

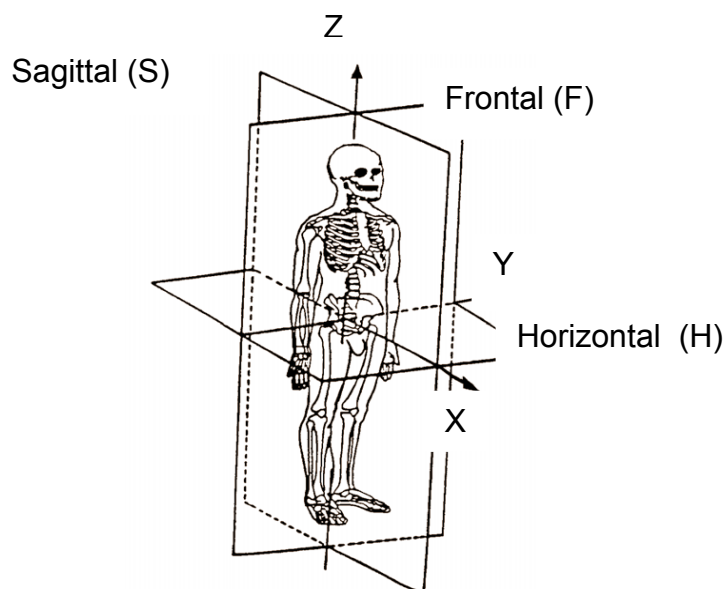
## I. Description du rachis

### I.1.1. Introduction

Dans ce chapitre nous effectuerons une présentation générale de la colonne vertébrale et particulièrement le rachis cervical afin de mettre en évidence ces spécificités. A cet effet, nous allons d'abord traiter l'anatomie de cette entité en mettant en évidence les fonctions biomécaniques des différents composants.

### I.1.2. Plans de référence

L'anatomie va se décrire à partir d'un repère spatial direct. Considérons le corps Humain debout, bras le long du corps, paumes tournées à l'avant. Le repérage peut être effectué suivant trois plans orthogonaux (figure I.1) :



**Figure I.1.** Plans de référence [1]

- Le plan vertical de symétrie approximative du corps humain : plan sagittal (S).
- Le plan perpendiculaire aux deux plans précédents :
  - Axe OZ : intersection des plans frontal et sagittal, direction caudo-craniale.
- Le plan vertical perpendiculaire au plan sagittal: plan frontal (F).
- Le plan perpendiculaire aux deux plans précédents : plan horizontal (H).

Ces trois plans sont utilisés comme plans de référence pour l'étude des mouvements de la colonne. Les intersections de ces trois plans définissent un repère orthogonal OXYZ.

Ces trois plans sont utilisés comme plans de référence pour l'étude des mouvements de la colonne. Les intersections de ces trois plans définissent un repère orthogonal OXYZ.

- Axe OY : intersection des plans frontal et direction médio-latérale gauche.
- Axe OZ : intersection des plans frontal et sagittal, direction caudo-craniale.

## I.2. Le rachis dans son ensemble :

La colonne vertébrale est le pilier du corps humain. Implantée sur le bassin, elle soutient les éléments supérieurs du squelette (tête, membres supérieurs, cage thoracique) permettant leurs mobilités et assure la transmission des charges imposées aux membres supérieurs quelles que soient leurs positions par rapport au squelette. C'est une structure polyarticulée, à la fois mobile et résistante [2].

La colonne vertébrale se compose de 34 vertèbres : 24 vertèbres mobiles, 5 sacrées et 5 vertèbres coccygiennes soudées. La grande flexibilité de la colonne est obtenue grâce à sa construction polyarticulée constituée par un empilage de vertèbres formant cinq parties (figure I.2) :

La colonne vertébrale se compose de 34 vertèbres : 24 vertèbres mobiles, 5 sacrées et 5 vertèbres coccygiennes soudées [3,4,5].

La grande flexibilité de la colonne est obtenue grâce à sa construction polyarticulée constituée par un empilage de vertèbres formant cinq parties (figure I.2)

:

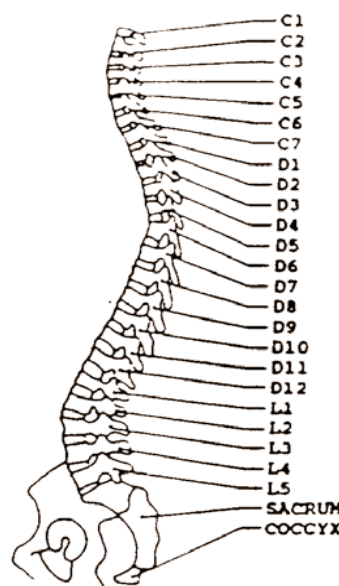


Figure I.2. Rachis d'après [2,3,4]

- le rachis cervical est constitué de 7 vertèbres cervicales (de C1 à C7).
- le rachis dorsal ou thoracique comprenant 12 vertèbres dorsales (de D1 à D12 ou T1 à T12).
- le rachis lombaire formé de 5 vertèbres lombaires (de L1 à L5).
- le sacrum comprenant 5 vertèbres sacrées soudées.
- le coccyx constitué de 4 à 5 vertèbres coccygiennes soudées

Les vertèbres sont reliées entre elles par de nombreuses structures fibreuses et sont le siège d'insertions musculaires qui font de la véritable axe haubané : les ligaments et les muscles sont colonne un indispensables à la stabilité et au maintien de l'équilibre en position debout.

Sur le plan cinématique, deux vertèbres adjacentes sont liées entre elles par l'intermédiaire du disque intervertébral et des articulations inter-apophysaires [6] . Ces articulations jouent un rôle dans les mouvements du rachis en servant de guides : leur orientation détermine en partie les mobilités prépondérantes entre deux vertèbres. Ce sont des diarthroses, ou articulations vraies, qui se composent de surfaces articulaires cartilagineuses, d'une capsule articulaire, de ligaments de renfort et d'une bourse synoviale.

On utilise couramment le terme d'unité fonctionnelle vertébrale pour désigner un ensemble constitué de deux vertèbres adjacentes peu déformables et de tissus de liaison (disque et ligaments) beaucoup plus déformables autorisant ainsi des mobilités entre ces deux vertèbres.

On distingue trois types de mouvements primaires au niveau de l'unité fonctionnelle [10, 11] :

- les mouvements plans dans le plan sagittal (rotation par rapport à Y et translation suivant X et Z) appelés mouvements d'inclinaison sagittale, ou encore de flexion lorsque le déplacement de la vertèbre sus-jacente a lieu vers l'avant et d'extension dans le cas contraire. Ils sont la conséquence d'un couple de flexion ou d'extension sagittale.

- les mouvements dus à un couple d'inflexion frontale. Ce sont des mouvements dans le plan frontal (rotation par rapport à X et translation suivant Y et Z) appelés mouvements d'inclinaison latérale ou inflexion latérale droite ou gauche selon le sens du déplacement. Ils sont accompagnés de mouvements secondaires appelés mouvements de couplage.

- les mouvements dus à un couple de torsion. Ce sont des mouvements de rotation autour de l'axe rachidien (Z) appelés mouvements de rotation axiale droite ou gauche selon le sens du déplacement. Ils sont accompagnés de mouvements secondaires appelés mouvements de couplage.

### I.2.1. Posture rachidienne

Toujours au regard de la stabilité, afin de positionner la tête et le bassin au dessus du polygone de sustentation, le rachis est aligné dans le plan frontal et présente une succession de courbures inversées dans le plan sagittal (qui peuvent être assimilées à un pré-flambage favorisant la résistance statique) [7].

On distingue la lordose cervicale, la cyphose thoracique, la lordose lombaire et la cyphose sacrée (Figure I.3). Le rachis est en effet composé de quatre portions différenciables par la forme des vertèbres et leurs mobilités intervertébrales : 7 vertèbres cervicales, 12 thoraciques, 5 lombaires et 5 vertèbres sacrées fusionnées. La succession de ces segments peut aussi être décrite par trois charnières, cervico-thoracique, thoraco-lombaire et lombo-sacrée [8].

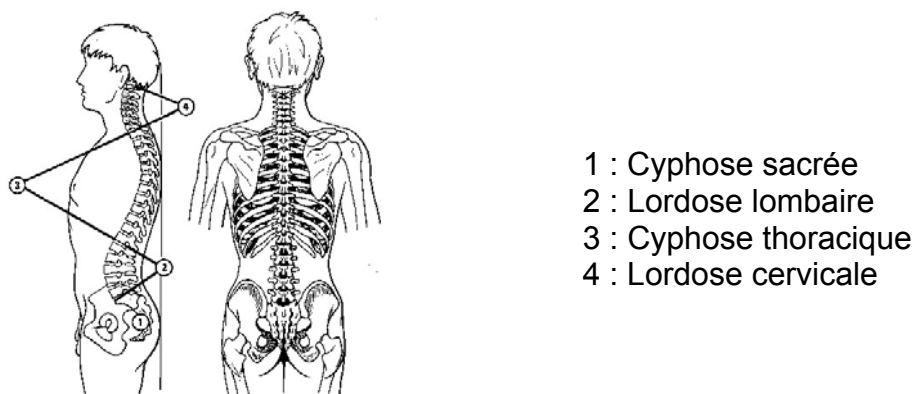


Figure I.3. Posture rachidienne [4, 6, 11]

## I.2.2. Vertèbres et bassin

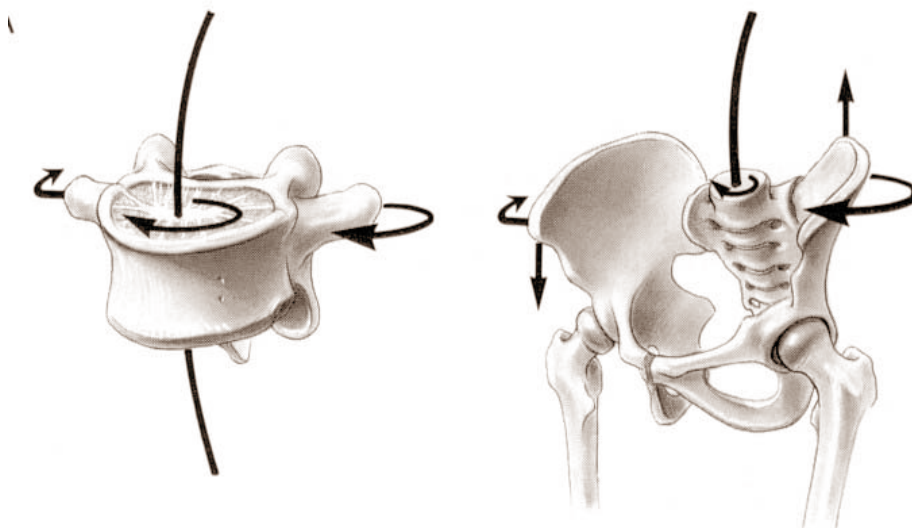
Au niveau de la mobilité du rachis, il convient d'analyser les éléments segmentaires qui le constituent, les vertèbres, le bassin et les côtes.

### I.2.2.1. Bassin

Le bassin est le véritable socle du tronc, transition entre le rachis et les membres inférieurs. Il est composé du sacrum, des os coxaux gauche et droit.

Le sacrum, composé de cinq vertèbres soudées, est la continuité du rachis. Il est articulé par un disque et deux facettes articulaires avec la dernière vertèbre lombaire. Le coccyx en est le prolongement inférieur (qui n'a pas de rôle fonctionnel particulier). De part et d'autre du sacrum, sont articulés les os coxaux (au niveau d'une articulation sacro-iliaque dont la mobilité est limitée). Ces os sont formés par l'ilion (partie supérieure où s'insèrent de nombreux muscles et ligaments du rachis), l'ischion (partie postéro-inférieure sur laquelle repose le bassin en position assise) et le pubis (partie antéro-inférieure). Ces os sont également le moyen d'attache des membres inférieurs au tronc, au niveau des articulations coxo-fémorales [8, 9].

Pris dans son ensemble, au regard de ses mobilités et de son rôle dans la stabilité du tronc (Figure I.4), le bassin peut être considéré comme une vertèbre supplémentaire, la vertèbre pelvienne.



**Figure I.4.** Principe de la vertèbre pelvienne d'après [6]

### I.2.2.2. Vertèbres lombaires

Les vertèbres lombaires ont un corps vertébral plus massif, étendu en largeur. Les facettes articulaires sont contenues dans une surface cylindrique centrée sur l'arrière (regardant fortement en dedans et légèrement en arrière pour la facette supérieure et regardant fortement en dehors et légèrement en avant pour la facette inférieure) favorisant flexion, extension et inclinaison latérale (également favorisées par une hauteur de disque importante). La rotation axiale des vertèbres a lieu autour d'un axe situé, dans ce cas, en zone postérieure sollicitant ainsi le disque intervertébral en cisaillement ce qui limite fortement le mouvement (à environ 5°) [5, 14].

#### I.2.2.3. Vertèbres thoraciques et thorax

Les vertèbres thoraciques ont un corps vertébral légèrement en coin sur la partie antérieure (favorisant la courbure cyphotique). Les facettes articulaires sont contenues dans une surface cylindrique centrée sur le corps vertébral (regardant fortement en arrière et légèrement en haut pour la facette supérieure et regardant fortement en avant et légèrement vers le bas pour la facette inférieure) limitant le mouvement d'extension et favorisant la flexion. La rotation axiale des vertèbres a lieu autour d'un axe situé, de fait, dans le disque intervertébral qui est alors sollicité en torsion (et autorise une rotation d'une trentaine de degrés) [5]. L'amplitude des mouvements est néanmoins limitée par le thorax.

Au niveau des vertèbres thoraciques, sont en effet articulées les côtes, formant la cage thoracique, protectrice des appareils respiratoire et cardiaque, et qui joue un rôle important dans la ventilation par son volume variable.

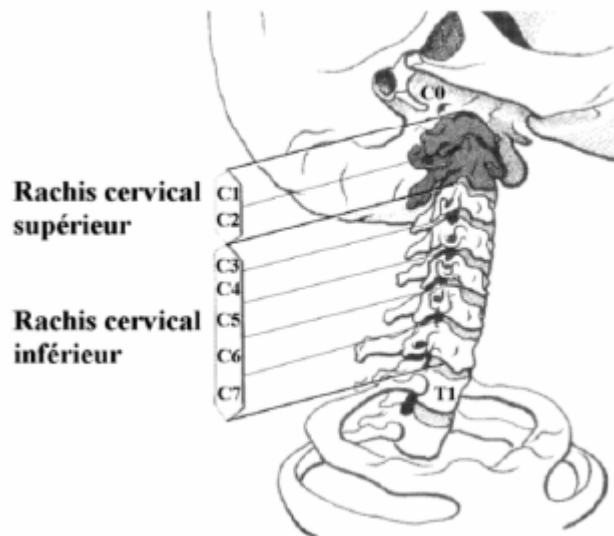
### **I.3. Le rachis cervical**

#### I.3.1. Les structures osseuses

De par sa position, le rachis cervical doit permettre un repérage et un positionnement fins des capteurs visuels et vestibulaires. A ce titre il est composé de deux parties anatomiquement et fonctionnellement bien distinctes figure I.5.

Le rachis cervical supérieur [7] constitué de deux vertèbres, l'atlas (C1) et l'axis (C2), très dissemblables entre elles aussi qu'avec les autres vertèbres cervicales.

On y rajoute souvent l'os occipital du crâne, nommé aussi C0. Ces trois pièces sont réunies par une chaîne articulaire complexe assurant un réglage fin du positionnement de la tête dans l'espace.



**Figure I.5.** Rachis cervical d'après [5]

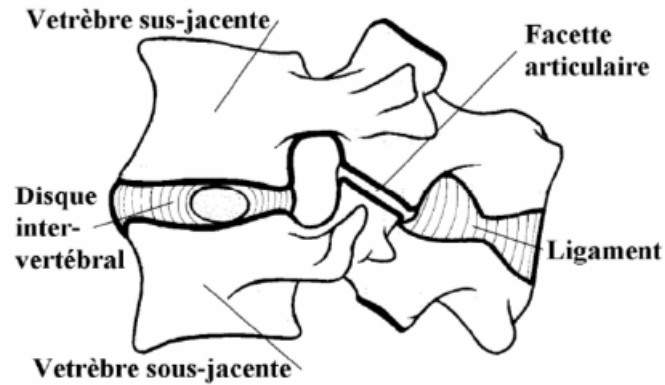
Le rachis cervical inférieur [8] constitué de 5 vertèbres (C3 à C7) de géométrie similaire, s'étendant du plateau inférieur de l'axis au plateau supérieur de première vertèbre thoracique (T1).

On peut dissocier le rachis cervical en unités fonctionnelles (figure I.6), composée de deux vertèbres adjacentes ainsi que les tissus mous les reliant :

-le disque intervertébral : élément déformable qui permet la mobilité et amortit les efforts. Remarquons que le rachis cervical de C0 à C2 ne possède pas de disque intervertébral contrairement aux autres niveaux, ce sont les structures ligamentaires et musculaires exclusivement qui maintiennent les éléments osseux solidaires.

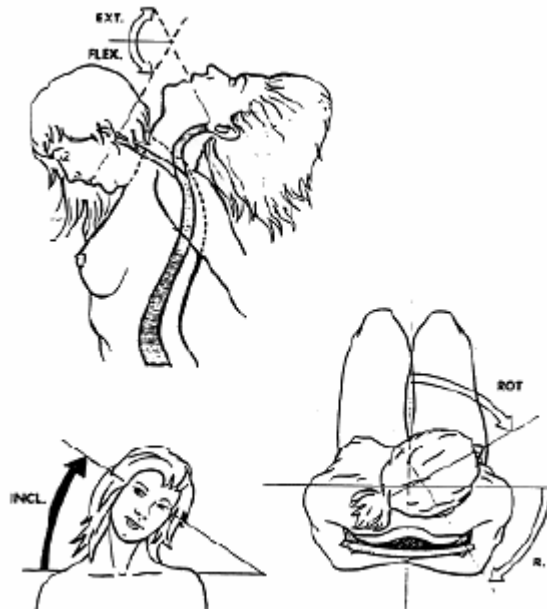
-les surfaces articulaires, qui guident les mobilités segmentaires de la colonne ;

-les ligaments limitent les amplitudes de mouvement et c contribuent ainsi à la stabilité de la colonne.



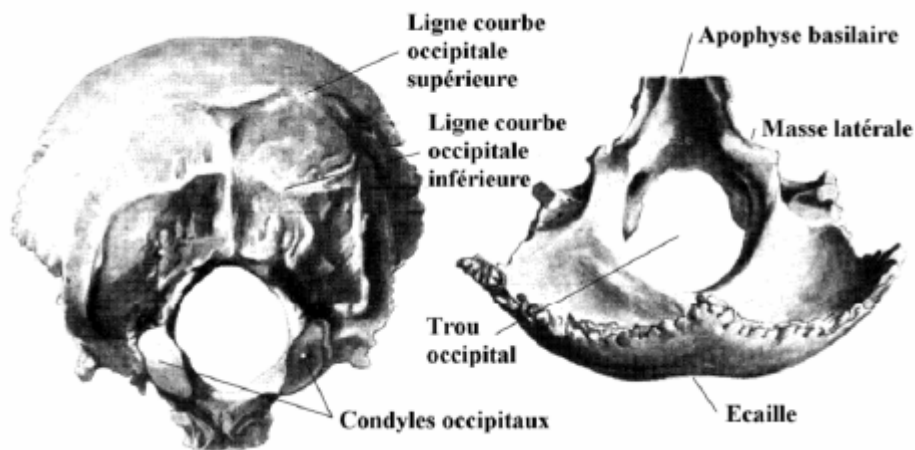
**Figure I.6.** Unité fonctionnelle d'après [7]

Structure musculaire joue le rôle moteur et participe à la stabilité du rachis : les mouvements de la tête sont généralement décrits par des mouvements suivants les 3 plans définis précédemment (figure I.7).



**Figure I.7.** Mouvements de la tête dans les 3 plans anatomiques : Flexion / Extension, Inclinaison ou inflexion latérale, Rotation axiale, d'après [10]

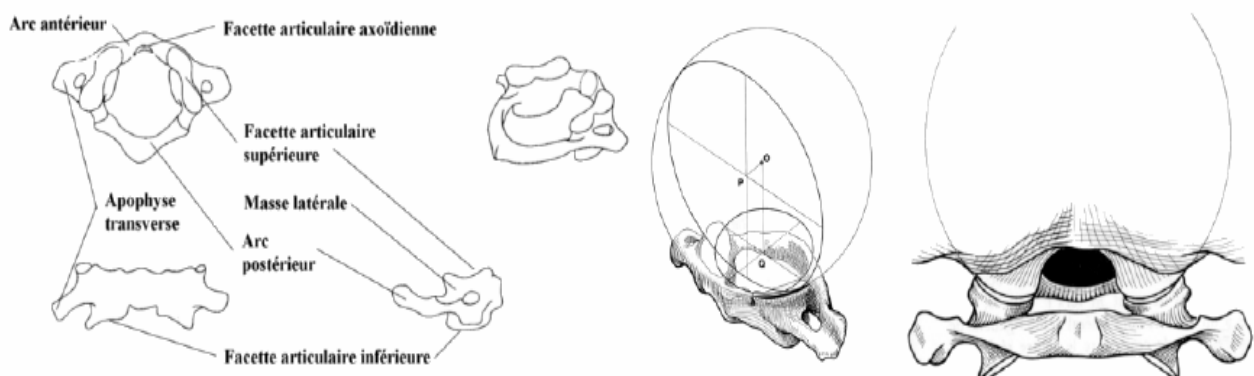




**Figure I.8.** Occipital face exocrânienne et endocrânienne (d'après [3])

b) L'atlas ou C1 :

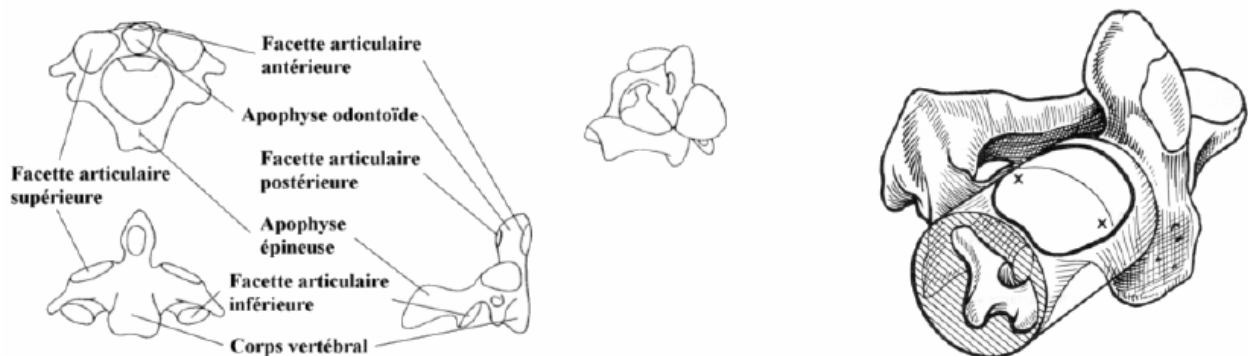
L'atlas a la forme d'un anneau plus large transversalement que sagittalement. Il comprend deux masses latérales portant chacune deux surfaces articulaires, une supérieure et une antérieure (figure I.8). Les facettes articulaires supérieures sont concaves dans les deux sens et articulées avec les condyles de l'occipital. Les facettes articulaires inférieures sont convexes d'avant en arrière et articulées avec les facettes supérieures de l'axis. L'arc antérieur porte également, sur sa face postérieure, une petite facette cartilagineuse s'articulant avec l'odontoïde de l'axis.



**Figure I.9.** Atlas, vues supérieure, antérieure, latérale et de trois-quarts (d'après [5]), Articulation C0C1 (d'après [3]).

c) L'axis ou C2 :

L'axis comporte un corps vertébral surmonté en son centre d'une saillie volumineuse : l'odontoïde (figure 1.9). Ce processus possède une facette articulaire antérieure qui s'articule avec celle de l'arc antérieure de l'atlas. Il comporte, également, une facette articulaire postérieure, qui permet l'articulation de l'odontoïde avec le ligament transverse. Les facettes articulaires supérieures, de chaque côté de l'odontoïde, sont convexes d'avant en arrière et s'articulent avec celle de l'atlas. Kapandji [1] les décrits comme étant situées sur un cylindre (figure I.9). Au niveau inférieur de la vertèbre, au dessous des lames, on trouve les facettes articulaires inférieures. Elles sont similaires en forme et orientation à celles du rachis cervical inférieur et sont en contact avec les surfaces articulaires supérieures de C3.



**Figure I.10.** Vues supérieures, antérieure, latérale et de trois-quarts (d'après [6]), Surface articulaire (d'après [1]).

Processus épineux et un trou vertébral (figure I.10). Le plateau supérieur du corps est limité latéralement par les processus unciformes. Le plateau inférieur présente des échancrures latérales pour les processus unciformes de la vertèbre sous-jacente.

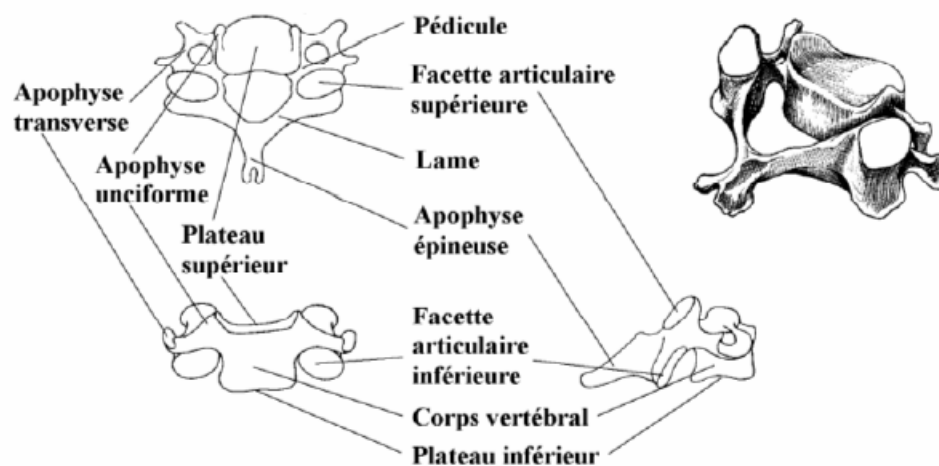
#### d) Les vertèbres cervicales type C3 à C7 :

Ces vertèbres sont de forme identique [7]. Cependant leur taille croit de C3 jusqu'à C7. Chaque vertèbre comprend un corps, deux pédicules, deux processus articulaires, deux processus transverses, deux lames, un processus épineux et un trou vertébral (Figure I.11). Le plateau supérieur du corps est limité latéralement par les processus unciformes. Le plateau inférieur présente des échancrures latérales pour les processus unciformes de la vertèbre sous-jacentes. Les pédicules relient le

corps vertébral aux processus articulaires. Les processus articulaires forment une colonne osseuse verticale reliée au corps de la pédicule et dont les faces supérieures et inférieures sont taillées au biseau. Ces faces de formes ovales sont recouvertes de cartilage. Selon les auteurs, elles sont planes ou légèrement convexes. Les processus transverses sont fixés sur la face latérale du corps vertébral et sur une partie du pédicule. Les lames sont inclinées en bas et en arrière et s'étendent des processus articulaires au processus épineux. Le processus épineux est formé par la réunion des deux lames, son sommet est bituberculeux.

### I.3.2. Dimensions des vertèbres cervicales

Les caractéristiques géométriques des vertèbres cervicales ont été étudiées par différents auteurs, donnant des valeurs numériques pour les principales dimensions. Plusieurs auteurs donnent des synthèses de l'ensemble de ces mesures et les complètent pour le rachis cervical inférieur et supérieur, respectivement. On peut aussi noter une étude, spécifique et très détaillée, sur les facettes articulaires réalisée par Panjabi [13]



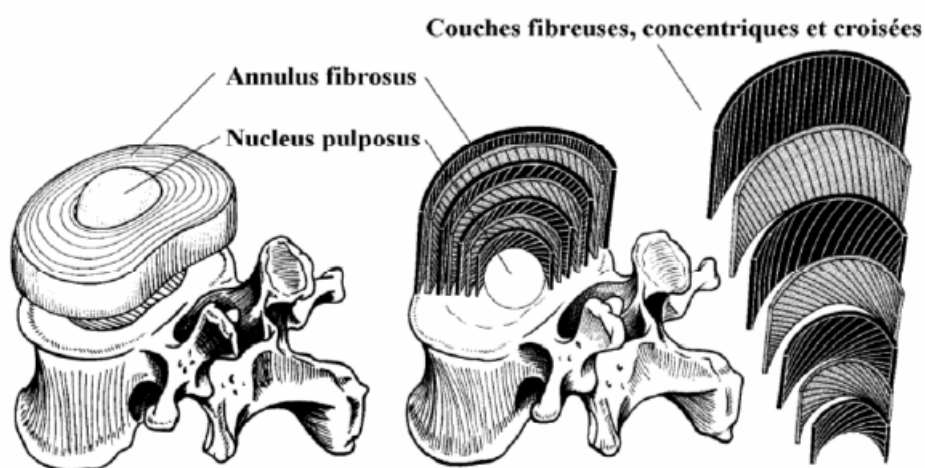
**Figure I.11.** Vertèbre cervicale, vues supérieure, antérieure et latérale (d'après [11]), Vue de trois-quarts (d'après [10]).

### I.3.3. Les disques intervertébraux

Ils sont entre les plateaux inférieurs et supérieurs des corps vertébraux de deux vertèbres adjacentes. Leur structure en deux parties est très caractéristique (figure I.12). Dans sa partie centrale, le disque est constitué d'une substance gélatineuse, transparente : le nucleus pulposus ou noyau, composé de 70 à 90% d'eau. Il serait

situé dans la partie postérieure du disque, d'après [25, 22]. A la périphérie, entourant le noyau, on trouve l'annulus fibrosus ou anneaux fibreux, il est composé de fibres collagènes incluses dans du fibrocartilage. Il peut être considéré comme un composite multicouches. Dans chaque couche, les fibres de collagène sont orientées dans le même sens mais cette orientation change d'une couche à l'autre. L'angle que forment les fibres avec l'horizontale varie de + 20 à + 45 degrés (d'après [15]). Sous une traction de 500 N la contrainte discale s'annule (d'après . Le noyau possède une pression intérieure de 0.15 à 1 MPa.

Les dimensions des disques ont été mesurées par plusieurs auteurs, leurs valeurs moyennes sont rapportées par [25]. La hauteur moyenne de l'espace intervertébral vaudrait 1/3 et 2/5 de la hauteur moyenne du corps vertébral. La hauteur antérieure des disques est également plus importante que la hauteur postérieure.



**Figure I.12.** Représentation du disque intervertébral (d'après [7])

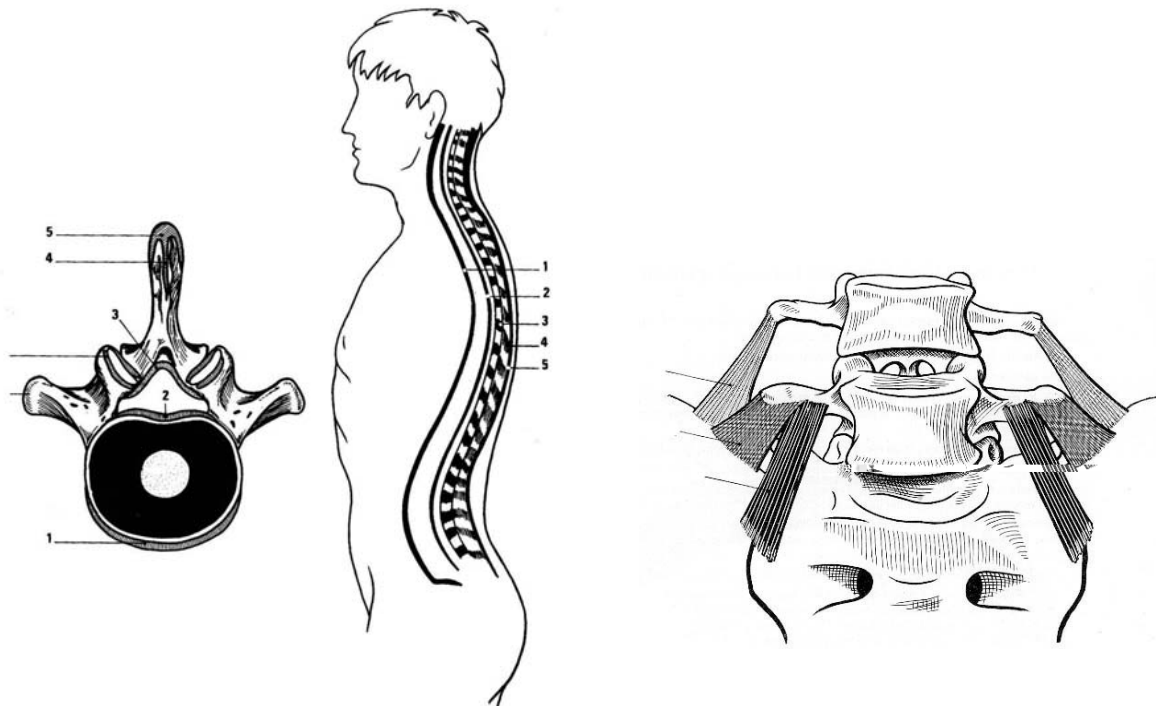
#### I.3.4. Les ligaments

Ligament vertébral commun antérieur (1) : il va de l'occiput et du tubercule antérieur de l'atlas jusqu'au sacrum. Il s'élargit graduellement de haut en bas en adhérant fortement aux corps vertébraux. Il est à note que suivant les auteurs, il adhère (d'après [5]) ou non (d'après [13]) aux disques.

- Ligament vertébral commun postérieur (2) : il part du corps de l'axis en prolongement du ligament occipito-axoïdien (membrana tectoria) et finit sur le

coccyx. Il adhère fortement aux corps vertébraux sur leurs bords inférieurs et supérieurs ainsi qu'aux disques sur lesquels il forme des plaques en forme de losange.

- Ligaments jaunes (3) : ils relient les arcs postérieurs entre eux et délimitent les trous de conjugaison. Ils sont sous tension même au repos et sont fortement étirés lors de flexion.



**Figure I.13.** Ligaments du Rachis d'après [5, 23]

-Ligaments inter-épineux (4) : ils sont tendus entre les apophyses épineuses.

-Ligament sur épineux (5) : c'est une longue et fine bande conjonctive partant de C7 jusqu'au sacrum. Il établit une liaison continue entre les vertèbres et le sacrum en passant sur toutes les épineuses.

-Ligaments inter-transversaires : ce sont des ligaments courts qui relient les apophyses transverses entre elles.

-Ligaments courts : ils relient les disques intervertébraux voisins et sont tendus parallèlement au ligament vertébral commun antérieur. Ligaments inter-épineux (4) : ils sont tendus entre les apophyses.

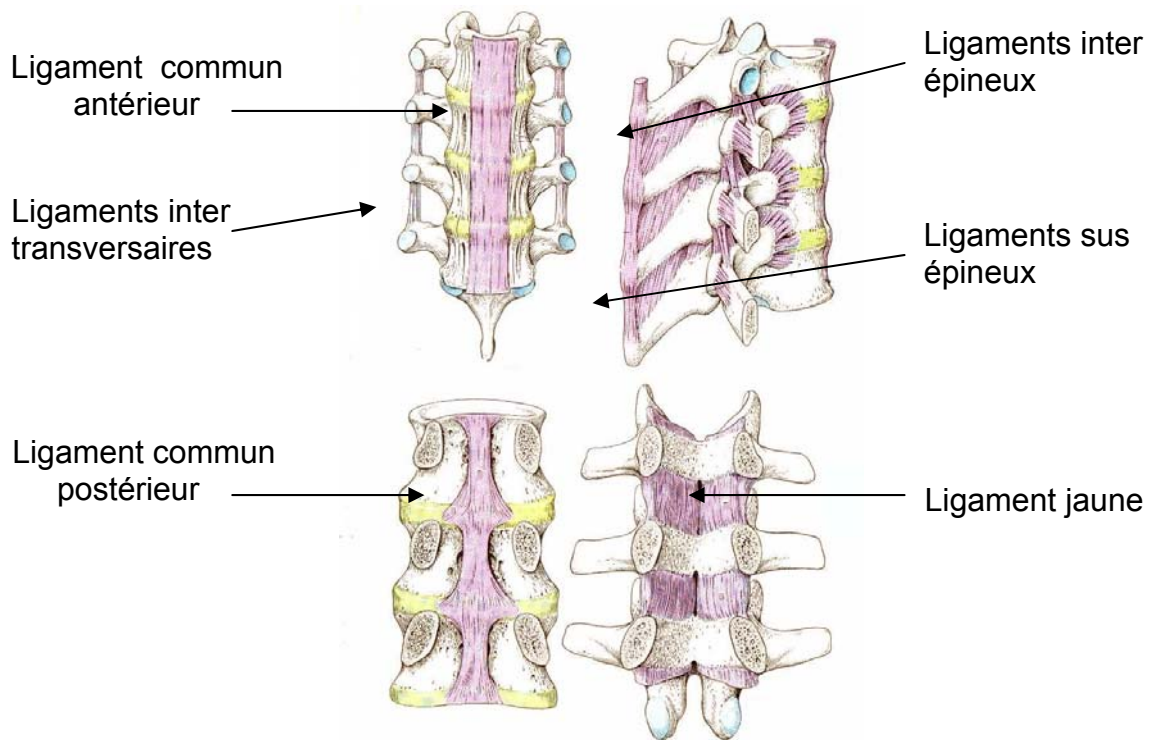


Figure I.14. Ligaments inter-vertébraux d'après [8]

Dans ce qui suit les ligaments existants au niveau des parties inférieures et supérieures du rachis cervical.

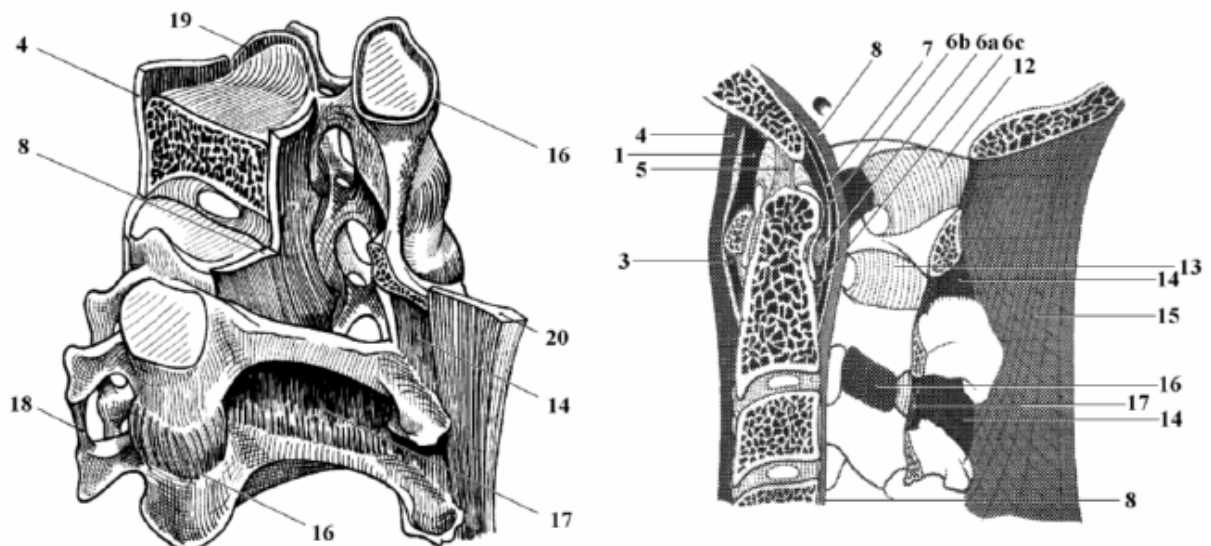


Figure I.15. Ligaments du rachis cervical inférieur et vue latérale globale, (d'après [8]) (Les repères se rapportent au tableau I.1) ci dessous

### I.3.5. Les muscles

L'étude de la musculature du cou est complexe, d'une part de par le grand nombre de muscles (entre 50 et 60 paires) qui la constitue mais également du fait que l'action de nombre de ces muscles est multiple et dépend entre autres de la position du rachis lorsqu'il est sollicité. Les muscles du cou, répartis de manière symétrique par rapport au plan sagittal, assurent les fonctions d'équilibre de la tête, de mobilisation de celle-ci, mais également de manchon protecteur et raidisseur du rachis pour certains muscles profonds, et de proprioception pour certains petits muscles comme ceux de la région sous-occipitale. La démarche de modélisation (et de personnalisation de ces muscles s'accompagne d'un travail de classification et de simplification a été faite par [15] dans lequel une description de la cartographie de 12 groupes musculaires a été présentée, regroupés par région :

1. Muscles rachidiens céphaliques
  - Obliquus capitis superior
  - Obliquus capitis inferior
  - Rectus capitis posterior major
2. Muscles rachidiens "purs" dorsaux
  - Splenius et sacro-transversaires (Splenius capitis, splenius cervicis, longissimus Cervicis, longissimus capitis, iliocostalis cervicis)
  - Tranverso-spinal (Semi-spinalis cervicis, multifidus, inter-spinales cervicis)
3. Muscles scapulo-rachidiens
  - Levator scapulae
  - Rhomboidus
  - Trapezius
4. Muscles céphaliques ventraux
  - Sterno-cleido-mastoïdeus
5. Muscles costo-vertébraux ventraux et latéraux
  - Scalenus (Scalenus ventralis, scalenus medius, scalenus dorsalis)
6. Muscles rachidiens ventraux-latéraux
  - Rempart convexitaire (Rectus capitis anterior major, longus colli)

Ces groupes musculaires se retrouvent une section IRM (Imagerie à Résonance magnétique) (d'après [10]).

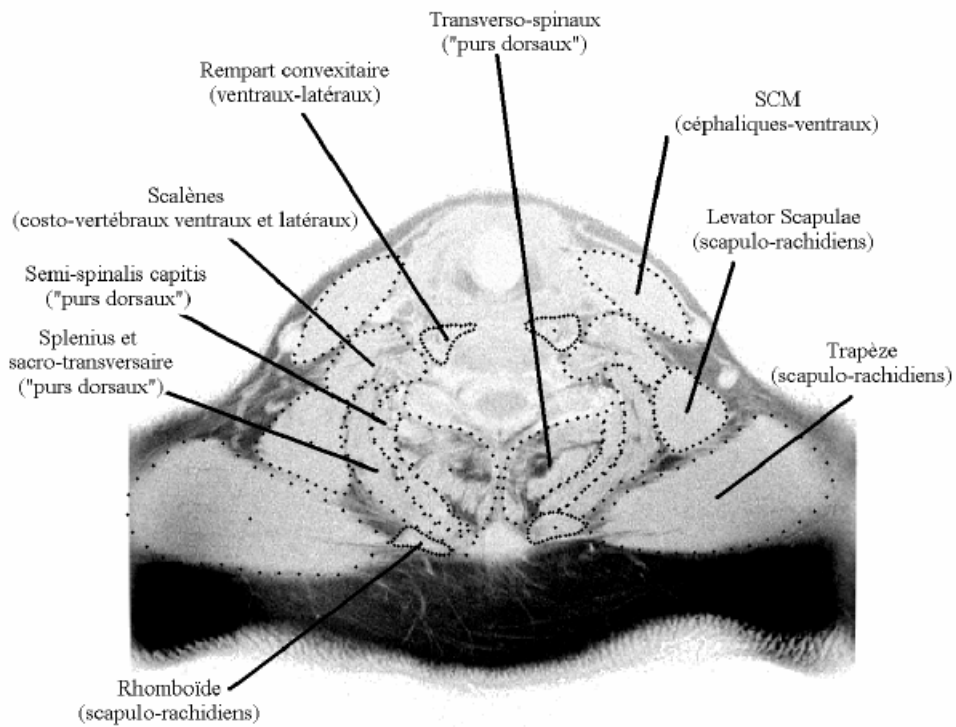


Figure I.16. Coupe IRM au niveau C4 et groupes musculaires associés d'après [10]

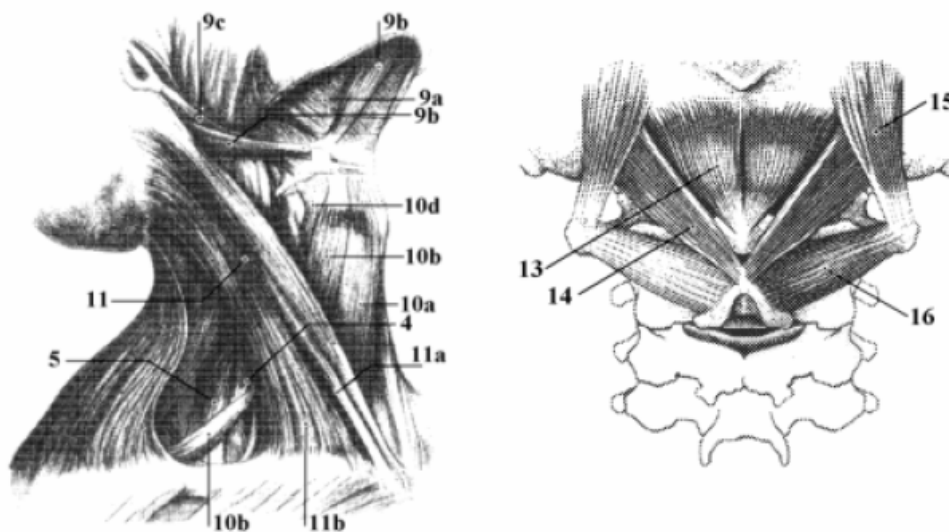
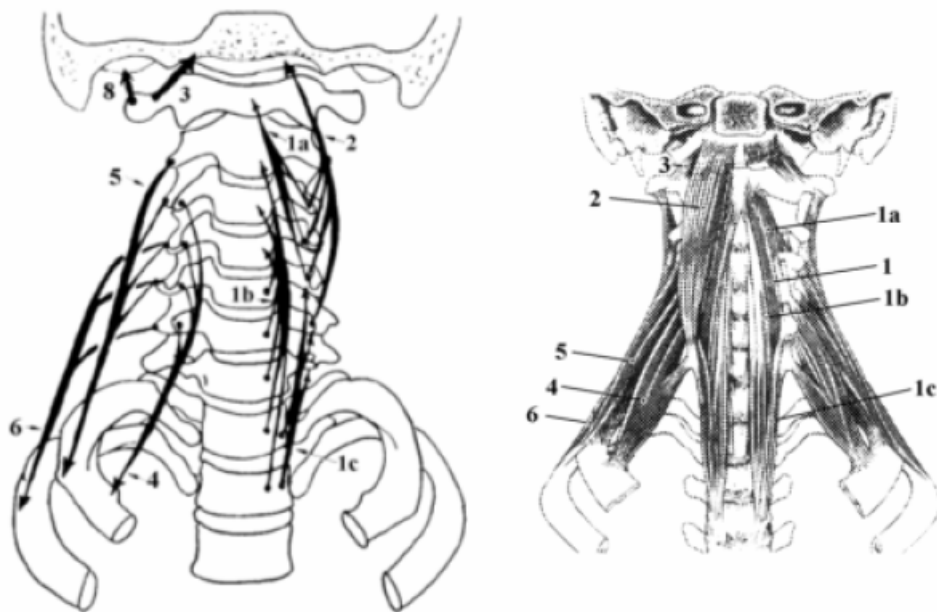


Figure I.17. Muscles Sterno-Cléïdo-Mastoïdien et du triangle de Tillaux [6,14]

Les repères se rapportent au tableau 1.2





**Figure I.18.** Muscles ventraux du cou, d'après [14],

Les repères se rapportent au tableau 1.2

#### **I.4. Spécificités du comportement du cou**

##### **I.4.1. Propriétés du comportement du cou**

Les caractéristiques mécaniques d'un matériau solide déformable sont généralement données sous formes d'équations constitutives dont les paramètres inconnus sont estimés d'après les expérimentations. Le comportement d'un matériau est représenté par exemple par des courbes : force-déplacement, contrainte-déformation, caractérisées par les valeurs numériques : raideur, module d'Young, effort et déformation à la rupture, etc.... Les structures biologiques se caractérisent par des comportements mécaniques complexes dont les deux caractéristiques fondamentales sont : La non linéarité et la viscoélasticité [.

##### **I.4.1.1. Comportement non-linéaire**

Les courbes donnant la force en fonction du déplacement (ou la contrainte en fonction de la déformation), lors d'essais quasi-statiques, les structures biomécaniques ( comme une unité fonctionnelle, un ligament ou encore un muscle passif) sont non linéaires et ont souvent une forme sigmoïdale .

#### **I.4.1.2. Comportement visco élastique**

Lors d'un chargement à vitesse de déformation constante et en restant dans la zone linéaire, puis d'un déchargement à la même vitesse, on observe un hystérésis due à la perte d'énergie dans le processus [17]. Lors d'un essai de relaxation (allongement rapide puis maintien à une longueur constante supérieure à la longueur initiale) on observe que la force décroît en fonction du temps. Ces propriétés confèrent aux structures biomécaniques des caractéristiques viscoélastiques autrement dit, elles sont capables de dissiper de l'énergie sans que leur structure en soit significativement affectée.

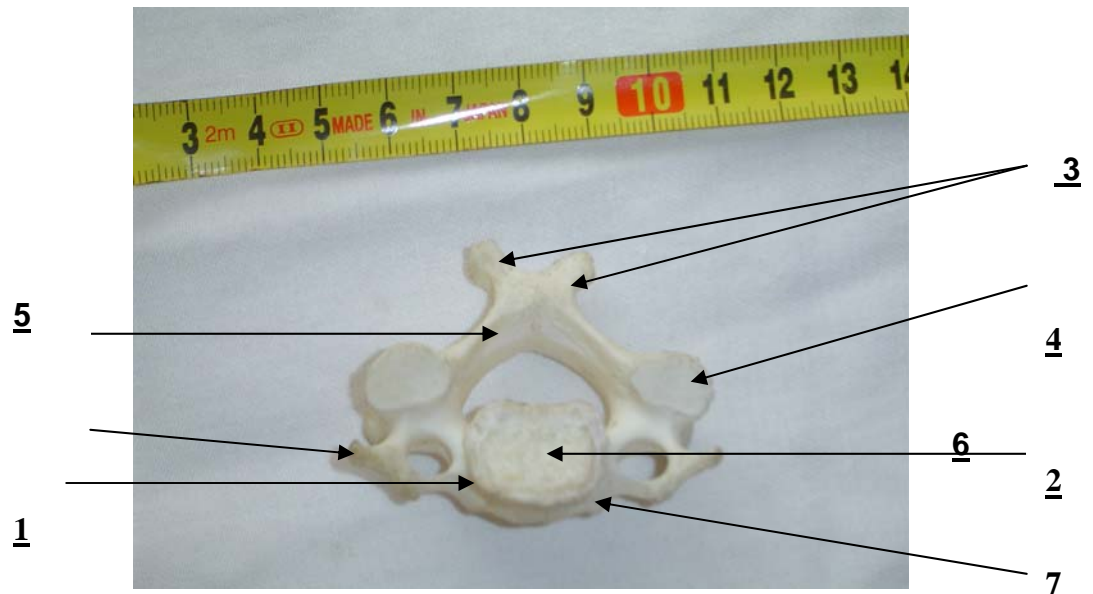
#### **I.4.1.3. Vertèbres**

Les vertèbres sont caractérisées par un comportement mécanique anisotrope, on les retrouve aux niveaux lombaire, thoracique ou cervicale inférieure et sont composées des mêmes parties. Cependant il existe d'importantes différences d'ordre morphologique [24].

Une vertèbre cervicale C5 (Figure I.19) comprend le corps vertébral (1), le plateau articulaire (2), les facettes articulaires supérieures (4) et les apophyses unciformes (7) qui sont constitués d'os cortical dense et résistant, sur lequel s'attachent les apophyses épineuses (3) et les apophyses transverses (6) reliées par les lames (5). Ces dernières participent à la liaison intervertébrale. Enfin, l'espace délimité par l'arc postérieur et le corps vertébral constitue le canal médullaire dans lequel passe la moelle épinière.

Il existe deux types de surfaces articulaires :

- Les plateaux vertébraux recouverts de cartilage qui accueillent l'articulation discale.
- Les surfaces articulaires, situées sur les apophyses articulaires.



**Figure I.19.** Vertèbre cervicale C5

Les caractéristiques mécaniques des vertèbres selon [22] sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Caractéristiques mécaniques	Module d'Young (Mpa)	Module de Cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Rigidité (N/m)
Os cortical	12000	4615	0.3	
Os spongieux	68.7-100	41	0.14-0.2	
Os spongieux				180

**Tableau I.1.** Caractéristiques de l'os [24]

#### I.4.1.4 Le disque intervertébral

Le disque joue un rôle important dans la mécanique du rachis tant dans les mouvements statiques que dynamiques. Cependant ses caractéristiques ont été rapportées par plusieurs auteurs :

Sollicitations	Compression (N/m)	Traction (N/m)	Cisaillement (N/m)	Torsion (Nm/d°)
Moroney [20]	500		60	0.42
Yoganandan [21]	640 -970	22-82		

**Tableau I.2.** Caractéristiques mécaniques des disques intervertébraux cervicaux

#### **I.4.1.5. Les ligaments**

Ils ont pour rôle de permettre des mouvements physiologiques d'une vertèbre par rapport à une autre, de procurer la stabilité du rachis lors des mouvements physiologiques et de protéger la moelle épinière en limitant les mouvements non physiologiques (chocs de toute nature). Le comportement des ligaments du rachis cervical sont non linéaire et visco élastique.

Plusieurs auteurs se sont penchés sur l'étude des caractéristiques mécaniques des ligaments. Les auteurs [21], [22] et [24] proposent des caractéristiques (valeurs expérimentales) concernant tous les types de ligaments au niveau cervical supérieur et inférieur.

Yoganandan [21] publie une résultats intéressant concernant la vitesse de sollicitation et la raideur ligamentaire. À partir des essais, il aboutit à ce que ces deux paramètres sont proportionnels.

#### **I.4.1.6. Les muscles**

Le muscle au niveau cervical présente un comportement passif et actif : le muscle passif possède des caractéristiques typiques des structures biologiques à savoir une non linéarité viscoélastique [17]. On pourra affirmer qu'ils ont une action antagoniste, en d'autres termes lorsque l'un se contracte l'autre se relâche.

### **I.5. Comportement d'une unité vertébrale fonctionnelle (UVF)**

Plusieurs essais ont été menés par divers auteurs sur les UVF afin de mesurer l'amplitude des mouvements intervertébraux. Lors des ces expérimentations la vertèbre inférieure demeure immobile et la vertèbre supérieure est soumise à des efforts et moments autour des 3 axes définissant les plans anatomiques l'obligeant ainsi à effectuer certains déplacements. Ce qui est à noter pour le cas par exemple de la rotation axiale nous retrouvons plusieurs mouvements induits tels que la flexion, l'inflexion et l'extension.

Ce genre d'expériences a été mené dans le cadre de notre thèse pour un autre but, celui de mesurer les effets tribologiques inter apophysaire.

Concernant le rachis cervical et plus précisément le rachis cervical supérieur, celui-ci présente une spécificité : la zone neutre ou la rigidité est faible voire quasi-nulle. Ainsi [15] a effectué plusieurs opérations de charges/décharges lors des expérimentations avec la définition préalable de la zone neutre comme la valeur de rotation obtenue à partir du troisième chargement/déchargement. Chaque mesure est effectuée à partir de cette zone de raideur nulle, donnant à ses courbes une forme caractéristique avec une zone neutre au centre.

Les amplitudes des mobilités intervertébrales ont fait l'objet de plusieurs travaux parmi lesquels nous citerons Watier [24]. La synthèse des valeurs obtenus montrent une légère différence entre les mesures in vitro et in vivo mais globalement la répartition est la même.

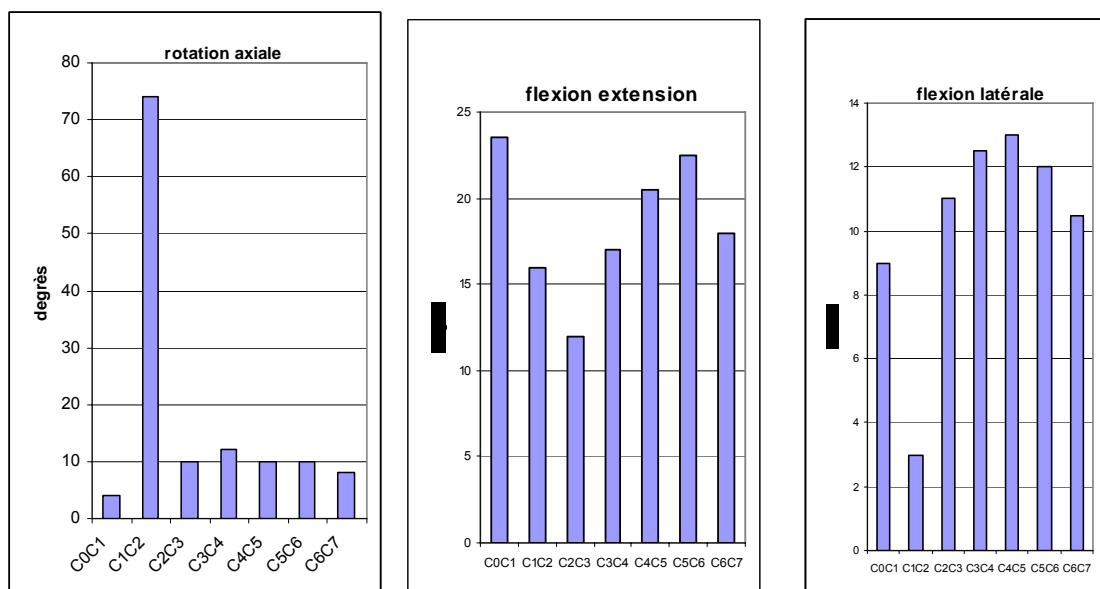


Figure I.20. Mobilités in vivo par UVF selon les divers mouvements d'après [24].

Il y a lieu de remarquer dans le cas de la rotation axiale le pic prépondérant correspondant à la mobilité de 74° pour l'U.V.F C<sub>1</sub>C<sub>2</sub>.

## B. PLANIFICATION STATISTIQUE DES EXPERIENCES

### I.6. Méthode de planification extrême des expériences :

### **I.6.1. Introduction :**

La modélisation expérimentale se base sur les méthodes statistiques des plans d'expériences, elle a pour objectif d'analyser le traitement des données expérimentales et elle est efficace pour l'étude de processus comportant plusieurs variables indépendantes. Ici, les paramètres varient simultanément suivant le plan d'expérimentation, contrairement à la méthode Newtonienne [29].

Les facteurs à étudier peuvent avoir deux, trois ou plusieurs niveaux selon les conditions d'expériences et la précision de mesure. Habituellement, ces facteurs ont différentes unités de mesure, c'est pourquoi le plan d'expériences est constitué sur la base des valeurs codées.

Les méthodes statistiques des plans d'expériences ont fait l'objet d'une grande préoccupation par Ronald Aylmer Fisher, en Grande Bretagne en 1919 [30]. Ces méthodes ont pour but l'analyse des traitements des données expérimentales.

Le problème qui se pose est de connaître la loi reliant le phénomène aux variables considérées. Pour y répondre, une expérimentation est nécessaire. Lors de l'expérimentation, différentes valeurs seront données aux variables envisagées afin de connaître leur influence sur le phénomène.

Une fois le modèle mathématique est obtenu (équation de régression), on procède à l'analyse statistique des résultats. Cette analyse a pour but de vérifier la signification des coefficients de régression et l'adéquation du modèle.

Au regard des avantages Nous allons appliquer cette méthode pour la modélisation de l'usure au niveau d'une unité vertébrale fonctionnelle. En effet, nos expériences seront basées sur un certains nombre de paramètres que nous allons définir par la suite afin de caractériser le comportement de l'usure adhésive interpopysaire.

### **I.6.2. Plan d'expériences**

L'expérimentateur est confronté par le choix d'un plan d'expériences, lui permettant d'aboutir au résultat cherché sans exiger un nombre élevé d'essais [31].

Dans la pratique, on utilise une équation linéaire en priorité, selon la nécessité on passe au degré le plus élevé [32].

Plusieurs plans d'expérimentations peuvent être envisagés selon le choix de l'expérimentateur et le degré de précision de l'expérience. A titre d'exemple, on peut citer:

#### I.6.2.1. Le plan d'expériences de premier ordre

##### a) Plan d'expériences de type $2^k$

Dans un plan d'expériences de type  $2^k$ , chaque facteur comprend deux niveaux avec les valeurs +1 et -1. Si  $k=3$  les points d'expériences se trouvent sur les sommets d'un cube. On constate que l'air de l'optimum se situe au niveau de la surface ombrée (Figure I.21).

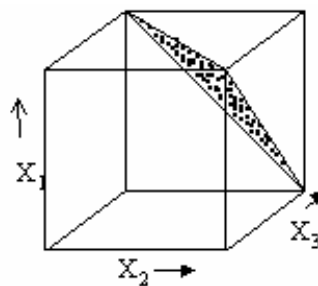


Figure I.21. Représentation du plan de type  $2^3$

##### b) Plan d'expériences simplifié de type $2^{k-p}$ :

Pour l'étude de quatre, cinq ou plusieurs paramètres, les plans d'expériences de type  $2^k$  nécessitent un nombre important d'expériences. A cause des interactions de faibles influences, il y a possibilité de réduire le nombre d'expériences. Un plan de type  $2^7$  nécessite 128 expériences, il pourra être remplacé par un plan simplifié de type  $2^{7-4}$  par exemple pour devenir un plan de type  $2^3$  nécessitant huit expériences seulement avec une précision peu réduite.

#### I.6.2.2. Le plan d'expériences de deuxième ordre :

On utilise un plan de deuxième degré généralement lorsque le modèle mathématique issu d'un plan de premier ordre n'est pas adéquat, malgré les répétitions des expériences douteuses.

Les plans de deuxième ordre nécessitent un temps considérable, c'est pour ça qu'uniquement les paramètres les plus influents seront maintenus.

a)- Plan d'expériences de type  $3^k$  :

Dans une expérience de type  $3^3$  par exemple, chaque paramètre comprend trois niveaux (Figure I.22), avec les valeurs -1, 0, et +1, et en cas de nécessité, il peut avoir jusqu'à cinq niveaux  $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$ . Pour le cas général de k paramètres, la matrice prend la forme représentée dans le tableau 1.

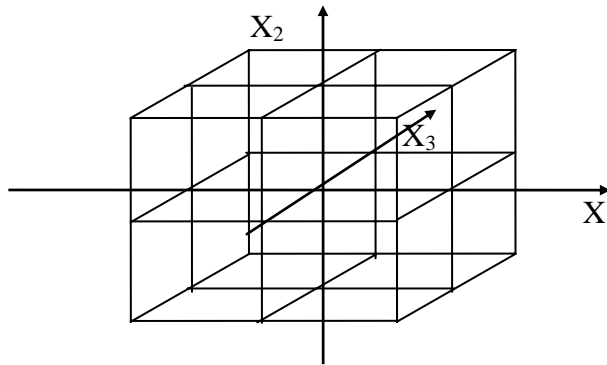


Figure I.22. Plan d'expériences du type  $3^3$

N° Ex p.	Matrice des variables indépendantes								Matrice de réponse			
	Matrice du plan			$x_1^*$		$x_k^*$		$x_1^2-2/3 \dots x_k^2-2/3$		1	2	3
$x_1$	$x_2$	$x_k$	$x_1$	$x_2$	$x_i$	$x_j$	$\dots$	$x_{k-1}$	$x_k$			
1	-1	-1..	-1	+1	.	-1			1/3	1/3		
2	+1	-1..	-1	-1		+1			1/3	1/3		
n	0	0 ..	0	0	....	0			-2/3	-2/3		
	$b_1$	$b_2$	$b_k$	$b_{12}$	$b_{ij}$	$b_{k-1;k}$			$b_{11}$	$b_{kk}$		

Tableau I.3. Matrice standard pour un plan de type  $3^k$  [30]

b)-Un plan d'expériences de type  $2^k 3^{k'}$  :

On utilise un plan de ce type lorsqu'on attend des effets quadratiques de quelques paramètres seulement et non pas des autres. De la même procédure



effectuée sur le plan  $2^3$ , un plan de type  $3^5$  nécessite 243 expériences, il peut aussi avoir la forme  $(2^3 \cdot 3^2)$  pour effectuer 72 expériences seulement. On peut encore remplacer le plan  $2^3$  par  $2^{3-1}$ , pour enfin réaliser 36 expériences seulement au lieu de 72.

$$Y(X_1, X_2, \dots, X_k) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \dots$$

(1.1)

avec:

$$\beta_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}; \beta_{ij} = \frac{\partial^2 Y}{\partial X_i \partial X_j}; \beta_{ii} = \frac{\partial^2 Y}{\partial X_i^2}; \dots$$

Suivant la nécessité de précision, on peut développer la série Taylorienne avec des puissances plus élevées  $X^3, \dots, X^k$ .

Généralement, dans la pratique on utilise l'équation sous forme linéaire en priorité, et selon la nécessité on passe au degré plus élevé.

On doit effectuer des expériences suivant le plan choisi, pour aboutir à un système linéaire de type:

$$Y_i = \beta_i X_{ij} \quad (1.2)$$

ou sous forme:

$$X \cdot \beta = Y \quad (1.3)$$

avec:

X : matrice des données d'entrée

 $\beta$  : matrice des coefficients de régression

Y : matrice des données de sortie

La résolution de cette matrice amène à des résultats approchés du phénomène à étudier, et pour parvenir à des résultats précis et simplifiés, on doit assurer les conditions suivant la loi de Gaus-Markov:

$$(X^T \cdot X) \cdot \beta = X^T \cdot Y \quad (1.4)$$

où :  $X^T$  est la matrice transposée de X.

### I.6.2.3. Le modèle mathématique

Lorsqu'on utilise les méthodes statistiques, le modèle mathématique se présente sous la forme d'un polynôme, qui est une troncature de la série de Taylor en laquelle se développe la fonction inconnue [30,31,32].

Si les facteurs d'entrée  $X_1, \dots, X_k$  sont indépendants dans toutes les expériences, la matrice du produit  $X^T \cdot X$  est différente de zéro. Par suite il existe la matrice inverse  $(X^T \cdot X)^{-1}$ .

Box et Wilson [8] ont prouvé qu'en satisfaisant la matrice des données d'entrée avec les trois conditions

$$\begin{aligned}
 - \sum_{i=1}^N X_{0i} X_{ij}^2 &= 0 \quad ; \quad u \neq j \\
 - \sum_{i=1}^N X_{ij}^2 X_{iu}^2 &= 0 \quad ; \quad j \neq 0
 \end{aligned}$$

On doit vérifier, si le modèle mathématique satisfait les critères mathématiques (adéquation). Dans le cas échéant, on doit refaire les expériences suivant un modèle de puissance plus élevée (2<sup>ème</sup> ordre, 3<sup>ème</sup>, ...).

### I.6.2.4. Analyse de régression

Le modèle mathématique obtenu (équation de régression), on procède à l'analyse statistique des résultats. Cette analyse a pour but de vérifier la signification des coefficients de régression et l'adéquation de ce modèle.

L'algorithme de calcul est en annexe (1).

La détermination du modèle mathématique conduit à analyser le phénomène de l'usure des matériaux de substitution des disques intervertébraux. Le matériau que nous utiliserons sera le silicone élastomère pour ses qualités de tolérance envers l'être humain essentiellement.

## C) SILICONE ELASTOMERE

### I.7. présentation du matériau

Un silicone peut être défini comme un composé qui lie les éléments silicium et oxygène et des groupes organiques, le silicium étant présent en proportion suffisante pour affecter les propriétés du produit de façon sensible. L'expression « silicone » a initialement été appliquée à tout composé dans lequel il a présence de silicium, chaque atome de silicium étant entouré de deux atomes d'oxygène et de deux atomes de carbone [33]. Au fur et à mesure que l'étude de ses produits s'est développée, cette expression a peu à peu pris un sens plus général. Il s'agit d'une gamme synthétique de produits formulés selon les utilisations spécifiques. Leur couleur naturelle est jaunâtre. Ces matériaux sont dotés d'une bonne stabilité thermique (de -80° à +250°C), possèdent une bonne résistance chimique une bonne tenue au vieillissement naturel et de très bonnes propriétés d'antiadhérence ou d'adhésion. Parmi les caractéristiques des silicones on peut évoquer l'allongement à la rupture élevé (200-1000%) et leur perméabilité aux gaz est très appréciable.

Parmi les principales applications on pourra citer : Le domaine médical, l'industrie aéronautique et automobiles, les secteurs de l'électronique, mécanique et le bâtiment.

Les propriétés physiques des silicones ont fait que l'utilisation de ces produits s'est généralisée en médecine au cours des quatre dernières décennies. La silicone dans l'organisme humain est toujours exogène. Les molécules de silicone sont introduites dans le corps humain dès la naissance. On estime à environ 6g, la quantité de silicone présente dans l'organisme d'un adulte [27, 28]. L'emploi des silicones dans le secteur médical est au niveau des prothèses mammaires et prothèses de membres (pieds, mains), des implants et matériels tels que les cathéters et masques respiratoires, adhésifs.

## **I.8. CONCLUSION**

En tant que mécanicien de formation l'anatomie de la partie cervicale de l'être humain était incontournable. A travers cette description anatomique du rachis cervical nous avons voulu présenter tous les éléments constituant cette partie du corps humain et connaître leurs spécificités.

Cette rétrospective nous a permis de connaître et nous habituer aux termes médicaux décrivant les parties se trouvant dans cette partie du corps. A travers cette étude nous avons découvert que le rachis cervical se compose de deux parties distinctes à savoir le RCI et RCS (respectivement le rachis cervical inférieur et supérieur), sur un autre plan nous avons décelé que la forme et les dimensions des vertèbres, élément important pour notre recherche, étaient identiques de C3 à C7.

Nous nous sommes basés essentiellement sur la bibliographie pour élucider le comportement et les caractéristiques mécaniques des éléments formants l'unité vertébrale fonctionnelle à savoir l'os corticale, spongieux, le disque intervertébral, les ligaments et les muscles.

La nature du phénomène multivariable que nous voulons étudié, l'effet tribologique intervertébral, nécessite à notre sens l'utilisation des méthodes extrémales de planification des expériences. C'est la raison pour laquelle nous avons abordé ce moyen de calcul dans ce premier chapitre.

Nous allons entamer dans cette recherche le domaine médical, autrement dit le matériau biocompatible avec l'être humain et qui a fait ses preuves ; c'est bien le silicone élastomère.

Nous développerons en détail au cours du deuxième chapitre l'aspect expérimental de notre recherche, qui tourne autour de la quantification des effets tribologiques intervertébraux en considérant les mouvements naturels de la tête humaine.