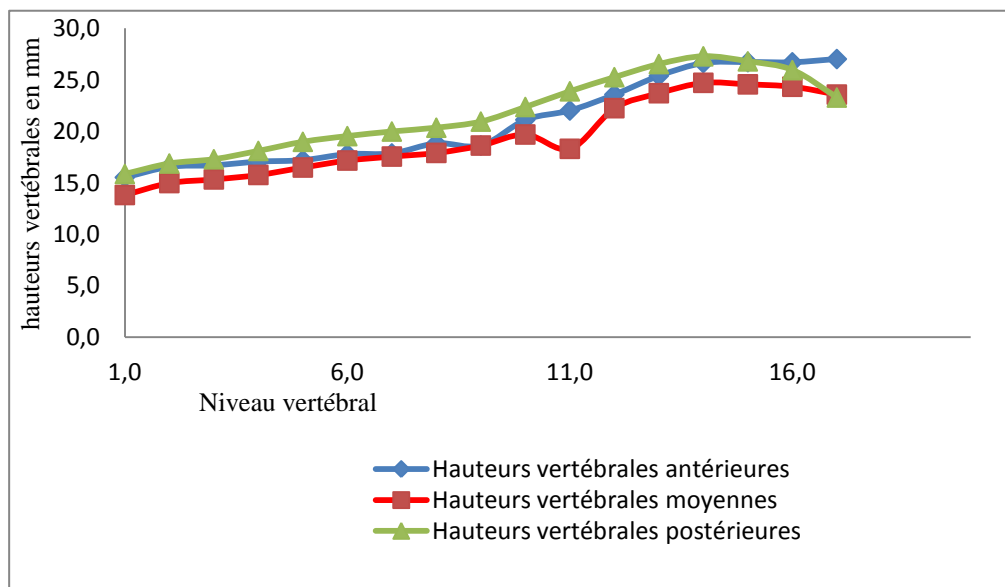
	HA	± ET	HM	± ET	HP	± ET
T1	15,5	0,9	13,8	1,1	15,9	1,2
T2	16,5	1,1	15,0	1,0	16,9	0,9
T3	16,7	1,2	15,3	1,3	17,3	1,2
T4	17,1	1,2	15,8	1,0	18,1	1,2
T5	17,2	1,3	16,5	1,2	19,0	1,4
T6	17,8	1,9	17,2	1,6	19,5	1,9
T7	17,9	1,5	17,6	1,4	20,0	1,4
T8	18,8	1,4	17,9	1,4	20,4	1,5
T9	18,6	1,6	18,6	1,3	20,9	1,4
T10	21,1	1,6	19,7	1,1	22,4	1,6
T11	22,0	1,6	18,3	1,4	23,9	1,9
T12	23,6	1,8	22,3	1,7	25,3	1,8
L1	25,4	1,8	23,7	1,6	26,5	1,6
L2	26,6	1,8	24,7	1,3	27,3	1,5
L3	26,7	1,8	24,6	1,5	26,8	2,0
L4	26,7	2,0	24,3	1,7	25,9	2,1
L5	27,0	1,9	23,6	2,0	23,3	2,1

Tableau 18 : Hauteurs vertébrales normatives, en mm et leur écart-type.

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS

	$H_A/H_P \pm ET$		$H_M/H_P \pm ET$		$H_P/HP_{+1} \pm ET$		$H_P/HP_{-1} \pm ET$	
T1	98	5,7	87,2	4,3	94,2	6,7		
T2	98,2	5,3	88,8	4,9	88,8	7,1	107	8,2
T3	96,4	6,4	88,6	6,8	95,7	5,2	103	7,1
T4	94,4	6,6	87	3,8	95,7	5,2	105	5,9
T5	91,3	7,6	87	5,2	87	7,9	105	7,2
T6	91,4	4,5	88,1	4,5	98,1	9,5	103	10
T7	89,7	6,1	88	5,2	98,3	6,9	103	8,4
T8	92,9	5,6	88	5,2	97,1	5,7	102	7,6
T9	94,5	6,4	89,2	6,2	94,5	5,8	103	6,1
T10	95,1	5,7	88,6	5,6	93,8	6,1	106	6,5
T11	92,5	7,4	89,5	5,6	94,5	5,2	107	6,7
T12	93,4	5,8	88,2	4,7	95,5	5	106	5,8
L1	95,8	5,4	89,5	5,6	97,3	3,6	105	5,4
L2	97,7	5,1	90,6	2,9	102	5,3	100	7,4
L3	100	7,4	91,9	5,3	104	7,4	98,2	5
L4	103	7,0	94,1	6,2	112	6,5	96,8	7,4
L5	117	10,0	102	8,8			89,3	4,6

Tableau 19 : Ratios et écarts types des hauteurs vertébrales normatives.



Graphique 1 : Évolution des hauteurs vertébrales antérieures, moyennes et postérieures de T1 à L5 (17 vertèbres au total).

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS

– Comparaison à d'autres bases de données de hauteurs vertébrales

Vertèbre	H _A (mm)	H _A Alg	Dif	H _{pM} (mm)	H _M Alg	Dif	H _p (mm)	H _p Alg	Dif
T4	24.7	17,1	7,6	24.9	15,8	9,9	25.7	18,1	7,6
T5	25.5	17,2	8,3	25.6	16,5	9,3	25.8	19,0	6,8
T6	26.1	17,8	8,3	26.3	17,2	9,4	26.6	19,5	7,1
T7	26.3	17,9	8,4	27.1	17,6	9,6	27.2	20,0	7,2
T8	26.7	18,8	7,9	27.2	17,9	9,4	27.3	20,4	6,9
T9	27.3	18,6	8,7	27.3	18,6	9	27.6	20,9	6,7
T10	28.2	21,1	7,1	28.4	19,7	9	28.7	22,4	6,3
T11	29.8	22,0	7,9	30.1	18,3	11,9	30.2	23,9	6,3
T12	31.1	23,6	7,5	31.3	22,3	9,9	32.2	25,3	6,9
L1	33.1	25,4	7,7	33.2	23,7	9,6	33.3	26,5	6,8
L2	34.7	26,6	8,1	34.7	24,7	10,1	34.8	27,3	7,5
L3	35.5	26,7	8,8	35.3	24,6	10,7	35.3	26,8	8,5
L4	35.3	26,7	8,6	34.8	24,3	10	34.3	25,9	8,4
L5	35.3	27,0	8,3	33.3	23,6	8,9	32.5	23,3	9,2
Moy			8,1			9,8			7,3
ET			0,5			0,8			0,9

Tableau 20 : Comparaison aux hauteurs vertébrales de Diacinti et al (187).

	HA Gao	HA Alg	Diff	HM Gao	HM Alg	Diff	HP Gao	HP Alg	Diff
T4	20,1	15,8	4,3	19,3	15,8	3,5	21,1	18,1	3,0
T5	20,4	16,5	3,9	19,4	16,5	2,9	21,8	19,0	2,8
T6	20,9	17,2	3,7	20	17,2	2,8	22,6	19,5	3,1
T7	21,1	17,6	3,6	20,3	17,6	2,8	23	20,0	3,0
T8	21,7	17,9	3,8	20,6	17,9	2,7	23,3	20,4	3,0
T9	23,1	18,6	4,5	21,5	18,6	2,9	24,2	20,9	3,3
T10	24,5	19,7	4,8	23,2	19,7	3,5	25,7	22,4	3,3
T11	25,7	18,3	7,4	24,8	18,3	6,5	27,7	23,9	3,8
T12	27,9	22,3	5,7	27,7	22,3	5,5	30	25,3	4,7
L1	29,8	23,7	6,1	29,6	23,7	5,9	31,6	26,5	5,1
L2	31,7	24,7	7,0	30,6	24,7	5,9	27,3	27,3	0,0
L3	32,7	24,6	8,1	31,4	24,6	6,8	33,1	26,8	6,3
L4	32,4	24,3	8,1	30,2	24,3	5,9	31,4	25,9	5,5
L5	32	23,6	8,4	29	23,6	5,4	29,5	23,3	6,2
Moy			5,7			4,5			3,8
ET			1,8			1,6			1,7

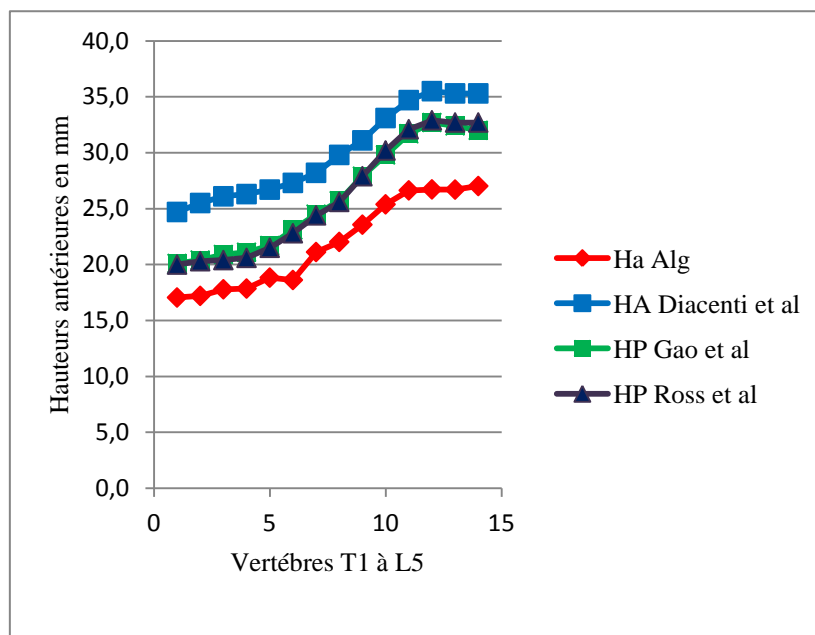
Tableau 21 : Comparaison aux hauteurs vertébrales de Gao et al (191).

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS

	HA	HA	Dif	HP	HP	Dif
	Ross	Alg		Ross	Alg	
T3	19,8	16,7	3,1	21,3	15,3	6,0
T4	20,0	17,1	2,9	21,7	15,8	5,9
T5	20,3	17,2	3,1	22,4	16,5	5,9
T6	20,4	17,8	2,6	23,0	17,2	5,8
T7	20,6	17,9	2,7	23,6	17,6	6,1
T8	21,5	18,8	2,7	23,9	17,9	6,0
T9	22,8	18,6	4,2	24,5	18,6	5,9
T10	24,4	21,1	3,3	26,0	19,7	6,3
T11	25,6	22,0	3,6	28,4	18,3	10,1
T12	27,9	23,6	4,3	31,0	22,3	8,8
L1	30,2	25,4	4,8	33,2	23,7	9,5
L2	32,1	26,6	5,5	33,8	24,7	9,1
L3	32,9	26,7	6,2	33,3	24,6	8,7
L4	32,7	26,7	6,0	31,5	24,3	7,2
L5	32,7	27,0	5,7	29,5	23,6	5,9
Moy			4,0			7,1
E T			1,3			1,6

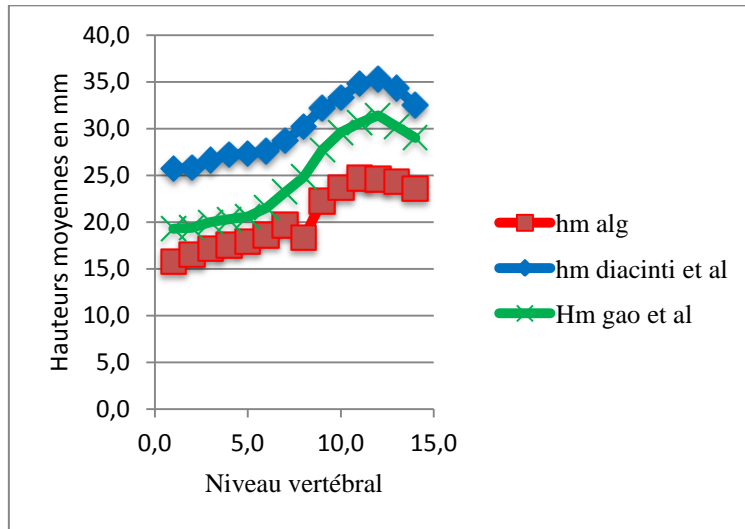
Tableau 22 : Comparaison aux hauteurs vertébrales de Ross et al (177).

– Comparaison graphique des hauteurs vertébrales

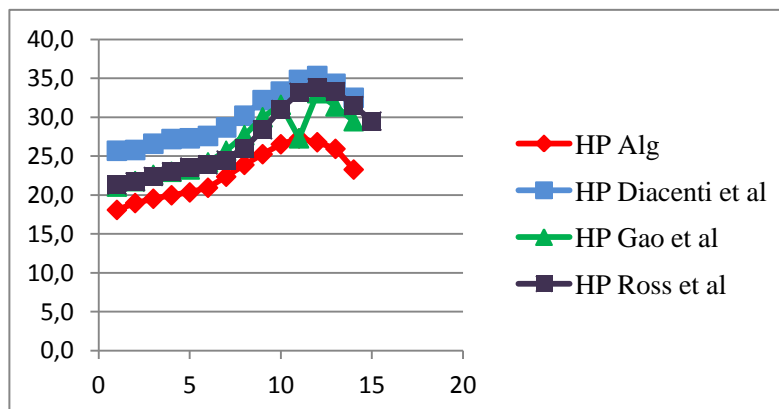


Graphe 2 : Comparaison des hauteurs antérieures.

PARTIE PRATIQUE B : RÉSULTATS



Graphe 03: Comparaison des hauteurs moyennes.



Graphe 04 : Comparaison des hauteurs postérieures.

Interprétation :

Les hauteurs vertébrales (HA, HM, HP) de notre base de données sont toutes inférieures aux hauteurs des autres bases de données.

Intérêt :

Les hauteurs vertébrales sont variables d'une population à l'autre, la création d'une base de données nationale est souhaitable pour générer des données spécifiques à la femme algérienne.

V. DISCUSSION :

1. Étude de la prévalence de la fracture vertébrale et création de l'atlas 3 D

L'augmentation de l'espérance de vie entraîne une augmentation du nombre de personnes âgées, ce phénomène démographique devrait s'accompagner dans les années à venir d'une hausse du nombre de fractures ostéoporotiques ayant pour corollaire une élévation des coûts de santé. La fracture vertébrale est un marqueur de gravité de l'ostéoporose, c'est un excellent indicateur de la santé osseuse, son diagnostic est essentiel puisqu'il suffit d'une seule FV pour être éligible au traitement anti ostéoporotique, évitant ainsi la survenue d'autres fractures.

Reconnaître une FV est parfois difficile, la forme des corps vertébraux n'est pas semblable à tous les étages du rachis et les déformations sont nombreuses et variées.

Sur les modalités d'imagerie 2D le diagnostic de FV s'appuie sur la comparaison des vertèbres fracturées à celle de l'atlas morphologique de Genant.

Notre objectif est de créer un atlas similaire en 3D, utile au diagnostic de ces fractures sur les reconstructions tridimensionnelles.

Pour élaborer l'atlas 3D, nous menons une étude de la prévalence de la FV, sur modalité TDM-TAP, des femmes âgées de plus de 50 ans, adressées pour motif autre que vertébral, au service de radiologie du CHU Nédir Mohamed de Tizi-Ouzou, sur une période de 6 mois. Cette étude nous permet de recueillir l'ensemble des grades et types fracturaires de l'atlas, les reconstruire en 3D et de les colliger dans un fichier numérique.

La validité de l'atlas repose sur l'identification correcte des fractures vertébrales, nous optons pour la méthode semi-quantitative de Genant, largement utilisée en recherche et en épidémiologie pour ce type d'étude. La reproductibilité intra et inter observateur de nos lectures est excellente ($\kappa = 0.859$, $\kappa = 0.931$).

Les données de 61 patientes âgées de 50 ans et plus sont traitées, les corps vertébraux de T1 à L5 sont explorés et évalués soient 1030 vertèbres (7 manquantes). Pour un repérage correct des vertèbres nous procédons à un numérotage basé sur des critères morphologiques (T12 porte les dernières côtes, L3 présente les processus transverses les plus longs). Dans notre groupe, une seule anomalie de nombre est retrouvée, il s'agit d'une vertèbre sacrale surnuméraire (Diagr. 4). Les déformations vertébrales autres qu'ostéoporotiques ne sont pas prises en compte : Nodule de Schmorl, maladie de Scheuermann, FV traumatiques, FV malignes.

Dans notre échantillon 37 patientes soit 60.7% présentent une fracture vertébrale ostéoporotique (Tabl 5, Diagr.5), comparée aux données de la littérature (20-25%) ce pourcentage est très élevé.

L'exploration du profil rachidien des patientes révèle l'existence fréquente d'anomalies notamment de courbures, scoliose et rectitude (Tabl. 6, diag.6). Pour tenter d'expliquer cette forte prévalence, nous avons recherché un lien entre le profil rachidien et l'existence de fractures vertébrales, par une corrélation de Spearman ($r = -0.026$ et $p > 0.05$), celle ci indique l'existence d'une corrélation significative et négative, plus les profils rachidiens sont normaux, moins le nombre de fracture est élevé.

Les vertèbres scoliotiques sont des vertèbres déformées dans les trois plans de l'espace. Elles induisent de faux positifs. La rectitude n'influence pas l'existence de fractures, et les cyphoses sont absentes en absence de fracture (Tabl. 7, Diagr. 7).

Après suppression des rachis scoliotiques, la prévalence des fractures vertébrales ostéoporotiques est de 58.8% (Tabl. 8, Diagr. 8), largement supérieure aux données de la littérature (20-25%). Pour certains auteurs (183) de telles prévalences s'expliquent par les différences ethniques et génétiques des patientes, l'hygiène alimentaire, la pratique d'activité physique, mais aussi par les méthodes de détection et les critères de sélection de FV.

Le nombre moyen de fracture par patiente est de 3.5 (écart type 2.4) avec un maximum de 9 fractures (Tabl. 8'). La classe d'âge la plus fracturée est celle de 60-69 ans, elle totalise 40 % des FV. Cette classe est la plus représentée de notre groupe (Tabl. 9, Diagr. 9) ceci induit un biais. La FV apparait rapidement après 50 ans (début de la ménopause), elle se produit plus tôt que la fracture de hanche; les patientes les plus âgées présentent le plus de FV, le nombre de fractures est corrélé positivement à la classe d'âge ($r= 0.381$ et $p=0.038$) (tabl. 14).

Le rachis lombal est le siège de prédilection des FV, il est touché dans 83.3% des cas, contre 60% pour le rachis thoracique. Les deux segments sont atteints simultanément dans 43.3% des cas (Tabl. 10, 11, Diagr. 10, 11, 12). L'augmentation du nombre de fractures est progressive de T4 à L5. Contrairement à d'autres études nous n'avons pas constaté d'augmentation significative sur la vertèbre T7, ni à la jonction thoraco-lombale.

La vertèbre L5 est la plus souvent fracturée, plus d'une fois sur deux, suivi par L4 puis L3. T1, T2, et T3 ne sont jamais atteintes, la FV débute à partir de T4 (Tabl.14). Dans la littérature T7 et L5 sont les sites de prédilection de ces fractures. Ce phénomène s'explique par la biomécanique ; en cas de fragilité osseuse, plus la charge imposée à une vertèbre augmente plus le risque de fracture est élevé. L5 en position caudale supporte un maximum de contrainte axiale, elle se fracture si les charges dépassent ses capacités structurelles. La mobilité de ce segment rachidien est en outre plus importante.

Concernant la gravité et le type fracturaire, il ressort de notre étude que la fracture minime cunéiforme est la plus fréquente (9.4%), et que la classe d'âge 60 - 69 ans est la plus concernée par ce type fracturaire (Tabl 15 et 16). La classe d'âge n'a pas d'effet sur la forme de la fracture ($r=0.276$, $p>0.05$), pareillement aux résultats de Ismail et al. La fracture la plus sévère de notre série est une fracture sévère biconcave retrouvée une seule fois (Tabl.19). La fracture sévère en galette n'est pas retrouvée dans notre échantillon, nous expliquons cette situation par le fait que le nombre de patientes de l'échantillon, celui de la dernière classe d'âge en particulier, n'est pas suffisamment représenté.

2. Base de données normatives des hauteurs vertébrales

Dans cette étude nous avons mesuré les hauteurs vertébrales H_A , H_M et H_P des corps vertébraux et avons calculé la moyenne, l'écart-type et les ratios H_A/H_P , H_M/H_P , $H_P/H_{P\pm 1}$. Aucun individu du groupe ($n=31$) ne présente de diminution ≤ 3 SD pour l'un des trois ratios, confirmant ainsi l'absence de fractures dans le groupe de femmes sélectionné.

Les mesures vertébrales ont été effectuées sur toutes les vertèbres de T1 à L5, par un seul chercheur, 527 vertèbres au total. La précision des mesures est un facteur déterminant pour la création d'une base de données normative, dans notre étude, les coefficients de variation pour H_A , H_M , H_P sont inférieurs à 2% et témoignent d'un index de répétabilité élevé, et d'une grande précision des mesures.

La fiabilité de la méthode de mesure des hauteurs vertébrales est évaluée par le score Alpha de Cronbach $\alpha = 0.992$,

La reproductibilité intra observateur est jugée par le coefficient de corrélation inter classe, permettant d'évaluer la concordance pour des données continues. La concordance intra observateur est excellente (ICC = 0.998 et $p < 0.005$).

La reproductibilité inter-observateur est évaluée par un test de corrélation tau b de Kendall ($\tau = 0.907$ et $p < 0.000$), il indique une corrélation positive statistiquement significative entre les deux lecteurs.

La morphométrie vertébrale manuelle est une méthode chronophage 62 ± 12 secondes par vertèbre contre 35 ± 10 secondes pour la méthode semi automatique avec le logiciel MorphoXpress, les logiciels de morphométrie sont rapides mais moins précis pour le positionnement des points.

Les valeurs de H_A augmentent progressivement de T1 à L5 (Tabl 7), nous ne retrouvons pas dans notre groupe de valeur minimale de H_A en T7, compatible avec une cunéisation physiologique de cette vertèbre au sommet de la cyphose thoracique.

Les hauteurs postérieures à l'étage thoraciques sont les plus compliquées à mesurer en raison de la présence l'articulation costo-vertébrale. Il apparait toutefois que les valeurs de H_P augmentent également progressivement de T1 jusqu'à L3, où elles sont maximales. Elles diminuent ensuite jusqu'à L5. Sur toutes les vertèbres la hauteur H_P est supérieure à H_A sauf en L5.

La hauteur H_M reste toujours en deçà des autres hauteurs, en T11 sa valeur est très réduite.

La comparaison de nos résultats à d'autres bases de données de hauteurs vertébrales, souligne que les dimensions vertébrales des individus de notre groupe sont en moyennes plus petites que celles présentées par Diacinti et al pour la population féminine italienne (différence de : H_A 8.1 mm \pm 0.5, H_M 9.8 mm \pm 0.8, H_P 7.3 mm \pm 0.9) et que celles de Ross et al pour la population japonaise américaine (H_A 4 mm \pm 1.3, H_P 7.1mm \pm 1.6). Les hauteurs de Gao et al pour la population féminine chinoise sont H_A 5.7 mm \pm 1.8, H_M 4.5mm \pm 1.6, H_P 3.8mm \pm 1.7).

VI. CONCLUSION :

La présence d'une fracture vertébrale prédispose à d'autres fractures, les patientes qui ont une FVO de grade minime ont un risque accru de faire une autre FV à 1 an et celles ayant des FV de grade sévère ont un risque élevé de fractures périphériques. Notre étude montre que la classe d'âge 60-69 ans présente le plus grand pourcentage de FV, de grade minime en général. Un intérêt particulier devrait être accordé au rachis de ces patientes lors d'examen d'imagerie. Traitées, elles ne devraient pas faire d'autres fractures.

Pour la détection de ces fractures sur les reconstructions 3 D, nous proposons un atlas 3 D analogue à celui de Genant, le grade le plus sévère n'ayant pu être retrouvé, notre atlas présente donc une insuffisance que nous proposons de combler par une recherche systématique de ce grade fracturaire sur d'autres TDM-TAP.

La base de données normative atteste de l'existence de différences des hauteurs vertébrales selon l'origine de la population. Les valeurs de notre échantillon sont toutes inférieures à celles de la littérature. Elle confirme que les hauteurs vertébrales H_A , H_M et H_P augmentent progressivement de haut en bas et que les dimensions des corps vertébraux à l'étage lombal sont supérieures à celles de l'étage thoracique. Géométrie, dimensions vertébrales et densité minérale osseuse reflètent la robustesse de l'os et sa capacité à résister aux charges. Les vertèbres lombales subissent de plus grandes contraintes mécaniques: forces axiales compressives plus élevées, forces de tractions latérales exercées par le muscle psoas et l'effet de la pression intra-abdominale. Les vertèbres thoraciques sont moins hautes et moins massives car moins sollicitées, presque immobiles en raison de leur liaison à la cage thoracique.

La cunéisation antérieure de T7 et postérieure de L3 ne sont pas mis en évidence dans notre étude. Il semblerait que les courbures rachidiennes soient déterminées par d'autres facteurs et notamment la morphologie et les dimensions des disques intervertébraux. La TDM-TAP offre une excellente visualisation des corps vertébraux autorisant un positionnement précis des six points, contrairement aux autres examens gênés par la superposition des scapula.

PARTIE PRATIQUE C

MORPHOMÉTRIE TRIDIMENSIONNELLE

Le dernier volet de la partie pratique est réalisé sous forme d'un poster présenté au premier congrès maghrébin d'anatomie clinique, intitulé : L'étude de répétabilité, reproductibilité et concordance de la biométrie 3D versus 2D

I. INTRODUCTION.

La troisième partie pratique de cette thèse a pour but d'estimer le potentiel morphométrique de la technologie tridimensionnelle et d'apprécier sa capacité à fournir des mensurations valides pour l'évaluation de structures anatomiques.

II. OBJECTIF.

Réaliser des mesures de hauteurs vertébrales H_A , H_M et H_P sur modèle 3D de la vertèbre L1, afin d'évaluer la validité de ce type de mensurations.

III. MATÉRIEL ET MÉTHODES.

Sur un ordinateur Apple, à l'aide du logiciel Osirix et d'une tablette graphique Wacom, 20 examens TDM- TAP sont utilisés pour reconstruire la vertèbre L1 dans le plan sagittal et mesurer, sur la vue latérale gauche les hauteurs vertébrales antérieure, moyenne et postérieure (H_A , H_M , H_P). Dans un deuxième temps une reconstruction 3D de L1 est réalisée, les mêmes mesures sont effectuées, par un seul chercheur. La répétabilité par l'alpha de Cronbach, la reproductibilité intra observateur et inter observateur par les coefficients intra-classe (ICC). La concordance des séries de mesure est évaluée graphiquement par la méthode de Bland et Altman (185).

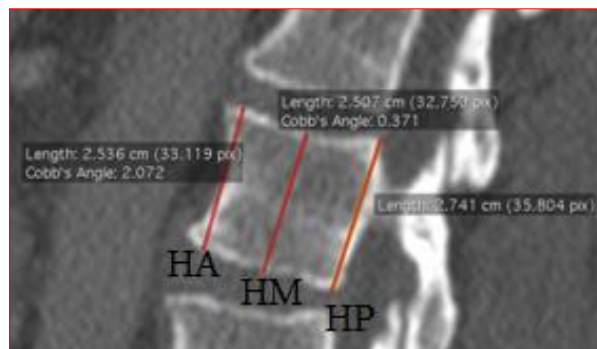


Photo 24: hauteurs vertébrales sur image 2D.

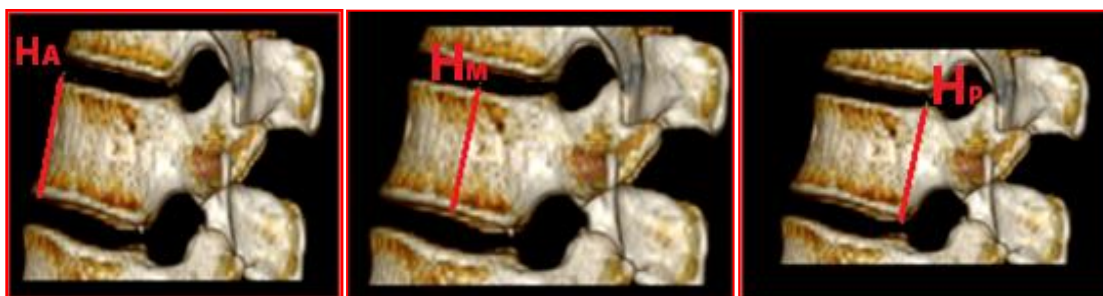


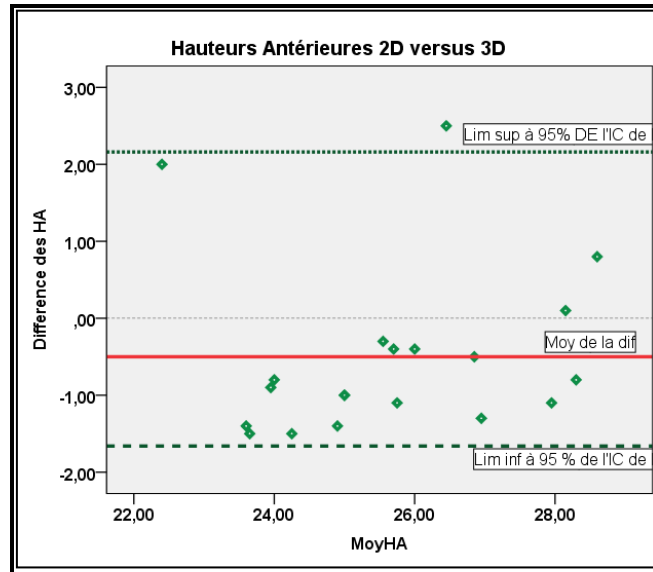
Photo 62 : Mesures sur modèle 3 D.

IV. RÉSULTATS :

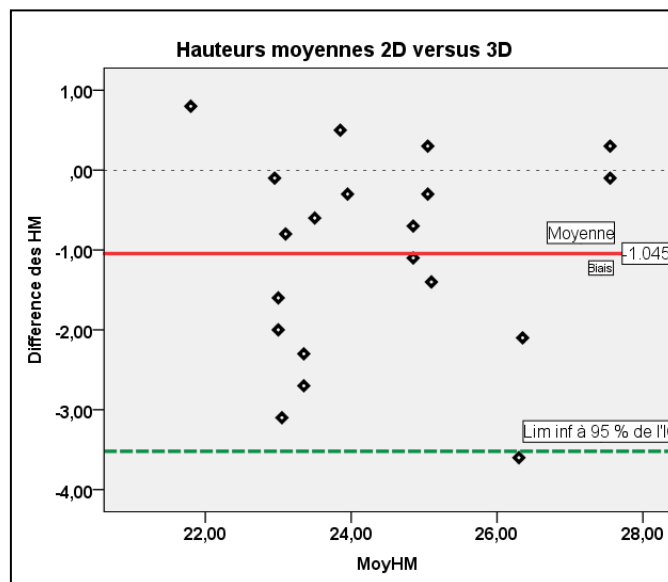
La fiabilité de la méthode de mesure 3D, est évaluée par le test alpha de Cronbach pour H_A , H_M et H_P , avec respectivement $\alpha = 0.990$; $\alpha=0.986$ et $\alpha=0.965$.

L'ICC pour la reproductibilité intra observateur est pour H_A , H_M et H_P respectivement de 0.980, 0.973 et 0.932 ($p<0.05$). La reproductibilité inter observateur ICC : 0.992, 0.808 et 0.973 ($p<0.05$).

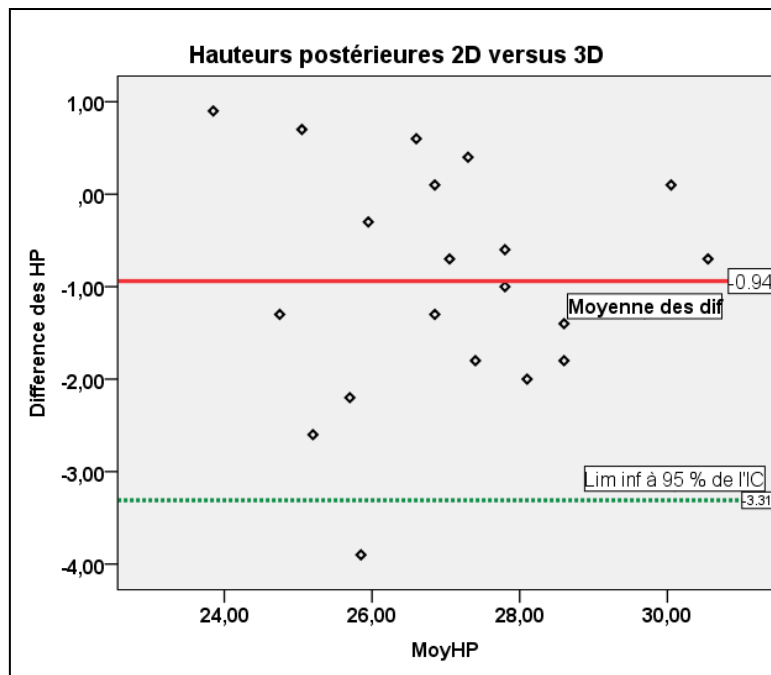
Les graphes de Bland et Altman objectivent une dispersion des données, avec 95 % des valeurs comprises entre la limite supérieure et inférieure.



Graph 05: Graphe de Bland Altman pour les hauteurs antérieures.



Graph 06: Graphe de Bland Altman pour les hauteurs moyennes.



Graphe 07: Graphe de Bland Altman pour les hauteurs postérieures.

V. DISCUSSION

La méthode de mesure des hauteurs H_A , H_M et H_P sur modèle 3D présente une bonne fiabilité ($\alpha > 0.7$), une bonne reproductibilité intra et inter-observateur, excellente pour H_A sur la base d'un intervalle de confiance à 95 %. Les graphiques de Bland et Altman pour H_A , H_M et H_P montrent que les écarts ne dépassent pas les limites de l'intervalle de confiance à 95 %.

VI. CONCLUSION

Les résultats statistiques obtenus pour l'étude de la répétabilité, reproductibilité et concordance des mesures sur modèle 3D versus 2D permettent de considérer que la biométrie sur reconstruction tridimensionnelle est une technique de mesure valide, particulièrement en morphométrie vertébrale, à condition de respecter rigoureusement les repères anatomiques de la structure. De nouvelles voies de recherche s'ouvrent en anatomie à savoir la conception de prothèse individualisée par impression 3D.

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

La base de données des hauteurs vertébrales que nous avons établie est une contribution pour la création d'une base de données nationales des dimensions vertébrales. D'autres paramètres devraient cependant être ajoutés, notamment :

- le diamètre antéropostérieur et transversal du corps vertébral ;
- la hauteur, la largeur et la valeur angulaire du pédicule ;
- les diamètres du foramen vertébral (transversal et antéropostérieur).

Nous recommandons de recueillir au préalable les paramètres anthropométriques des patientes afin de corréler ces dimensions à l'âge et à la stature (intérêt en médecine légale).

Lors de la création du modèle 3 D du rachis thoracique des perspectives se sont révélées :

- Finir la segmentation de VHP (base de données haute résolution) pour reconstruire un modèle 3 D complet du corps humain expertisé par des anatomistes.
- Créer une équipe multidisciplinaire regroupant anatomistes, informaticiens, infographistes, biomécaniciens pour la création d'un modèle mobile utile à l'anatomie fonctionnelle.
- La réalisation d'une application d'anatomie 3 D pour Smartphone adressée aux étudiants en sciences de santé.
- La formation de nos équipes au printing 3 D pour la conception de maquettes physiques 3D des organes, l'acquisition d'imprimante 3D dans nos laboratoires présente un intérêt indéniable pour la formation des résidents en anatomie générale et de chirurgie (186).

CONCLUSION GÉNÉRALE

La massification de l'université et le nombre sans cesse croissant d'étudiants en médecine place la tutelle devant le problème de la prise en charge pédagogique, respectueuse des normes internationales.

En anatomie, la diminution des enseignants spécialisés et la disparition de la dissection cadavérique est un challenge à relever. Dans ce contexte, l'utilisation des technologies de l'information et de la communication pour l'enseignement, est la voie à privilégier pour faire face à ce défi.

Par l'introduction de l'anatomie numérique et la modélisation tridimensionnelle nous espérons offrir de nouvelles ressources d'enseignement. La démocratisation du micro-ordinateur, des Smartphones, du réseau internet et de la 4G, facilite l'acquisition des connaissances et sa diffusion, nos étudiants nés dans un monde digital sont très réceptifs à cette technologie. Notre travail consistait dans un premier temps à faire une revue de la littérature de l'anatomie du rachis thoracique dans le but d'en présenter une description détaillée et actualisée. Par l'introduction de l'anatomie numérique et la modélisation tridimensionnelle nous espérons offrir de nouvelles ressources d'enseignement. Pour le rendre plus attractif nous avons complété cette reconstruction en ajoutant d'autres éléments de la cage thoracique. À l'instar d'une dissection le modèle est réaliste, manipulable dans les trois plans de l'espace, dissécable plan par plan par la mise en jeu du mode transparent. Nous pouvons créer des animations commentées et légendées du modèle.

La technologie 3D occupe également une place de plus en plus importante en clinique, et notamment en radiologie et en chirurgie. Nous avons choisi pour cette thèse de réaliser un atlas morphologique 3 D des fractures vertébrales ostéoporotiques d'aide au diagnostic, il permet de reconnaître sur un rachis reconstruit en 3 D, une fracture vertébrale ostéoporotique. Nous avons enfin, exploré la validité de la morphométrie tridimensionnelle par une étude statistique de comparaison de mesures 3D versus 2D, elle nous permet d'accepter cette technique pour l'exploration des organes, à condition de respecter les repères anatomiques conventionnels. Rappelons que les images des examens radiologiques sont une « matière première » précieuse en anatomie, elles fournissent un nombre incommensurable de données anatomiques dont l'exploitation et la valorisation par des logiciels dédiés font rentrer l'anatomie humaine dans une nouvelle ère.

BIBLIOGRAPHIE

1. Scaal M. Early development of the vertebral column. *Semin Cell Dev Biol.* 2016;49:83-91.
2. Grimme JD CM. Congenital anomalies of the spine. *Neuroimaging Clin N Am.* 2007;17(1):1-16.
3. David G HP. Embryogénèse: étapes initiales du développement. *Embryologie travaux pratiques et enseignement dirigé.* 3^e éd. Masson, éditeur. 1975.
4. Testut L. *Traité d'anatomie humaine. Appareil de la digestion, appareil uro-génital, embryologie.* Doin. vol 4; 1905. p 901.
5. Poirier J, Poirier I BJ. *Embryologie humaine.* Maloine. 1993. p. 233.
6. Cramer DC et al. *Clinical Anatomy of the Spine, Spinal Cord, and ANS.* third. Mosby; 2013. p 84, 541-265.
7. Duband JL. la segmentation du mésoderme des vertébrés. *Médecine/science.* 2005;9:791-9.
8. Larsen W. *Embryologie humaine.* De Boeck, éditeur. 2003. p 68.
9. Gernignon T. *Embryologie générale Humaine.* OPU-Alger.
10. Pazzaglia UE, Salisbury JR, Byers PD. Development and involution of the notochord in the human spine. *J R Soc Med.* 1989;82:413-5.
11. Tuchmann-Duplessis H HP. *Embryologie - Organogénèse.* masson. 1970. p 6.
12. Denetclaw WF, Ordahl CP. The growth of the dermomyotome and formation of early myotome lineages in thoracolumbar somites of chicken embryos. *Development.* févr 2000;127(4):893-905.
13. Shih HP, Gross MK, Kioussi C. Muscle development: Forming the head and trunk muscles. Vol. 110, *Acta Histochemica.* Urban & Fischer; 2008. p. 97-108.
14. Sadler TW. *Langman Medical Embryology.* 12^e éd. William & Wilkins, éditeur. 2012. 143-150 .
15. LR C. *Atlas d'embryologie humaine de Netter.* Masson. 2012. p 145.
16. Chapon F, Pineau S, JJ-L et al. Malformation congénitale du rachis. In: *EMC - Radiologie et imagerie médicale.* Elsevier Masson SAS; 2011.
17. Bagnall KM, Harris PF, Jones PR. A radiographic study of the human fetal spine. 2. The sequence of development of ossification centres in the vertebral column. *J Anat.* déc 1977;124(Pt 3):791-802.

18. Skórczewska A, Grzymisławska M, Bruska M, Lupicka J, Woźniak W. Ossification of the vertebral column in human foetuses: histological and computed tomography studies. *Folia Morphol (Warsz)*. 2013;72(3):230-8.
19. Vital JM, Beguiristain JL, Algara C, Villas C, Lavignolle B, Grenier N, et al. The neurocentral vertebral cartilage: Anatomy, physiology and physiopathology. *Surg Radiol Anat*. déc 1989;11(4):323-8.
20. Louis R. *Surgery of the Spine : Surgical Anatomy and Operative Approaches*. Springer Berlin Heidelberg; 1983. p 4-46.
21. Dias MS. Normal and abnormal development of the spine. *Neurosurg Clin N Am*. 2007;18:415-29.
22. Bollini G et Jouve JL. Malformation congénitale du rachis. In: *EMC appareil locomoteur*. Elsevier SAS Paris; 2000. p. 18.
23. Merzoug V, Husson B, Adamsbaum C. Les malformations du rachis de l'enfant. In: *presentation ppt en ligne*. p. consulté en ligne.
24. Bollini G. Malformations congénitales du rachis. 2013;(353213):1-18.
25. Adamsbaum C., Merzoug V., Hamidou A. et al. Malformations congénitales du rachis. In: *EMC*. Elsevier Masson SAS; 2001. p. 10.
26. Chaturvedi A, Klionsky NB, Nadarajah U, Chaturvedi A, Meyers SP. Malformed vertebrae: a clinical and imaging review. *Insights Imaging*. 2018;9(3):343-55.
27. Johal J, Loukas M, Fisahn C, Chapman JR, Oskouian RJ, Tubbs RS. Hemivertebrae: a comprehensive review of embryology, imaging, classification, and management. *Child's Nerv Syst*. 2016;32(11):2105-9.
28. Manh L, Chateil B. Troubles de la statique rachidienne dans le plan sagittal chez le sujet jeune. 2002;(353213).
29. Brunet C. Anatomie de la traversée cervico-thoraco-brachiale. *Rev Méd Int*. 1999;suppl(5):453-63.
30. Thawait GK, Chhabra A, Carrino JA. Spine Segmentation and Enumeration and Normal Variants. *Radiol Clin North Am*. 2012;50(4):587-98.
31. Menger RP, Notarianni C. Klippel Feil Syndrome. *StatPearls*. 2018.
32. Dede O, Büyükdoğan K, Demirkıran HG, Akpınar E, Yazıcı M. Thoracic Spine Growth Revisited. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42(12):917-20.

33. Dimeglio A, Canavese F. The growing spine: how spinal deformities influence normal spine and thoracic cage growth. *Eur spine J.* janv 2012;21(1):64-70.
34. Gray DJ, O'Rahilly R GE. Anatomie. OPU Alger, éditeur. 1979. p. 483.
35. Bonnel F, Privat JM KP. La colonne lombaire : de l'idéal mécanique à la faillite fonctionnelle. *Rev Rhum.* 2011;78:S42-7.
36. Kapandji AI. Anatomie fonctionnelle. Tome 3: Tête et rachis. Maloine. 2007. p. 118-140
37. Ziegler G TM. Douleurs vertébrales et radiculalgies commune. Tome 1. S.A. M, éditeur. 1979. p 68.
38. Kamina P. Anatomie clinique. Tome 2. Tête, cou, dos. Maloine; 2006. 25-128 p.
39. Faundez A, Roussouly P LHJ. Analyse de l'équilibre sagittal du rachis. Une révolution dans les approches thérapeutiques des pathologies dégénératives lombaires. *Rev Med Suisse.* 2011;7:2470-4.
40. Garreau de Loubresse S, Vialle R WS. Cyphose pathologique. EMC- Appar Locomoteur. 2005;15-869-A-10.
41. Thompson NE AS. The evolution of vertebral formulae in Hominoidea. *Journal of Human evolution.* 2017;18-36.
42. Basmajian JV. Anatomie. Maloine; 1977. p 88-82-132-133.
43. Rouvière H DA. Anatomie humaine. descriptive, topographique, fonctionnelle. Tome II. Tronc. 15ème. Masson, éditeur. Paris; 2002. p. 48-49-67.
44. Dufour M. Anatomie de l'appareil locomoteur. Tome 3. Tête et cou. Masson; 2003. p. 207.
45. Lazennec JY. Anatomie du rachis. In: Masson, éditeur. LE RACHIS 1 - Aspects fondamentaux, explorations, techniques. Masson; 1995. p. 15-54.
46. Louis R. Surgery of the Spine: Surgical Anatomy and Operative Approches. 1983. p.26
47. Shapiro IM RM. Introduction to the Structure, Function, and Comparative Anatomy of the the Vertebrae and Intervertebral Disc. In: The intervertebral disc. Springer; 2014. p. 3-15.
48. Panjabi MM. The Stabilising System of The Spine. Part I: Function, Dysfunction, Adaptation, and Enhancement. *J Spinal Disord.* 1992;5(4):388-9.
49. Drake DL, Vogl W MA. Gray's anatomie pour les étudiants. 2^e éd. Elsevier; 2010.
50. Gillot C. Eléments d'anatomie. Fascicule 1. Les parois du tronc. Paris: Flammarion;

1965. p 109.
51. Ziegler G TM. Douleur vertébrales et radiculaires communes. 1979. p. 68.
 52. Gkasdaris G, Tripsianis G, Kotopoulos K, Kapetanakis S. Clinical anatomy and significance of the thoracic intervertebral foramen: A cadaveric study and review of the literature. *J craniovertebral junction spine*. 2016;7(4):228-35.
 53. Sappey PH.C. *Traité d'anatomie descriptive*. Tome 1: Ostéologie - Arthrologie. Vol. tome1. 1867. p. 268-316.
 54. Eastell R, Mosekilde L, Hodgson SF, Riggs BL. Proportion of human vertebral body bone that is cancellous. *J Bone Miner Res*. 2009;5(12):1237-41.
 55. Paturet G. *Anatomie humaine*. Tome II. Ostéologie, arthrologie, myologie. Masson; 1951. p. 994.
 56. Ribot C, Tremollieres F, Pouilles JM, Louvet JP, Guiraud R. Influence of the menopause and aging on spinal density in French women. *Bone Miner*. 1 oct 1988;5(1):89-97.
 57. Mosekilde L, Mosekilde L. Sex differences in age-related changes in vertebral body size, density and biomechanical competence in normal individuals. *Bone*. 1990;11(2):67-73.
 58. Antoniou J, Steffen T NF. The human intervertebral disc. *J Clin Invest*. 1996;98:996-1003.
 59. Castaing J SJ. *Anatomie fonctionnelle de l'appareil locomoteur. le rachis*. Vigot, éditeur. 1979. p. 24-29-63-80.
 60. Kamina P. *Anatomie - Introduction à la clinique*. Tome 11. Dos et Thorax. Maloine; 1997. 53 p.
 61. Hamel O et al. Aspects morphologique, structural et fonctionnel du disque intervertébral lombal. *Rev Rhum*. 2013;80:204-9.
 62. Schünke M, Schute E SU. *Atlas d'Anatomie Prométhée - Tome 1: Anatomie générale et appareil locomoteur*. De Boeck; 2011. 116-124.
 63. Rabischong P, Louis R, Massare JVC. Le disque intervertébral. 1978;4.
 64. Bonnel F, Privatb JM KP. La colonne lombaire: de l'idéal mécanique à la faillite fonctionnelle. *Rev Rhum*. 2011;78:S42-7.
 65. Bogduk N. Functional anatomy of the spine. *Handb Clin Neurol*. 1 janv 2016;136:675-88.

66. Groen GJ, B B, J D. Nerves and nerve plexuses of the human vertebral column. *Am J Anat.* juill 1990;188(3):282-96.
67. Bouchet A CJ. Anatomie descriptive, topographique et fonctionnelle. Simep; 1983. 875-966-968.
68. Cruveilhier J. Anatomie descriptive. Tome 1. Paris: Bechet Jeune; 1834. 343-385 p.
69. Loughenbury PR, Wadhwan S SR. The posterior longitudinal ligament and peridural (epidural) membrane. *Clin Anat.* 2006;19(6):487-92.
70. Moore KL DA. Anatomie médicale. Aspects fondamentaux et applications cliniques. De Boeck; 2001. 142-155-455-467-480 p.
71. Lazorthé G. Le système nerveux périphérique. Masson, éditeur. 1981. 186-193-334-346 p.
72. Viejo-Fuertes D, Liguorob J RD et al. Morphologic and histologic study of the ligamentum flavum in the thoraco-lumbar region. *Anat Chir Radiol.* 1998;20(3):171-6.
73. Ibrahim AF DH. The costotransverse ligaments in human: A detailed anatomical study. *J cClinical Anat.* 2005;18(5):340-5.
74. Kahle WH, Leonardt H PW. Anatomie. Appareil locomoteur tome 1. 1995. 74 p.
75. Al B et. Traité d'anatomie: de la théorie à la pratique palpatoire. Tome 3. De Boeck University; 1993. 171-176 p.
76. Gille O VJ. Hernie discale thoracique. EMC- Appar Locomoteur. 2005;14-370-A-1.
77. Maigne J-Y. Syndromes de la branche postérieure. Le mal de dos. Masson; 2009. 51-55.
78. Ahn DK, Lee S, Moon SH, Boo KH, Chang BK, Lee J Il. Ossification of the ligamentum flavum. *Asian Spine J.* févr 2014;8(1):89-96.
79. Testut L. Traité d'anatomie humaine. Tome 1. 4e éd. Doin, éditeur. Paris; 1899. 765-799 p.
80. Toumanidou T. Spinal Muscles. In: *Biomechanics of the Spine.* Elsevier; 2018. p. 141-66.
81. Gosling JA, Harris PF WI et al. Anatomie humaine: atlas en couleur. De Boeck; 2003. 362-361.
82. Rouvière H. Précis d'anatomie et de dissection. Masson; 1976. p 530.
83. Depreux R. Shémas de travaux pratiques. Fascicule 5: les parois du tronc. Vigot; 1998. 15-47.

84. <https://www.earthslab.com/anatomy/muscles-of-the-back/>.
85. Bogduk N, Guierre A. Anatomie clinique du rachis lombal et sacré. 2005;
86. Bogduk N, Johnson G, Spalding D. The morphology and biomechanics of latissimus dorsi. Clin Biomech. 1 sept 1998;13(6):377-85.
87. Willard FH et al. The thoracolumbar fascia: anatomy, function and clinical considerations. J Anat. 2012;221(6):507-36.
88. Willard HM et al. The thoracolumbar fascia: anatomy, function, and clinical considérations. J Anat. 2012;221:507-36.
89. A P. Traité des aponévroses . 1827. p. 77-78, 85.
90. Bommas U, Teubner P VR. Cours d'anatomie. De Boeck; 2008. 108-109.
91. Bogduk N MJ. Applied anatomy of the thoracolumbar fascia. Spine (Phila Pa 1976). 1984;164-70.
92. Vleeming A et al. No Title the posterior layer of the thoracolumbar fascia. Spine (Phila Pa 1976). 1995;20(7):753-8.
93. Alsup BK FG. University of Michigan Medical School - Labeled Deep Back and Spinal Cord Images [Internet]. [cité 29 mai 2019]. Disponible sur: <https://sites.google.com/a/umich.edu/bluelink/resources/bluelink/deep-back-and-spinal-cord>
94. Bouchet A, J.Cuilleret. Anatomie topographique - Thorax 2ème Partie - Médiastin antérieur et moyen Cavités pleurales et Poumons.pdf.
95. Gardener E, Gray DJ OR. Anatomie. Volume 1. Doin - OPU; 1975. 3150-0483.
96. Delmas V et al. Dictionnaire d'anatomie. Masson; 2006. 14 p.
97. Hladikova J. Topografická Pitva ve Schématech (Polycope). 1990. 63-66.
98. Leguerrier A. Nouveaux dossiers d'anatomie - Thorax. pdf.
99. Brizon J et castaing J. Les feuillets d'anatomie. Fascicule 14. Le Thorax. 1989. 19 p.
100. Willey AM TJ. The vascular anatomy of the spine and its relationship to pyogenic vertebral osteomyelitis. J Bone Jt Surg. 1959;41 B(4):796-809.
101. Chiras J, Morvan G, Merland JJ, Bories J. Blood supply to the thoracic (dorsal) and lumbar spine. Surg Radiol Anat. 1982;4(1):23-31.
102. Walther C. Recherches anatomiques sur les veines du rachis. Paris: Asselin et Houzeau; 1885. 660-068 .

103. Manisorl M, Domengie F, Herbreteau D, Beaujeux R, Greiner M. Principales voies de drainage du système veineux crânio-spinal. 2013;
104. Monod C. Duhamel B. Schemas d'anatomie - 6 - Thorax.pdf.
105. Waldman SD CR. Hémangiome du rachis thoracique. In: Pathologies Musculosquelettiques Douleuruses: imagerie et diagnostic. Elsevier Masson; 2012. p. 99-100.
106. Pearce JMS. The Craniospinal Venous System. *Eur Neurol.* 2006;56(2):136-8.
107. Batson OV. The function of the vertebral veins and their role in the spread of metastases. *Ann Surg.* 1940;112(1):138-49.
108. Henrique CQ. The veins of vertebral column and their role in the spread of metastase. *Ann R Coll Surg Engl.* 1962;31(1):1-22.
109. Pointillart V, Ravaud A PJ. Métastases vertébrales. Springer; 2001. p 40.
110. Kamina P. Anatomie clinique. Tome 3: Le thorax. 4^e éd. Maloine; 2009. 163-166 .
111. Kulkarni NK. Clinical anatomy: a problem solving approach. Jypee Brother, éditeur. 2011. 281 p.
112. Sapin MR BE. Anatomie du système lymphatique de l'homme. Oran; 1976. p 189.
113. Agur AMR DA. Grant's atlas of anatomy. Lippincott William & Wilkins; 2009. p 87.
114. Ombregt L. Applied anatomy of the lumbar spine. In: A System of Orthopaedic Medicine. 3^e éd. Elsevier; 2013. p. 415-36.
115. Putz R PR. Sobotta, atlas d'anatomie humaine. Editions médicales internationales; 2000. 21 p.
116. Vandervael F. Analyse des mouvements du corps humain. 1966.
117. Izzo R et al. Biomechanics of the spine. Part I: Spinal stability. *Eur J Radiol.* 2013;8:118-26.
118. Fujimori T, Iwasaki M, Nagamoto Y, Matsuo Y, Ishii T, Sugiura T, et al. Kinematics of the thoracic spine in trunk lateral bending: in vivo three-dimensional analysis. *Spine J.* 1 sept 2014;14(9):1991-9.
119. Izzo R, Guarnieri G, Guglielmi G, radiology MM-E journal of, 2013 undefined. Biomechanics of the spine. Part I: spinal stability. Elsevier.
120. Middleditch A OJ. Functional anatomy of the spine. 2^e éd. Elsevier; 2005. 192-200 p.
121. Oda I et al. An In Vitro Human Cadaveric Study Investigating the Biomechanical Properties of the Thoracic Spine. *Spine (Phila Pa 1976).* 2002;27(3):PE64-E70.

122. Klein JP. A Practical Approach to Spine Imaging. Contin (Minneapolis Minn). 2015;21(1):36-51.
123. Debray MP. Imagerie thoracique: technique, indications. EMC- Médecine. 2005;2:42-55.
124. Runge M, Bonneville J. Rachis thoracique. EMC Radiodiagn. 2009;30-600-A-1.
125. Torsten B, Moller TB RE. Atlas de Poche d'Anatomie en Coupe Séries TDM et IRM. Vol 2. Flammarion; 1993. 288-295.
126. Burns JE. Spinal Imaging and Image Analysis. 2015;18:3-29.
127. Runge M. Les pièges en IRM rachidienne. J Radiol Diagnostique Interv. déc 2012;93(12):1046-53.
128. Broca P. L'ordre des primates : parallèle anatomique de l'homme et des singes. Bull la Société d'anthropologie Paris. 1869;4(1):228-401.
129. Cain ML, Damman H LR et al. Découvrir la biologie. 1^{re} éd. De Boeck University; 2006. 31-57-60 p.
130. El Amri DM, El Fakiri MM BM et al. L'éthique musulmane face à la dissection des cadavres humains pour l'enseignement et la recherche en anatomie. Ethique et santé. 2015;12:97-102.
131. Cuvier G. Leçon d'anatomie comparée. Tome 1: les organes du mouvement. Baudouin. 1805. 145-225.
132. Hollard H. Précis d'anatomie comparée. 1835. p. 450-455-491.
133. George D BA. Rise of the Earliest Tetrapods: An Early Devonian Origin from Marine Environment. Fenton B, éditeur. PLoS One. 2011;6(7):e22136.
134. Miralles A. Serpents et lézards sans pattes: quand les tétrapodes ne le sont plus vraiment. Espèce. 2015;18:18-24.
135. Cuvier G. Le règne animal distribué d'après son organisation. Google Livres. consulté en ligne le 14/12/2019.
136. Meckel J-F. Traité général d'anatomie comparée. Tome 3. 1829. p 8.
137. Hyman LH. Comparative Vertebrate Anatomy. 2^e éd. The University of Chicago Press, éditeur. 1942. 99-128.
138. Uhl JF, Plaisant O, Ami O, Delmas V. La modélisation tridimensionnelle en morphologie. Morphologie. 2006;90(288):5-20.

139. Spitzer V, Ackerman MJ, Scherzinger a L, Whitlock D. The visible human male: a technical report. *J Am Med Informatics Assoc.* 1996;3(2):118-30.
140. Al D. The Visible Human Projects in Korea and China with improved images and diverse applications. *Surg Radiol Anat.* 2012;34:527-34.
141. Spitzer VM, Scherzinger AL. Virtual anatomy: An anatomist's playground. *Clin Anat.* 1 avr 2006;19(3):192-203.
142. Lewis TL et al. Complementing Anatomy Education Using Three- Dimensionnal Anatomy Mobile Software Applications on Tablet Computers. *Clin Anat.* 2013;00:000-000.
143. Zilverschoon M BR. The virtual dissecting room: Creating highly detailed anatomy models for educational purposes. *J Biomed Inform.* 2017;65:58-75.
144. Tworek JK, Jamniczky HA, Jacob C, Hallgrímsson B, Wright B. The Lindsay Virtual Human Project: An immersive approach to anatomy and physiology. *Anat Sci Educ.* janv 2013;6(1):19-28.
145. Azer S AS. 3D Anatomy Models and Impact on Learning of the quality of the literature. *Heal Prof Educ.* 2016;2(2):80-98.
146. Uhl JF, Plaisant O, Ami O, Delmas V. La modelisation tridimensionnelle en morphologie. *Morphologie.* mars 2006;90(288):5-20.
147. Uhl JF, Ordureau S D V. Les nouveaux outils de la dissection virtuelle pour l'étude anatomique du système vasculaire. *e-mémoire l'académie Chir.* 2008;7(2):39-42.
148. Shin DS, Chung MS, Park JS, Park HS, Lee SB, Lee SH, et al. Three-dimensional surface models of detailed lumbosacral structures reconstructed from the Visible Korean. *Ann Anat.* 2011;193(1):64-70.
149. Logiciel Ansys. <https://www.ansys.com/fr-fr>.
150. Mimics L. <https://www.materialise.com/fr/medical/logiciel/mimics>.
151. Ratib O, Rosset A. Open-source software in medical imaging: Development of OsiriX. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2006;1(4):187-96.
152. Valeri G, Mazza FA, Maggi S, Aramini D, La Riccia L, Mazzoni G, et al. Open source software in a practical approach for post processing of radiologic images. *Radiol Med.* 2014;309-23.
153. IOF. Epidemiology of osteoporosis. 2015. p. <http://www.osteofound.org/epidemiology>. Consulté le 15 aout 2016.

154. Lane LE. Osteoporosis: yesterday, today, and tomorrow. *Rheumatology*. 2011;1181-3.
155. Thayer SW. Impact of Osteoporosis on high-cost chronic diseases. *Value Heal*. 2014;17(1):43-50.
156. NIH. Consensus Development Panel on Osteoporosis Prevention, Diagnostic and therapy. *JAMA*. 2001;285(6):785-95.
157. Lorentzon M CS. Osteoporosis: the evolution of a diagnosis. *J Intern Med*. 2015;
158. Kanis JA, Hiligsmann M. The application of health technology assessment in osteoporosis. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab*. 2014;(xxx):1-16.
159. Holroyd C, Cooper C, Dennison E. Epidemiology of osteoporosis. *Best Pract Res*. 2008;22(5):671-85.
160. Eastell R. Osteoporosis. *Bone Disord*. 2013;41(10):586-91.
161. Melton LJ 3rd. How many Women have osteoporosis now,. *J Bone Min Res*. 1995;10:175-7.
162. ONS. Démographie algérienne 2013. Office national des statistiues. p. http://www.ons.dz/IMG/pdf/demographie_algerienne2.
163. Unies N. World Population Prospects: the 2012 revision. 2014;
164. Delmas PD, Genant HK, Crans GG, Stock JL, Wong M, Siris E, et al. Severity of prevalent vertebral fractures and the risk of subsequent vertebral and nonvertebral fractures: Results from the MORE trial. *Bone*. 2003;33(4):522-32.
165. Johnel O KJ. Epidemiology of osteoporotic fractures. *Osteoporos Int*. 2015;16:S3-7.
166. Briot K. Ostéoporose postménopausique. *EMC - Appar locomoteur*. 2011;14-024-A-2.
167. Cortet B. Epidemiology of secondary fractures. *Medicographia*. 2014;36(2).
168. Melton LJ, Atkinson EJ, Cooper C, O'Fallon WM, Riggs BL. Vertebral fractures predict subsequent fractures. *Osteoporos Int*. 1999;10(3):214-21.
169. Dargent-Molina P. Aspects épidémiologiques des fractures ostéoporotiques. *Les Cah l'année gérontologique*. 2009;1(3):164-71.
170. Delmas PD, van de Langerijt L, Watts NB, Eastell R, Genant H, Grauer A, et al. Underdiagnosis of Vertebral Fractures Is a Worldwide Problem: The IMPACT Study. *Jour Bone Min Resear*. 2005;20(4):557-63.
171. Bartelena T, Giannelli G, Rinaldi MF. Prevalence of thoracolumbar vertebral fractures on multidetector CT: underreporting by radiologists. *Eur journ Radiol*. 2009;69(3):555-9.

172. Williams AL et al. Under-reporting of osteoporosis vertebral fracture on computed tomography. *Eur J Radiol.* 2009;69(1):179-83.
173. Oei L. Review of radiological scoring methods of osteoporotic vertebral fractures for clinical and research settings. *Eur Radiol.* 2013;23(2):476-86.
174. Grados F, Fechtenbaum J, Flipon E, Kolta S, Roux C, Fardellone P. Méthodes radiographiques d'évaluation des fractures vertébrales ostéoporotiques. *Rev Rhum.* mai 2009;76(5):397-404.
175. Genant HK, Wu CY, van Kuijk C, Nevitt MC. Vertebral fracture assessment using a semiquantitative technique. *J Bone Miner Res.* 3 déc 1993;8(9):1137-48.
176. Roux C. Faut-il tenir compte des déformations vertébrales ostéoporotiques ? *Rev Rhum.* 2001;68:369-72.
177. Ross PD, Wasnich RD, Davis JW, Vogel JM. Vertebral dimension differences between Caucasian populations, and between Caucasians and Japanese. *Bone.* 1991;12(2):107-12.
178. Diacinti D, Acca M, D'Erasmus E, Tomei E, Mazzuoli GF. Aging changes in vertebral morphometry. *Calcif Tissue Int.* 1995;57(6):426-9.
179. Diacinti D, Guglielmi G. Vertebral Morphometry. *Radiol Clin North Am.* 2010;48(3):561-75.
180. Briot K, Baron G, Kolta S, Ravaud P, Eastell R, Reid D, et al. Un indice de risque fracturaire dans l'ostéoporose post-ménopausique: données de l'étude prospective OPUS (Osteoporosis and Ultrasound Study). *Rev Rhum.* 2006;73(10-11):1055-6.
181. Eastell R et al. Classification of Vertebral Fractures. 1991;6(3):207-205.
182. Hurxthal LM. Measurement of vertebral heights. *AJR.* 1968;103:635-44.
183. El Maghraoui A, Rezqi A, Mounach A, Achemlal L, Bezza A, Ghozlan I. Systematic vertebral fracture assessment in asymptomatic postmenopausal women. *Bone.* 2013;52(1):176-80.
184. Desquilbet L. Guide pratique de validation statistique de méthode de mesure: répétabilité, reproductibilité et concordance. pdf en ligne. 2019. p. 1-41.
185. Journois D. Concordance de deux variables: l'approche graphique. *Rev Mal Respr.* 2004;21:127-30.

186. Imikraz S BM. Les prothèse cranio-faciales personnalisées: une application chirurgicale de la reconstruction et l'impression 3D. 2019.
187. Diacinti D, Acca M, D'Erasmus E, Tomei E, Mazzuoli GF. Aging changes in vertebral morphometry. *Calcif Tissue Int.* 1995;57(6):426-9.
188. Gao L, Fan T, Chen Y, Qiu S. Reference values for vertebral shape in young Chinese women: Implication for assessment of vertebral deformity. *Eur Spine J.* 2010;19(7):1162-8.

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Figure 01: Coupes axiales d'embryon.	6
Figure 02: Formation des vertèbres et du disque intervertébral, coupes coronales de la corde et de la notochorde.	7
Figure 03: Organisation des métamères.	9
Figure 04: Développement du rachis.	10
Figure 05: Hémivertèbres.	12
Figure 06: Hémivertèbres multiples.	12
Figure 07: Vertèbre papillon.	12
Figure 08: Barre latérale.	12
Figure 09: Bloc vertébral.	12
Figure 10: Le rachis dans son ensemble.	15
Figure 11: Rachis thoracique, (à droite côtes en place).	17
Figure 12: Vertèbre type.	18
Figure 13: Vertèbre thoracique, vue axiale.	20
Figure 14: Vertèbre thoracique, vue ventrale.	20
Figure 15 : Vertèbre thoracique, vue latérale.	21
Figure 16: Foramen et pédicule intervertébral.	23
Figure 17: Vertèbre T11 et T12, vue latérale.	24
Figure 18: Structure de la vertèbre, vues latérale et axiale.	25
Figure 19: Articulation du rachis thoracique, vue latérale.	27
Figure 20: DIV en coupe sagittale.	28
Figure 21 : Disque intervertébral, vue crâniale.	28
Figure 22: Disposition lamellaire de l'annulus fibrosus.	28
Figure 23: Ligament du rachis thoracique, coupe sagittale.	30
Figure 24: Ligament longitudinal antérieur, vue ventrale.	31
Figure 25: Ligament longitudinal postérieur, vue dorsale.	31
Figure 26: Ligament Flavum, vue endo-canalair.	32
Figure 27: Articulation costo-vertébrale, vue axiale.	33
Figure 28: Articulation costo-vertébrale, coupe coronale schématique.	34
Figure 29: Articulation costo-transversaire, vue dorso-latérale.	35
Figure 30: Muscles du dos, coupe axiale.	37
Figure 31: Muscles intrinsèques, plan profond.	39
Figure 32: Muscles intrinsèques, plan profond.	39
Figure 33: Muscles intrinsèques, intermédiaires à gauche. Extrinsèques intermédiaires à droite	41
Figure 34: Muscles extrinsèques, plan intermédiaire et superficiel	43
Figure 35: Coupe transversale du thorax en T2.	49
Figure 36: Coupe transversale du thorax en T4.	50

Figure 37: Coupe transversale du thorax en T8.	50
Figure 38: Projection du système azygos et du système lymphatique sur le rachis thoracique.	52
Figure 39: Aorte thoracique, vue ventrale.	53
Figure 40: Médiastin postérieur, trachée, œsophage, nerf pneumogastrique, aorte thoracique.	54
Figure 41: Rapports intrinsèques du rachis, vue ventro-latérale.	55
Figure 42: Vascularisation artérielle vertébrale, vue axiale.	57
Figure 43: Drainage veineux du rachis, coupe sagittale.	57
Figure 44: Plexus veineux rachidiens, vue axiale.	58
Figure 45: Nerf spinal, vue crâniale.	61
Figure 46: Nerf spinal, vue dorso-latérale.	62
Figure 47: Mobilités du rachis thoracique.	63
Figure 48: Squelette d'oiseau.	78
Figure 49: Synsacrum, vue dorsale.	78
Figure 50: Atlas morphologique de Genant.	86
Figure 51: Version 3 D de l'atlas morphologique de Genant.	127
Figure 52: Graphe de Bland Altman pour les hauteurs antérieures.	138
Figure 53: Graphe de Bland Altman pour les hauteurs moyennes.	138
Figure 54: Graphe de Bland Altman pour les hauteurs postérieures.	139

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo 01 :	Sacralisation de L5.	12
Photo 02 :	Fascias thoraciques dorsaux, plan superficiel.	47
Photo 03 :	Fascia thoraco-lombal [Base de données VHP].	48
Photo 04 :	Radiographie standard du rachis thoracique,	67
Photo 05 :	Coupe TDM sagittale.	68
Photo 06 :	Coupe TDM para sagittale	68
Photo 07 :	Coupes TDM, vues axiales	69
Photo 08 :	Anatomie 3 D sur reconstruction TDM.	71
Photo 09 :	IRM en coupe sagittale du rachis thoracique, pondérée en T2.	72
Photo 10 :	IRM en coupe para sagittale du rachis thoracique, pondérée en T2.	73
Photo 11	Coupe IRM axiale pondérée en T2.	73
Photo 12 :	Squelette de poisson, vue latérale.	75
Photo 13 :	Vertèbre de poisson, vue axiale.	75
Photo 14 :	Vertèbre de poisson, vue latérale.	75
Photo 15 :	Squelette de grenouille, vue dorsale.	76
Photo 16 :	Squelette de serpent.	77
Photo 17 :	Squelette de serpent, vue latérale.	77
Photo 18 :	Squelette de crocodile.	77
Photo 19 :	Squelette de chien.	79
Photo 20 :	Squelette de primate.	79
Photo 21 :	Application d'anatomie IMAIOS.	82
Photo 22 :	Application d'anatomie VH-DISSECTOR.	82
Photo 23 :	Table de dissection Anatomage.	83
Photo 24 :	Les hauteurs vertébrales 2 D.	86
Photo 25-	Coupe VHP Male.	91
a :		
Photo 25-	Coupe VHP Male retournée horizontalement.	91
b:		
Photo 25-	Aorte thoracique en position inversée avant le retournement	91
c :	des coupes VHP Male.	
Photo 26 :	Bandes noires dues aux coupes manquantes.	92
Photo 27 :	Distorsion du modèle par décalage des coupes cryosectionnées.	92
Photo 28 :	Icône WinSurf.	93
Photo 29 :	Écran d'accueil du logiciel WinSurf.	93
Photo 30 :	Nouveaux contours.	93
Photo 31 :	Paramétrage du logiciel WinSurf.	93
Photo 32 :	Écran 2D du logiciel WinSurf.	94
Photo 33 :	Liste des outils 2D.	94
Photo 34 :	Contourage de l'arc vertébral.	95
Photo 35 :	Écran 3D de Winsurf.	95
Photo 36 :	Liste des outils 3D.	96
Photo 37 :	Propriétés de l'objet 3D.	96
Photo 38 :	Lissage et hiatus.	97
Photo 39 :	Ajustement du modèle.	97
Photo 40 :	Création d'illustration anatomique à partir de modèle 3D.	98
Photo 41 :	Vertèbre thoracique, vue latérale.	99
Photo 42 :	Chronologie de la reconstruction 3D.	100
Photo 43 :	Arc vertébral, vue ventrale.	101

Photo 44 : Corps vertébral, vue latérale.	101
Photo 45 : T1-T2-T3, vue ventrale.	101
Photo 46 : T1-T2-T3, vue latérale.	101
Photo 47 : T1, vue ventrale.	101
Photo 48 : T12, vue latérale.	101
Photo 49 : T4 et moelle spinale, vue axiale.	102
Photo 50 : Corps de T4 et moelle spinale, vue axiale.	102
Photo 51 : T11- T12, vue latérale.	102
Photo 52 : Segment mobile rachidien, vue latérale.	102
Photo 53 : Segment mobile rachidien, vue axiale.	102
Photo 54 : Segment mobile rachidien, vue dorsale.	102
Photo 55 : Projection du cœur et de l'aorte sur le rachis thoracique.	103
Photo 56 : Projection des scapula sur le rachis thoracique.	103
Photo 57 : Projection du sternum sur le rachis thoracique.	103
Photo 58 : Modèle 3D, vue postérieure.	103
Photo 59 : Exemples d'illustrations réalisées à partir de reconstructions 3D.	104
Photo 60 : Rendu final du modèle.	107
Photo 61 : Atlas morphologique 3D des fractures vertébrales ostéoporotiques.	128
Photo 62 : Mesures sur modèle 3 D.	139

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01: Statistiques descriptives de l'ensemble de la base de données.	112
Tableau 02: Classe d'âge des patientes.	112
Tableau 03: Profil rachidien et existence d'une fracture vertébrale (femmes pré-ménopausées).	114
Tableau 04': Effectifs selon la classe d'âge.	115
Tableau 04 : Âge des patientes ménopausées.	115
Tableau 05 : Existence de fracture vertébrale.	117
Tableau 06 : Profil rachidien.	118
Tableau 07 : Profil rachidien et existence d'une fracture vertébrale.	118
Tableau 08 : Existence de fractures vertébrales chez les femmes de plus de 50 ans sans scoliose.	120
Tableau 09: Classe d'âge et existence de fracture vertébrale	121
Tableau 09': Corrélation nombre de fracture et classe d'âge.	121
Tableau 10: Siège de la fracture sur le rachis thoracique	122
Tableau 11: Siège de la fracture sur le rachis lombal	122
Tableau 12: Siège de la fracture sur le rachis thoracique et lombal	122
Tableau 13: Classe d'âge et nombre de fracture vertébrale d'une patiente	124
Tableau 14: Nombre de fracture par niveau	125
Tableau 15: Type fracturaire	126
Tableau 16: Classe d'âge et fracture minime cunéiforme	126
Tableau 17: Classe d'âge et fracture sévère biconcave.	126
Tableau 18: Hauteurs vertébrales normatives, en mm et leur écart-type.	130
Tableau 19: Ratios et écarts types des hauteurs vertébrales normatives.	131
Tableau 20: Comparaison aux hauteurs vertébrales de Diacinti et al.	132
Tableau 21: Comparaison aux hauteurs vertébrales de Gao et al.	132
Tableau 22: Comparaison aux hauteurs vertébrales de Ross et al.	133

TERMINOLOGIE (amawal amaynut) selon l'ordre d'apparition dans le texte-source

Awal (terme)	Aybalu (source)
Modèle= Tamudemt, timudmin	Amawal n Tusnakt Lexique de mathématiques-Editions Tafsut- 1984
Modéliser= Smudem	Amawal n Tusnakt Lexique de mathématiques-Editions Tafsut- 1984
Numérique= Tameṭṭunt, timeṭṭunin	Amawal n Tusnakt Lexique de mathématiques-Editions Tafsut- 1984
Technologie= Takenwalt, tiknawalin	L.Oulhadj-Vocabulaire moderne de la langue amazighe-2013
Internet= Agerzedwan	Proposition du traducteur
Domaine= Tayult, tiyula	Mammeri-Amawal n Tmaziyt Tatrart
Biométrie= Taktudert	Proposition du traducteur (Ket=mesurer+Tudert=vie)
Dimension= Tasekta, tisektiwin	Amawal n Tusnakt Lexique de mathématiques-Editions Tafsut- 1984
Proposer= Summer ; asummer= proposition	Mammeri-Amawal n Tmaziyt Tatrart
Semres =utiliser ; asemres= utilisation	Mammeri-Amawal n Tmaziyt Tatrart
Izdi n wedmer= rachis thoracique	Dallet, J-M- Dictionnaire kabyle-français, Editions Peeters, 1982
Corps =Tafekka ; cadavre=tafekka n umettin Amettin=mort, en kabyle	Mammeri-Amawal n Tmaziyt Tatrart
Diagnostic= Ikiz ; akez=discerner, distinguer en kabyle	L.Oulhadj-Vocabulaire moderne de la langue amazighe-2013
Reconstruction du rachis= asnam n wezkwaw n yezdi	Proposition du traducteur à partir de L.Oulhadj-Vocabulaire moderne de la langue amazighe-2013
Carte= Takerda, tikerdiwin	Mammeri-Amawal n Tmaziyt Tatrart
Atlas= Tagrumma n tkerdiwin	Proposition du traducteur ; tagrumma=ensemble, Amawal n Tusnakt Lexique de mathématiques- Editions Tafsut- 1984
Tunt=part, proportion en kabyle, proposé pour rendre prévalence	Proposition du traducteur ; Tunt existe en kabyle
Ostéoporose =aftutes n yiyes	Proposition du traducteur (à partir du kabyle)
Morphométrie= Aktalya	Proposition du traducteur : Ket (mesurer)+Talya (forme)
Méthode= Tarrayt	Mammeri-Amawal n Tmaziyt Tatrart
Mesure= asket, isekten	Amawal n Tusnakt Lexique de mathématiques-Editions Tafsut- 1984
Impression= Aslugem ; Impression 3D= Aslugem s 3 tsektiwin	Mammeri-Amawal n Tmaziyt Tatrart, Amawal n Tusnakt Lexique de mathématiques

RÉSUMÉ

Les modèles numériques existent depuis la fin des années 1980, il aura fallu la démocratisation d'internet et des nouvelles technologies pour qu'ils prennent de l'essor et se diffusent. En sciences morphologiques trois domaines bénéficient de la technologie 3 D ; l'enseignement, la clinique et la biométrie.

Nous proposons dans cette thèse :

- Un modèle tridimensionnel, à visée pédagogique du rachis thoracique, obtenu par modélisation 3D des structures osseuses et ligamentaires des coupes cadavériques *Visible Human Project*.
- Un atlas morphologique 3D des fractures vertébrales ostéoporotiques, analogue à celui de Genant, d'aide au diagnostic sur les reconstructions du rachis. Pour réaliser cet atlas nous avons procédé à une étude de la prévalence de la fracture vertébrale ostéoporotique sur une base de données tomodensitométrique de 131 patientes sur une période de 6 mois, au CHU de Tizi-Ouzou.
- D'explorer la validité de la morphométrie 3D, par une étude statistique de comparaison des hauteurs vertébrales sur modèle 3D versus 2D. La répétabilité, reproductibilité et concordance des mesures est bonne, homologuant ces modèles de vertèbres pour l'impression 3D.

Mots clés :

Anatomie. Rachis. Tridimensionnel. *Visible Human Project*. Fracture. *Printing*.

SUMMARY:

Digital models have existed since the late 1980s, and these models have benefited of the the Internet and new technologies democratization to grow and spread. In morphological sciences three fields benefit from 3D technology; teaching, the clinic and biometrics.

In this thesis, we propose:

- A three-dimensional, pedagogical model of the thoracic spine, obtained by 3D modelling of the bone and ligament structures cadaveric cuts of the Visible Human Project
- A 3D morphological atlas of osteoporotic vertebral fractures, similar to that of Genant, helping to diagnose spine reconstructions. To achieve out this atlas we carried out a study of the prevalence of osteoporotic vertebral fracture on a CT scans database of 131 patients over a 6-month period at the Tizi-Ouzou University Hospital
- To explore the validity of three-dimensional morphometrics, by a statistical study comparing vertebral heights on a 3D versus 2D model. The repeatability, reproducibility and match measurements are good, homologating these vertebrae models for 3D printing.

Key words:

Anatomy. Spine. Three-Dimensional. *Visible Human Project*. Fracture. *Printing*.

ملخص

ظهرت النماذج الرقمية في نهاية الثمانينات، ولكنها لم تبدأ في التطور والانتشار إلا بعد إضفاء الطابع الديمقراطي على الإنترنت والتقنيات الحديثة. ففي العلوم المورفولوجية، تستفيد ثلاث مجالات من تكنولوجيا ثلاثية الأبعاد "3D"، إلا وهي: التعليم والعيادة و المقاييس الحيوية.

فنقترح إذا في هذه الأطروحة ما يلي:

- نموذج ثلاثي الأبعاد للسياساء الصدري، بهدف بيداغوجي، تحصلنا عليه عبر التصميم الثلاثي الأبعاد للهياكل العظمية والخاصة بالأربطة لمقاطع الجثة "*Visible Human Project*".
- أطلس مورفولوجي ثلاثي الأبعاد خاص بالكسور الفقرية مخلخلة العظام، نظير لجينان (*Genant*)، لمساعدة التشخيص المتعلق بإعادة بناء العمود الفقري. ولغرض إنجاز هذا الأطلس، قمنا بدراسة معدل انتشار الكسور الفقرية مخلخلة العظام على أساس تصوير مقطعي محوسب لمائة وواحد وثلاثين مريضة، لمدة ستة أشهر، بالمركز الاستشفائي الجامعي لتيزي وزو.
- كشف صلاحية قياس الأشكال المكوّنة من ثلاثة أبعاد عن طريق دراسة إحصائية تقارن بين الارتفاعات الفقرية على نموذج ثلاثي الأبعاد ونموذج ثنائي الأبعاد. فظهرت تكرارية المقاييس وقابلية نسخها وانسجامها، من نوع جيّد، تصادق بالتالي على النماذج الفقرية هذه، لغرض الطباعة الثلاثية الأبعاد.

المفتاح:

علم التشريح – السياساء/العمود الفقري – ثلاثي الأبعاد – *Visible Human Project* – الكسور – الطباعة (*Printing*).

Agzul s tmaziyt

Timudmin timettunin nnulfant-d deg tæcrett n yiseggasen n 1980. Mi yennefli Ugerzedwan akked tkenwalin timaynutin uyalent uwýent deg waṭas n tyula.

Deg tussniwin tisanlyayin, kraḍet n tyula i d-yesfaydin seg tkenwalt m 3 tsektiwin : aselmed, asejji akked tektudert.

Deg tezrawt-agi, nessumer-d kraḍ n yisummar :

-amezwaru d tamudemt m 3 tsektiwin n yezḍi n wedmer ; tezmer ad tettwasemres i uselmed. Nessufey-itt-id s wesmudem n tækwin n yeýsan d yididen i d nessukes seg tfekkiwin n yimettinen.

-wis-sin d tagrumma n tkerḍiwin sut 3 tsektiwin i d yesskanen timerziwin n teylalin, yettak anzi i tegrumma n tkerḍiwin n Genant. Yezmer ad yenfee deg yikiz n wesnam n wezkaw n yezḍi. I wakken ad d-nessufey tagrumma-agi n tkerḍiwin, neḍfer, tamudi n 6 wagguren deg ssbitaḥ n Tizi Wezzu, 131 n tmuḍinin yerzen. Nezrew timerziwin-nsent i wakken ad d-nessufey tunt n tidak yerzen deg tyellal n wejgu n weerur, i wumi tamentilt n tmerziwt d aftutes n yiyes-nsent.

-deg wis-kraḍ, nnuda ad nzer d acu i d yettawi weketalya bu 3 tsektiwin ; nkenna ger tididiyin n tyellal s tarrayt m 2 tsektiwin akked tarrayt m 3 tsektiwin. Nufa tarrayt m 3 tsektiwin telha ama deg tulla ama deg usniles akked d wemyezgi n yisekten ; daymi zemrent tmudmin agi n tyellal ad ttwasemresent i weslugem s 3 tsektiwin.