

يملعنا ثحبلا و يلعنا ميلعتنا قرارو



BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Mécanique

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master 02

# Etude du comportement biomécanique du disque lombaire L4-L5 sain et dégénéré

Option :

Mécanique avancée

Par :

BOUSLAH RACHID

DIRECTEURE DE THESE : A.BOUARICHA Dr Université Badji Mokhtar-Annaba

DEVANT LE JURY :

Pr BEY KAMEL.....: Pr

Dr CHEMAMI A.NACER....: Mb

Dr BENAMIRA MOHAMED: Mb

Dr BOUARICHA AMAR.....: Mb

Année : 2016/2017

## Sommaire

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                                                                             | 1  |
| 1- Le Rachis .....                                                                                            | 6  |
| 1.1-Généralités .....                                                                                         | 6  |
| 1.1.1- Colonne vertébrale .....                                                                               | 6  |
| 1.2- Les fonctions de la colonne vertébrale.....                                                              | 7  |
| 1.3- Le rachis, une tige osseuse présentant des courbures .....                                               | 9  |
| 1.4- Configuration extérieure et inférieure d'après Testut .....                                              | 10 |
| 1.5- Le rachis, une charpente articulée.....                                                                  | 12 |
| 1.6- Caractères généraux des vertèbres .....                                                                  | 13 |
| 2- Les disques intervertébraux .....                                                                          | 19 |
| 2.1- L'anatomie du disque.....                                                                                | 19 |
| 2.1.1- La composition .....                                                                                   | 20 |
| 2.1.2- Le rôle des principaux composants dans la fonction discale.....                                        | 23 |
| 2.1.3-L'apport d'éléments nutritifs.....                                                                      | 25 |
| 2.1.4-Les pathologies.....                                                                                    | 26 |
| 2.1.5- Les facteurs de risque .....                                                                           | 26 |
| 2.2- La structure et la fonction de la région lombaire .....                                                  | 27 |
| 2.3- Les lombalgies .....                                                                                     | 29 |
| 2.3.1- La fréquence .....                                                                                     | 29 |
| 2.3.2- Les facteurs de risque au travail .....                                                                | 30 |
| 2.4- Comportement biomécanique du disque sain et dégénérer.....                                               | 31 |
| 2.4.1- Comportement mécanique du disque sain.....                                                             | 31 |
| 2.4.2 Comportement biomécanique du disque dégénéré .....                                                      | 34 |
| 2.4.3 Mobilité.....                                                                                           | 35 |
| 3-Biomécanique de la colonne lombaire.....                                                                    | 37 |
| 3.1-Introduction.....                                                                                         | 37 |
| 3.2- Caractéristiques du disque intervertébral .....                                                          | 37 |
| 3.3- Répartition des contraintes entre les articulations inter-corporelles et articulaires postérieures ..... | 39 |
| 3.4- Mouvements isolés des vertèbres lombaires .....                                                          | 41 |
| 3.5- Mouvement du complexe lombo-pelvien .....                                                                | 42 |
| 3.6-Modèle mécanique du comportement viscoélastique de la colonne vertébrale .....                            | 44 |
| 4-Etude de la réponse du disque intervertébral L4-L5 aux différentes sollicitations.....                      | 45 |
| 4.1- Introduction.....                                                                                        | 45 |

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 4. 2- Méthode .....                               | 45 |
| 4.2.1- Description du modèle.....                 | 45 |
| 4.2.2- Dessin du model .....                      | 46 |
| 4.2.3- Propriétés matérielles .....               | 48 |
| 4.2.4 - Protocole :.....                          | 48 |
| 4.3. Calcule numérique et Résultats .....         | 49 |
| 4.3.1 Calcule numérique .....                     | 49 |
| 4.3.2- Résultats déformations et contraintes..... | 50 |
| 4.3.3. Les contraintes .....                      | 51 |
| 4.3.4- Etude de la flexion.....                   | 53 |
| 4.4. Perspectives et améliorations .....          | 55 |
| 5. Conclusion : .....                             | 55 |



## Introduction

La lombalgie est une affection courante dans les populations en âge de travailler. Environ 80% des gens présentent une lombalgie à un moment ou à un autre de leur vie.

Dans toutes les catégories professionnelles, la lombalgie est l'une des causes les plus importantes d'incapacité de travail de courte ou de longue durée. En fonction de son étiologie, la lombalgie peut être classée en six groupes: mécanique, infectieuse (par exemple, tuberculose), inflammatoire (par exemple, spondylarthrite ankylosante), métabolique (par exemple, ostéoporose), néoplasique (par exemple, cancer) et viscérale (douleur causée par des maladies d'organes internes).

Chez la plupart des personnes, la lombalgie a une origine mécanique dont l'entorse lombosacrée, les maladies discales dégénératives, les spondylolisthésis, le rétrécissement du canal lombaire et les fractures.

Dans notre étude, Nous n'aborderons que la lombalgie d'origine mécanique. Ce type de lombalgie, que l'on appelle aussi lombalgie régionale, peut donner lieu à une douleur lombaire localisée ou irradiant dans une jambe ou dans les deux (sciatique).

Les lombalgies mécaniques ont la caractéristique d'apparaître épisodiquement et d'avoir, dans la plupart des cas, une évolution spontanée favorable. Environ la moitié des cas de lombalgie aiguë régresse en deux semaines et 90% en deux mois.

On estime qu'environ un cas sur dix devient chronique et c'est ce groupe de patients lombalgiques qui est responsable de l'augmentation importante des coûts dus aux troubles lombaires.

Dans ce qui suit nous allons essayer d'éclaircir certaines zones d'ombre sur ce phénomène en abordant cette étude dont l'intitulé est l'étude du comportement biomécanique d'un disque sain et d'un autre dégénéré à travers laquelle nous allons déterminer à partir des propriétés géométriques et mécaniques l'état de contrainte de déformation maximale au niveau du disque (partitionné en cinq zones) pour les différentes postures adoptées par l'être humain au cours de sa vie quotidienne comme étant les causes biomécaniques de la dégénérescence de ce disque qui provoque des disfonctionnement dans la colonne vertébrale.



La lombalgie

# **1- Le Rachis**

## **1.1-Généralités**

### **1.1.1- Colonne vertébrale**

La colonne vertébrale est une tige osseuse située à la partie postérieure du tronc, sur la ligne médiane ; elle est à la fois flexible et résistante. On la désigne encore sous le nom plus commun de rachis ou colonne rachidienne.

#### **La longueur et la largeur du rachis**

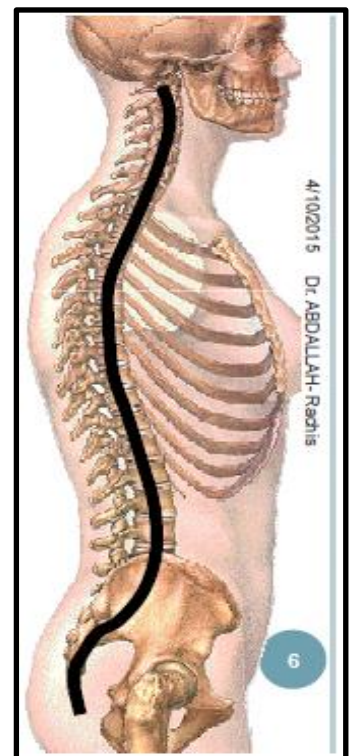
Le rachis s'étend de la base du crâne jusqu'à l'apex (pointe) du coccyx. – forme le squelette du cou et du dos ainsi que le principal composant du squelette axial (les os articulés du crâne et de la colonne vertébrale, les côtes et le sternum, (voir figure -1).

Chez l'adulte, la colonne vertébrale présente habituellement une longueur de 60 à 70 cm, dont un quart est constitué par les disques fibrocartilagineux qui à la fois séparent et unissent les vertèbres.

Chez l'homme de stature moyenne on va retrouver pour la portion lombaire 13 ou 14 cm ; pour la portion dorsale 27 à 29 ; pour la portion lombaire 17 ou 18 cm ; pour la portion sacro-coccygienne 12 à 15 cm.

Les dimensions longitudinales de la colonne vertébrale, relativement considérables chez l'enfant naissant, augmentent encore jusqu'à l'âge de 20 à 25 ans. Elles restent stationnaires chez l'adulte et diminuent ensuite chez le vieillard, par suite de l'affaissement des disques intervertébraux entraînant comme conséquence une exagération des courbures antéro-postérieures.

Entre la taille adulte de 20 ans et la soixantaine, elle perd environ 5 cm. En fait, chaque vertèbre est séparée de l'autre par un disque intervertébral, un cartilage riche en eau et résistant. Il participe à la stabilité du rachis. La différence de hauteur vient du fait qu'il perd une partie de son volume d'eau. Les disques intervertébraux sont constitués d'un anneau fibreux plutôt dense (l'annulus fibrosus), entourant un noyau central gélatineux appelé nucleus pulposus (ou noyau pulpeux).



**figure-1 : squelette de la colonne vertébrale**



**Figure 2 : radiographie de la colonne vertébrale**

### Largeur ou diamètre transverse

La colonne vertébrale présente son maximum de largeur au niveau de la base du sacrum, où elle mesure de 10 à 12 centimètres. Au-dessous de ce point, le diamètre transverse diminue graduellement : au-dessous, il descend jusqu'à zéro (à l'apex du coccyx) ; au-dessus, il mesure successivement 7 ou 8 cm sur la dernière lombaire, ou 7 cm sur la première lombaire, 5 à 9 cm sur la dernière dorsale, 6 ou 7 cm sur la première dorsale, 5 ou 6 cm sur l'axis. L'atlas, s'élargissant considérablement pour supporter la tête, atteint jusqu'à 8 cm. (voir figure 2 au rayon ci-contre)

### Épaisseur ou diamètre antéro-postérieur

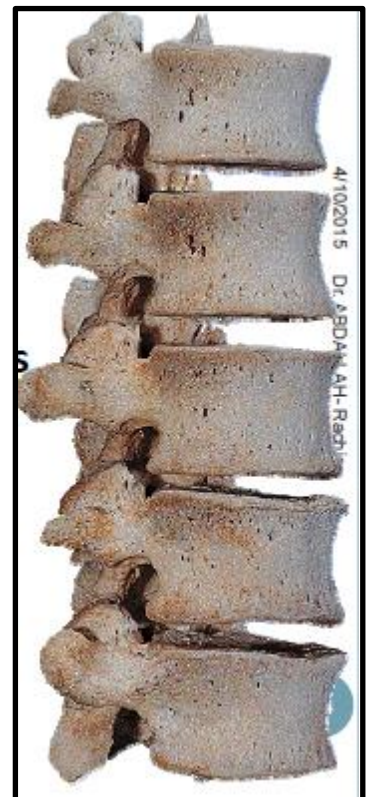
Le diamètre antéro-postérieur de la colonne vertébrale varie surtout avec le degré de projection postérieure des apophyses épineuses. Mesurant 4 cm à la région cervicale, il atteint 6 cm à la région dorsale et 7 cm au niveau du sacrum ou de la dernière lombaire. Au-dessus du sacrum, il diminue rapidement par suite de l'atténuation et de la disparition graduelle des apophyses épineuses et du canal vertébral.

Cet axe osseux, souple, comprend 33 à 34 vertèbres selon les individus. (7 cervicales, 12 thoraciques, 5 lombaires (figure 3), 5 sacrales et 4 coccygiennes.)

24 vertèbres sont mobiles : 7 cervicales, 12 thoraciques et 5 lombaires. Les vertèbres sacrales chez l'adulte sont fusionnées pour former le sacrum alors que les 4 vertèbres coccygiennes fusionnées forment le coccyx.

De haut en bas, la taille des vertèbres augmente progressivement jusqu'au sacrum, puis elle diminue graduellement jusqu'à l'apex du coccyx. Ces différences morphologiques sont en relation avec l'augmentation progressive de la charge du poids du corps jusqu'à ce que celle-ci soit transmise à la ceinture pelvienne au niveau des articulations sacro-iliaques

La colonne vertébrale assure des fonctions variées. Les pratiques artistiques pla fonctionnalité à sa dimension maximale comme dans les pratiques circassiennes (cirque), la danse etc. (voir figure -4) :



**figure 3 : 05 vertèbres lombaire**

- Elle sert de gaine protectrice à la moelle épinière qui transmet l'influx nerveux du cerveau à l'ensemble du corps.
- Elle joue un rôle d'absorption dynamique de choc. Entre chaque vertèbre, le disque vertébral remplit des fonctions d'amortisseur et de transmission des pressions à chaque mouvement et lors des efforts importants.
- Elle sert d'attache et de point d'appui au plus grand nombre des viscères. Elle est capable de se mouvoir dans tous les sens, permet l'accomplissement de gestes complexes (danse, musique, cirque, chant..)
- Elle pourvoit le corps d'un axe flexible et partiellement rigide tout en jouant le rôle d'un pivot pour la tête. Il joue par ailleurs un rôle important dans le maintien postural et la locomotion, le déplacement d'un endroit vers un autre.
- Elle participe aux mouvements corporels, organe dynamique : les vertèbres sont articulées les unes par rapport aux autres, ce qui permet un certain nombre de mouvements qui peuvent être de grande amplitude au niveau cervical (mobilité de la tête) mais moindres au niveau de la cage thoracique. Toute cette mobilisation vertébrale est rendue possible par l'existence de muscles qui vont assurer d'une part la statique et le maintien du rachis et d'autre part la mobilité.
- Elle soutient le poids de la tête (4,5 kg) et du corps et doit assurer une parfaite horizontalité du regard et du système équilibrant de l'oreille interne (labyrinthe). Organe statique, la colonne vertébrale supporte le poids du corps. Les contraintes mécaniques augmentent au fur et à mesure qu'on descend la colonne. La totalité est transmise via le sacrum aux ailes iliaques, puis aux 2 membres inférieurs par les articulations coxo-fémorales.
- Elle assure par l'harmonie de ses courbures une répartition des charges et des contraintes sur l'ensemble des vertèbres.
- Elle est dans son ensemble la principale autoroute de l'information nerveuse du corps humain. Derrière chaque disque intervertébral, des racines nerveuses constituent le départ des 31 paires de nerfs rachidiens rejoignant un organe ou encore un membre. Elles assurent la transmission au cerveau des sensations extérieures (nerfs sensitifs) et donnent également des ordres en provenance du cerveau aux différentes parties du corps (nerfs moteurs).



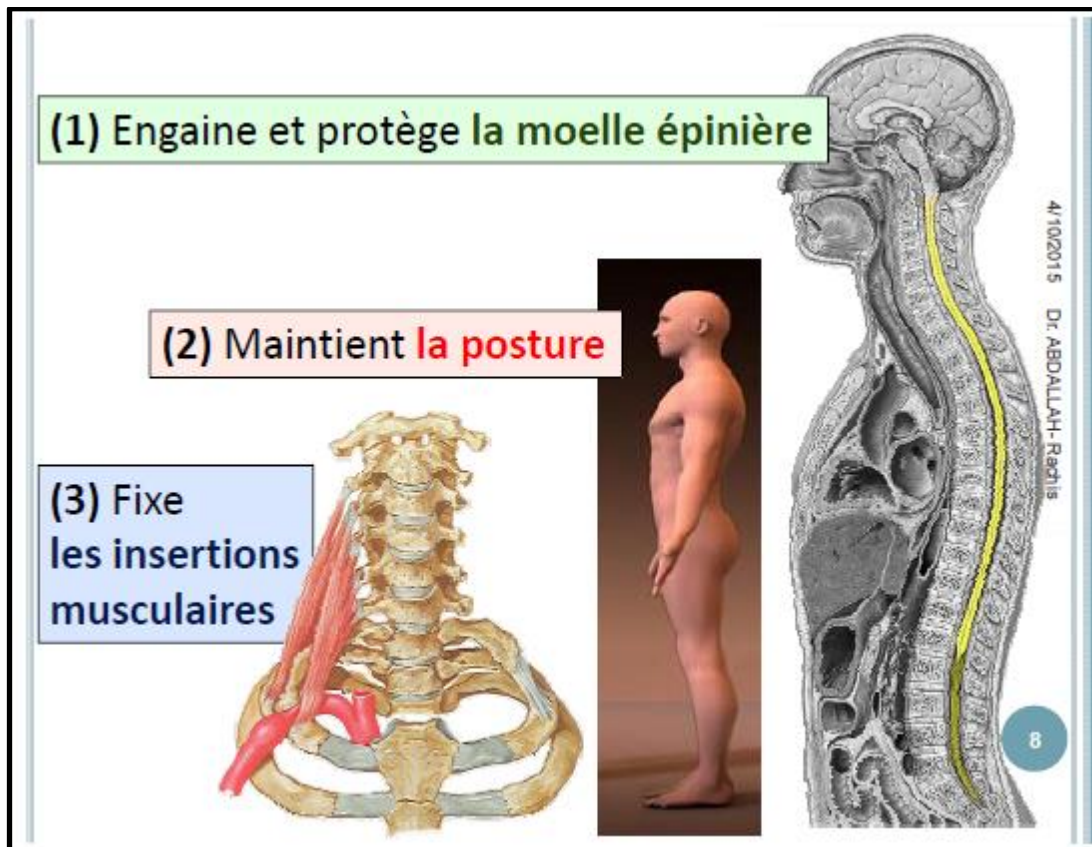


figure -4 : fonctions de la colonne vertébrale

### 1.3- Le rachis, une tige osseuse présentant des courbures

Chez l'adulte, la colonne vertébrale présente quatre courbures : cervicale, thoracique, lombaire et sacrale. Elle transforme la colonne en un support flexible comparable à un ressort (amortissement des chocs). Les courbures thoracique et sacrale (pelvienne) sont concaves vers l'avant tandis que les courbures cervicale et lombaire sont concaves vers l'arrière. Les courbures thoracique et sacrale sont des courbures primaires qui se développent pendant la période fœtale.

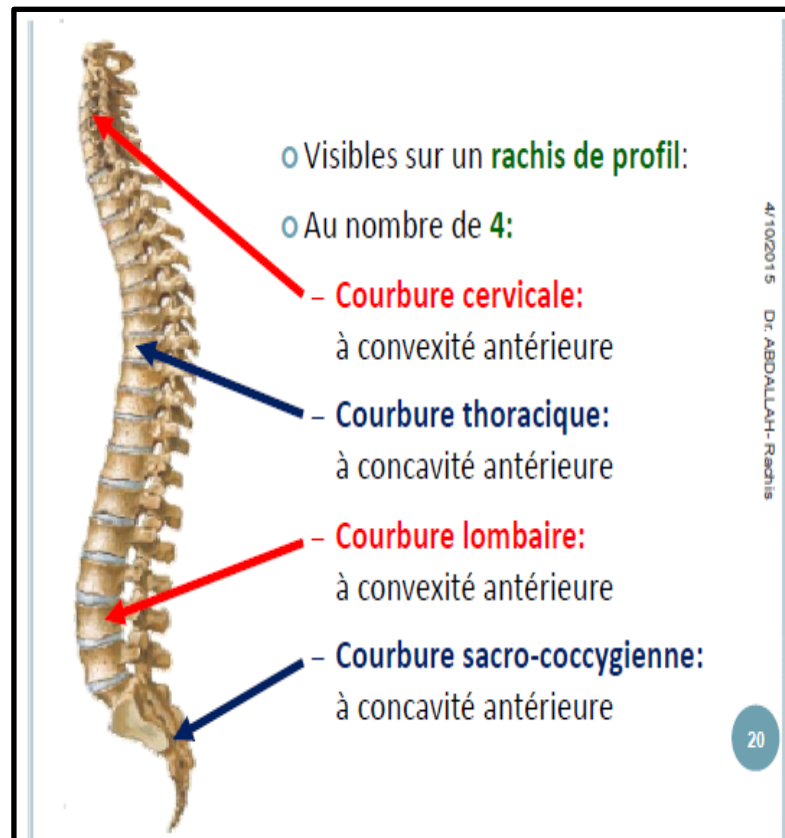
Elles résultent d'une différence de hauteur entre les parties antérieure et postérieure des vertèbres. En comparant les courbures sur figure 5, on remarque que les courbures primaires ont la même orientation que la courbure générale de la colonne vertébrale fœtale.

Les courbures cervicale et lombaire sont des courbures secondaires qui commencent à apparaître pendant la période fœtale, mais qui ne deviennent évidentes qu'à partir de la petite enfance. Les courbures secondaires sont principalement dues à des différences d'épaisseur entre les parties antérieure et postérieure des disques.

La courbure cervicale devient manifeste lorsque le nourrisson commence à tenir la tête droite. La courbure thoracique résulte du fait que les corps vertébraux de cette région sont légèrement cunéiformes. La courbure lombaire devient évidente lorsque le petit enfant commence à se tenir debout et à marcher. Elle est généralement plus prononcée chez la femme et se termine au niveau de l'angle lombo-sacral qui marque la jonction de la 5<sup>e</sup> vertèbre lombaire et du sacrum.

La courbure sacrale est également plus prononcée chez la femme que chez l'homme. Les diverses inflexions que présente la colonne vertébrale ont pour effet d'augmenter sa résistance, en

vertu du principe de physique que, de deux colonnes élastiques égales d'ailleurs, celle qui présente des courbures alternatives oppose plus de résistance aux pressions verticales que celle qui est rectiligne



**figure 5 : les quatre courbures de la colonne vertébrale**

#### 1.4- Configuration extérieure et inférieure d'après Testut

Il suffit d'un simple coup d'œil jeté sur la colonne vertébrale pour constater que cette longue tige osseuse est constituée, au point de vue morphologique, par deux pyramides, qui seraient réunies par leur base au niveau de l'articulation sacro-lombaire.

L'une de ces pyramides ou pyramide supérieure commence à la dernière lombaire et se termine à l'atlas. Elle est fort longue et comprend les trois premières régions, cervicale, dorsale et lombaire de la colonne vertébrale.

L'autre pyramide, ou pyramide inférieure s'étale surtout dans le sens transversal et s'étend de la base du sacrum au sommet du coccyx. Elle est, comme on le voit, beaucoup plus courte que la précédente.

La colonne vertébrale, étant essentiellement constituée par la superposition d'une série d'éléments osseux similaires, les vertèbres, présente comme ces dernières une configuration qui est fort irrégulière sans doute, mais dont les détails se déduisent facilement des descriptions qui précèdent. Nous lui considérons quatre faces et un canal central. (figure 6)



Figure 6 : différentes vues de la colonne vertébrale

### Face antérieure

Vue par sa face antérieure, la colonne vertébrale s'offre à nous sous la forme d'une tige cylindrique, que constitue l'ensemble des corps vertébraux. Dans les trois premières régions, cervicale, dorsale, lombaire, par la série alternante des disques fibreux intervertébraux. Dans la région sacro-coccygienne, où les vertèbres sont soudées entre elles, ces disques sont remplacés par de simples crêtes osseuses à direction transversale.

### Face postérieure

Vue par sa face postérieure, la colonne cérébrale nous présente, sur la ligne médiane tout d'abord, la série régulière des apophyses épineuses, formant par leur ensemble ce qu'on appelle la crête épinière. De chaque côté de la crête épinière et parallèlement à elle, s'étend deux gouttières profondes, les gouttières vertébrales, que limitent en dehors les extrémités régulièrement superposées des apophyses transverses. Ces gouttières sont formées en dedans :

- 1° par les faces latérales des apophyses épineuses ;
- 2° en dehors, par les apophyses articulaires et la face postérieure des apophyses transverses ;
- 3° dans leur partie moyenne, par les lames vertébrales imbriquées de haut en bas à la manière des tuiles d'un toit.

### Faces latérales

Vue par ses faces latérales, la colonne vertébrale nous présente successivement :

- 1° les sommets des apophyses transverses, portant sur leur partie antérieure, mais à la région dorsale seulement, les facettes articulaires destinées à la tubérosité des côtes ;
- 2° la face latérale des corps vertébraux, portant sur leur partie la plus reculée, à la région dorsale, la série des facettes et des demi-facettes correspondant à la tête des côtes ;
- 3° la série des pédicules ;
- 4° enfin, entre ces derniers, la série des trous de conjugaison, par où s'établissent les relations entre le canal vertébral et les régions situées en dehors de ce canal.

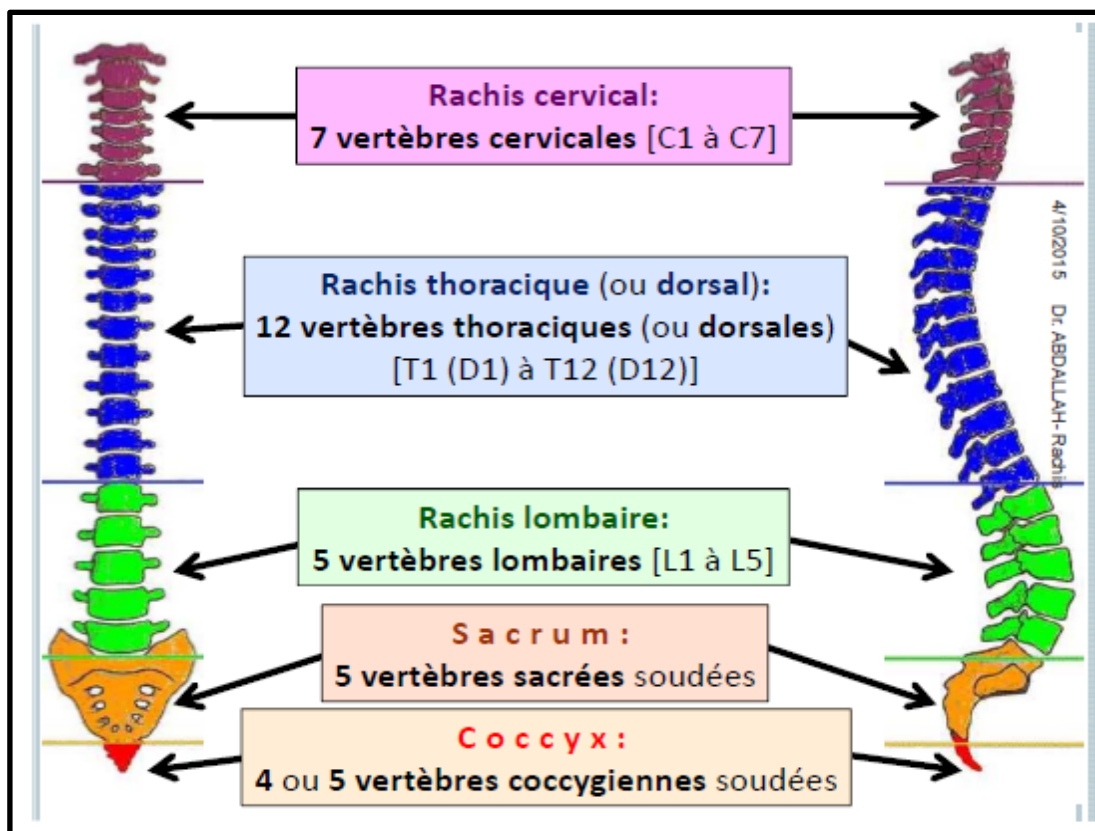
Ces trous de conjugaison augmentent de grandeur en se rapprochant du sacrum. Leurs dimensions sont en rapport moins avec le volume des nerfs qu'avec le calibre des grosses veines qui les traversent.

### Canal vertébral

Le canal vertébral, constitué par l'ensemble des trois vertébraux, s'étend dans toute la hauteur de la colonne vertébrale et en suit régulièrement toutes les inflexions. Il se termine en bas par une simple gouttière ouverte en arrière, que limitent latéralement les cornes du sacrum et du coccyx. Il se continue en haut, au-dessus de l'atlas avec la grande cavité crânienne.

En traversant ainsi les différentes régions de la colonne vertébrale, ce canal, destiné à loger la moelle épinière et ses enveloppes, varie de forme et de dimensions. Sa forme se déduit naturellement de la forme des trous vertébraux. Il est prismatique triangulaire à la région cervicale, cylindrique à la région dorsale, et de nouveau prismatique triangulaire dans les deux autres régions. Quant à ses dimensions, elles sont en rapport, non pas avec le volume du segment de la moelle qu'il est destiné à protéger, mais bien avec le degré de mobilité de la région où on le considère : c'est ainsi que chez l'homme, le canal vertébral, très considérable au cou et aux lombes, où la colonne vertébrale est très mobile, se rétrécit à la région dorsale, où les vertèbres sont à peu près immobiles et descend à des dimensions moindres encore à la région pelvienne, où les vertèbres sacrées sont frappées d'une immobilité absolue.

### 1.5- Le rachis, une charpente articulée



**Figure -7 : répartition vertébrales**

Le rachis est une véritable charpente articulée de l'organisme, divisée en étages dont la fonction est différente.

Cette tige osseuse n'est pas rectiligne ; elle présente plusieurs courbures dans le plan antéro-postérieur qui correspondent à autant de régions différentes. Elle se présente globalement sous la forme de S inversé, le

rachis est composé de 33 (ou 34) vertèbres réparties au sein de cinq segments rachidiens. De haut en bas, on remarque : (voir figure -7)

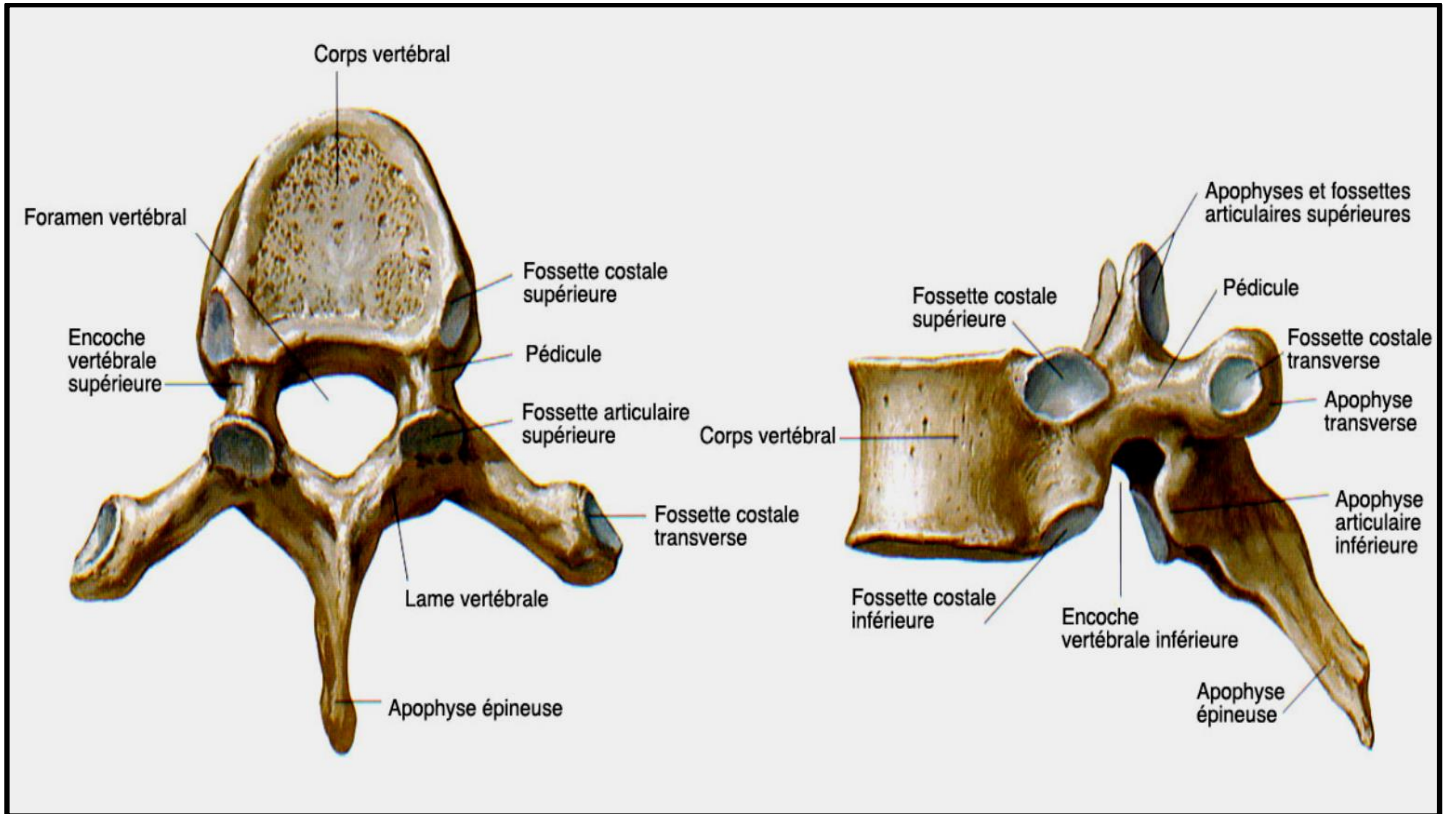
- **le rachis cervical** : situé au niveau du cou, il comporte sept vertèbres référencées par la lettre C (C1 à C7). Le rachis cervical est la connexion entre la tête et le corps. Sa mobilité permet le mouvement de la tête dans les trois dimensions, permettant ainsi l'orientation dans toutes les directions. Le rachis cervical joue un rôle prépondérant dans la mobilité de la tête dans toutes les directions. Cette portion cervicale se présente sous la forme d'une courbure à convexité antérieure.
- **le rachis dorsal** : (ou rachis thoracique) il est composé de douze vertèbres thoraciques, dénommées par les lettres D ou T (D1 à D12, ou T1 à T12). a une mobilité réduite mais permet une optimisation de l'ampliation thoracique lors des mouvements respiratoires du fait de la sa courbure en cyphose opposée à celle du rachis cervical et lombaire (lordose). Le rachis dorsal forme une courbure postérieure appelée cyphose.
- **le rachis lombaire** : cette partie de la colonne vertébrale comprend cinq vertèbres lombaires, classées de L1 à L5. Cette portion lombaire se présente avec une courbure convexe en avant. La partie lombaire représente le soutien mécanique de l'ensemble de la colonne vertébrale car elle est située tout en bas, et s'articule avec le bassin. Les vertèbres sont cubiques, massives, adaptées au soutien. Le rachis lombaire permet la mobilisation du tronc dans les différents plans de l'espace et correspond à l'étage le plus souvent concerné par la chirurgie.
- **le rachis sacré** : le rachis sacré ou sacrum comporte cinq vertèbres soudées à l'âge adulte, classées de S1 à S5. Il est incliné d'environ 45 degrés en arrière, forme la partie postérieure du bassin et en assure ainsi la solidité.
- **le rachis coccygien** : plus connu sous le nom de coccyx, cette partie se compose de quatre ou cinq vertèbres soudées entre elles, qui contrairement aux autres, ne sont pas dénommées par une lettre. Le coccyx est un vestige osseux correspondant à la queue des mammifères. Il ne présente pas grand intérêt en anatomie ou en médecine, si ce n'est qu'il est souvent le siège de douleurs lors d'un choc violent sur les fesses ou même de fractures.

Il se présente avec la portion sacré avec une courbure plus marquée que toutes les autres, concave en avant : cette région s'appelle sacro-coccygienne ou pelvienne.

## **1.6- Caractères généraux des vertèbres**

Conformées sur le même type, les vertèbres, quelle que soit la région à laquelle elles appartiennent, présentent des caractères généraux, qui permettent toujours de les reconnaître entre les différentes pièces du squelette.

Les vertèbres sont des os courts, symétriques. (Voir figure 8)



**Figure 8 : Figure 1.2 Description de l'anatomie d'une vertèbre type (adapté de Netter [137]).**

**Vue axiale à gauche et sagittale à droite.**

**1° Corps de la vertèbre** (Voir Figure 8)

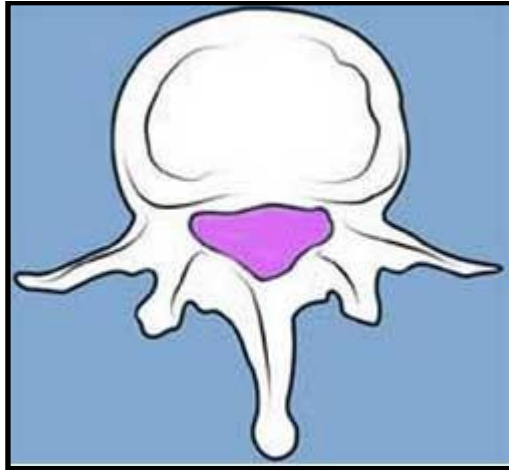
C'est la partie la plus antérieure de la vertèbre et plus volumineuse, celle qui concourt à donner à la colonne vertébrale sa solidité et sa résistance. Les corps vertébraux lui confèrent aussi toute son aptitude à supporter le poids du corps. Surtout à partir de T4, les corps vertébraux, qui se succèdent de haut en bas, deviennent de plus en plus volumineux afin de s'adapter à l'accroissement progressif du poids corporel. Il affecte la forme d'un cylindre et, par conséquent, nous offre à considérer deux bases ou faces et une circonférence.

Les deux faces sont horizontales et se distinguent en face supérieure et en face inférieure. L'une et l'autre présentent à leur centre une surface criblée de petits trous, que circonscrit une zone annulaire légèrement en saillie et formée de tissu compact.

La circonférence, excavée dans le sens vertical en avant et sur les côtés, présente une gouttière horizontale dirigée d'un côté à l'autre. En arrière, elle est plane ou même excavée dans le sens transversal, pour constituer la paroi antérieure du trou vertébral. On y remarque à sa partie moyenne une série d'orifices, très variables en nombre et en dimensions : ils sont destinés à livrer au passage aux canaux veineux, qui amènent dans les veines longitudinales du rachis le sang veineux du corps de la vertèbre.

**2° Trou vertébral** (voir Figure 9)

Compris entre la face postérieure du corps vertébral et l'apophyse épineuse, le trou vertébral affecte la configuration d'un triangle, que ses angles plus ou moins arrondis tendent à ramener à la forme circulaire. Les trous vertébraux, en se superposant, constituent dans leur ensemble un long canal, le canal rachidien, dans lequel se logent la moelle épinière et ses annexes.



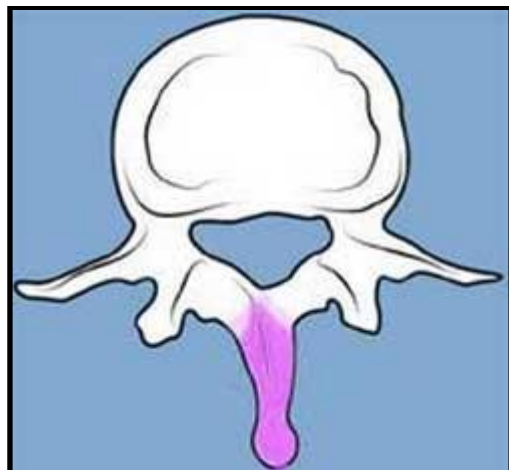
**Figure 9 : Trou vertébral (en violet)**

**3° Apophyse épineuse** (voir Figure 10)

Un processus épineux se détache de l'arc vertébral au niveau de la jonction des deux lames et se projette vers l'arrière en empiétant sur la vertèbre sous-jacente.

Placée sur la ligne médiane comme le corps, l'apophyse épineuse se dirige directement en arrière sous la forme d'une épine, d'où le nom qui lui a été donné. On lui distingue :

- 1° une base, qui la rattache à la vertèbre ;
- 2° un sommet, parfois légèrement dévié de la ligne médiane, qui vient se mettre en rapport avec la peau ;
- 3° deux faces latérales, l'une droite, l'autre gauche, en rapport avec les muscles spinaux ;
- 4° un bord supérieur, plus ou moins tranchant ;
- 5° un bord inférieur, généralement plus épais que le précédent et aussi beaucoup plus court.



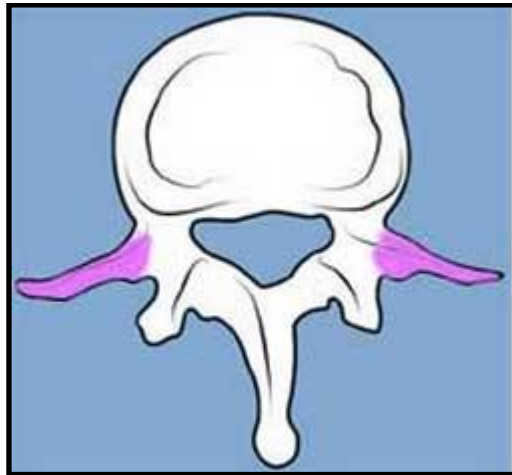
**Figure 10 : Apophyse épineuse (en violet)**

**4°. Apophyses transverses** (voir Figure 11)

Ils se détachent latéralement de la zone de jonction entre la lame et le pédicule et se projettent latéralement et vers l'arrière. Au nombre de deux, l'une gauche et l'autre droite, les apophyses transverses se dirigent transversalement en dehors, comme leur nom l'indique. Comme les apophyses épineuses, chaque apophyse transverse possède :

- 1° une base, qui la soude à la vertèbre ;

- 2° un sommet, qui est libre ;
- 3° deux faces, l'une antérieure et l'autre postérieure ;
- 4° deux bords, l'un supérieur et l'autre inférieur.

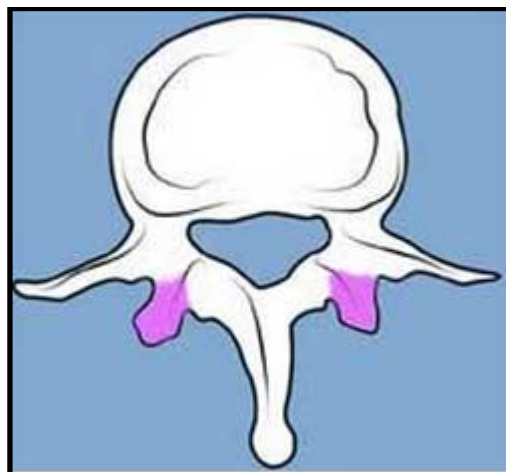


**Figure 11 : Apophyse transverse (en violet)**

**5°. Apophyses articulaires** (voir Figure 12)

Quatre processus articulaires, deux supérieurs et deux inférieurs, naissent également des zones de jonction entre les lames et les pédicules.

Les apophyses articulaires, ainsi appelées parce qu'elles servent à l'articulation des vertèbres entre elles, sont au nombre de quatre : deux supérieures ou ascendantes et deux inférieures ou descendantes. Placées symétriquement de chaque côté du trou vertébral, les unes et les autres débordent, soit en haut, soit en bas, le niveau de l'arc osseux qui limite cet orifice. Les apophyses articulaires supérieures s'articulent avec les apophyses articulaires inférieures de la vertèbre qui est au-dessus ; et vice versa, les apophyses articulaires inférieures s'articulent avec les apophyses articulaires supérieures de la vertèbre qui est placée immédiatement au-dessous.



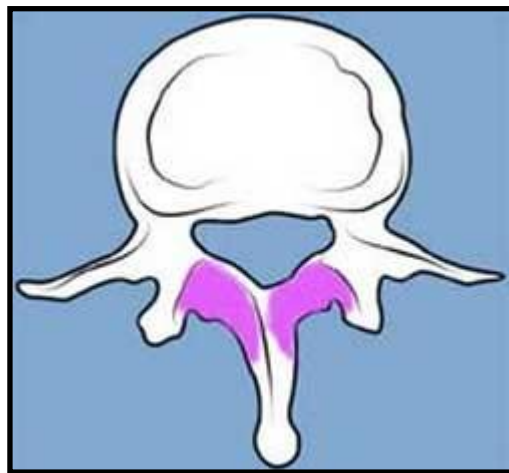
**Figure 12 : Apophyse articulaire (en**

**6°. Lames vertébrales** (voir Figure 13)



Les lames vertébrales s'étendent des pédicules à l'apophyse épineuse et limitent en arrière le trou vertébral. Les lames vertébrales sont au nombre de deux, l'une droite, l'autre gauche. Aplaties et quadrilatères, elles constituent la plus grande partie de la paroi postéro-latérale du trou rachidien. En raison de sa configuration, on distingue à chaque lame : une face antérieure, qui regarde la moelle ; une face postérieure, qui recouvrent les muscles spinaux ; deux bords, l'un supérieur, l'autre inférieur ; une extrémité interne, qui se confond avec la base de l'apophyse épineuse ; une extrémité externe, enfin qui se soude soit avec l'apophyse transverse, soit avec les apophyses articulaires.

Au point de vue de leur direction, les lames vertébrales ne sont pas verticales, mais légèrement obliques en bas et en arrière. Il résulte, on le conçoit, d'une pareille disposition : 1° que, pour chaque trou rachidien, la circonférence inférieure est plus grande que la circonférence supérieure ; 2° que, sur le squelette monté, chaque lame vertébrale déborde en arrière, par son bord inférieur, la lame vertébrale qui est immédiatement au-dessous et qui appartient à la vertèbre suivante.



**Figure 13 : lames vertébrales (en violet)**

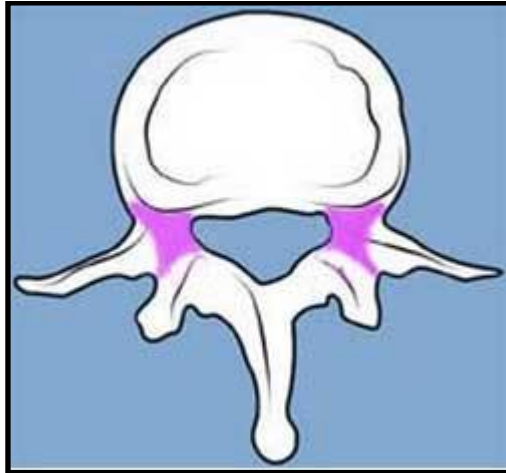
### **7°. Pédicules** (voir Figure 14)

On désigne, sous ce nom, les deux portions osseuses minces et étroites qui, de chaque côté, réunissent la base de l'apophyse transverse et les deux apophyses articulaires correspondantes à la partie postérieure et latérale du corps vertébral. Elles se présentent sous la forme de deux colonnettes osseuses. Les pédicules limitent ainsi, sur les côtés, le trou de la vertèbre.

Il est à remarquer que leurs deux bords ne sont pas rectilignes, mais décrivent deux courbes qui se regardent par leur convexité : relativement large à ses deux extrémités, chaque pédicule présente donc son minimum de hauteur à sa partie moyenne et possède ainsi deux échancrures, l'une supérieure, l'autre inférieure.

Ces échancrures correspondent exactement aux échancrures similaires des vertèbres voisines. Elles circonscrivent ainsi, sur les côtés de la colonne vertébrale, une série régulière d'orifices, qui donnent entrée dans le canal rachidien et portent pour cette raison le nom de trous de conjugaison.

Les trous de conjugaison sont au nombre de deux (l'un droit, l'autre gauche) pour chaque espace intervertébral, et l'on peut définir chacun d'eux : l'orifice compris entre l'échancrure supérieure d'une vertèbre quelconque et l'échancrure inférieure de la vertèbre qui se trouve immédiatement au-dessus.



**Figure 14 : Pédicules (en violet)**

## 2- Les disques intervertébraux

Les disques intervertébraux représentent environ un tiers des structures du rachis. Comme ils ne sont pas seulement responsables de la souplesse de la colonne vertébrale, mais qu'ils transmettent également la charge, leur comportement mécanique a une grande influence sur la mécanique du rachis dans son ensemble. Une grande partie des douleurs lombaires est associée au disque soit directement en raison d'une hernie discale, soit indirectement à cause de la dégénérescence discale qui soumet d'autres structures rachidiennes à des contraintes anormales.

### 2.1- L'anatomie du disque

Le rachis humain se compose de vingt-quatre disques intervertébraux intercalés entre les corps vertébraux. Ensemble, ils constituent la structure antérieure (frontale) du rachis, alors que les facettes articulaires, ainsi que les apophyses transverses et épineuses forment les éléments postérieurs. La taille des disques augmente depuis le haut jusqu'au bas du rachis,

Le disque qui est composé d'un tissu ressemblant au cartilage comporte trois régions différentes (voir figure 15). La région interne (noyau pulpeux ou **nucleus pulposus**) est une masse gélatineuse, en particulier chez les personnes jeunes. L'extérieur du disque (anneau fibreux ou **annulus fibrosus**) est ferme et sous tension. Les fibres de l'anneau sont entrecroisées de façon à résister à des forces de flexion et de torsion importantes.

Avec l'avancée en âge, le noyau perd une partie de son eau, devient plus ferme et la distinction entre les deux régions est moins nette qu'à un stade moins avancé de la vie. Le disque est séparé de l'os par une fine couche de cartilage hyalin, la troisième partie.

Chez l'adulte, le cartilage basal et le disque lui-même n'ont habituellement pas leurs vaisseaux sanguins propres, mais comptent sur les apports sanguins des tissus adjacents, tels que les ligaments et les corps vertébraux, pour assurer leurs besoins en éléments nutritifs et l'élimination des déchets. Seule la partie extérieure du disque est innervée.

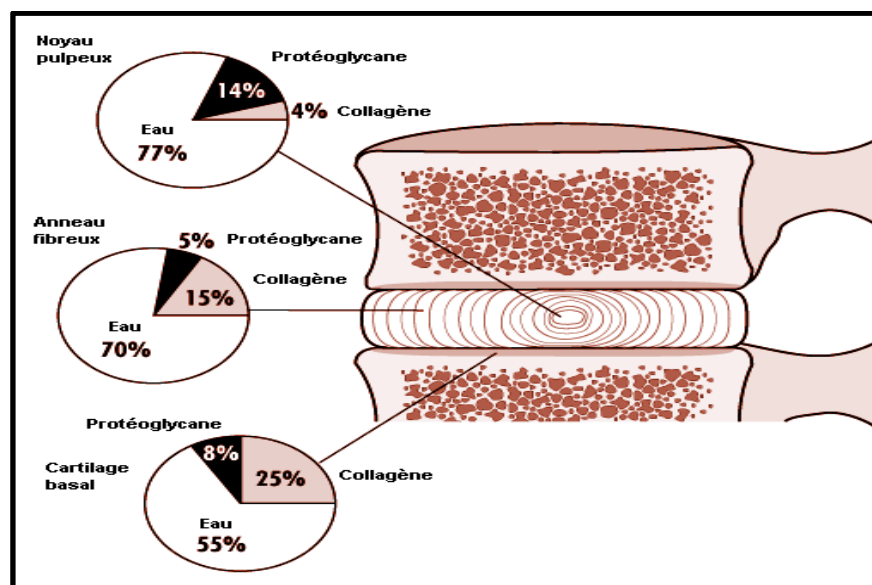
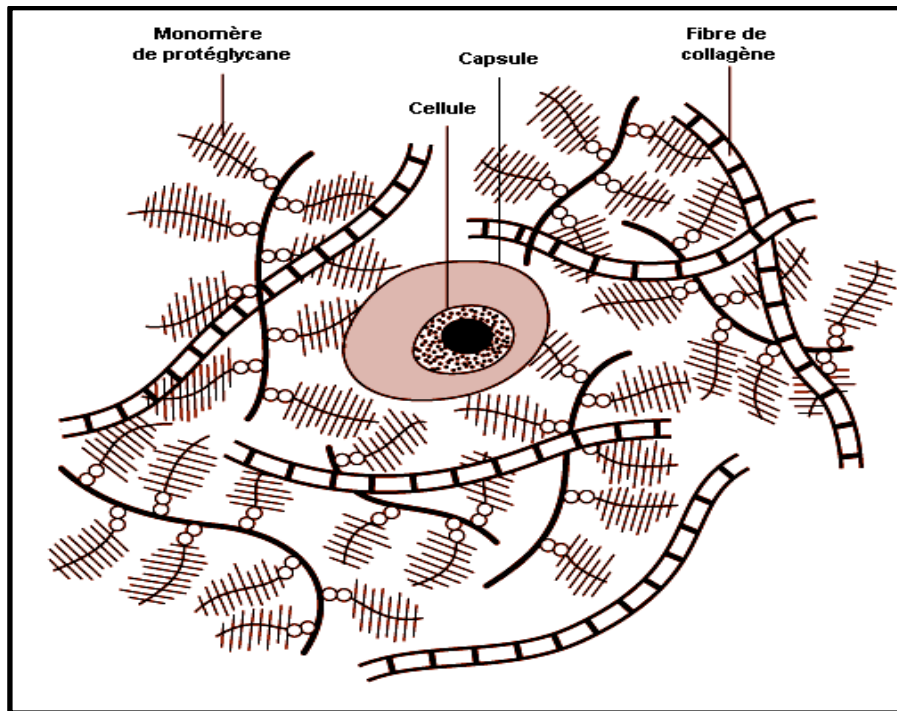


Figure 15 : Proportions relatives des trois composants principaux du disque intervertébral adulte, humain, normal

### 2.1.1- La composition

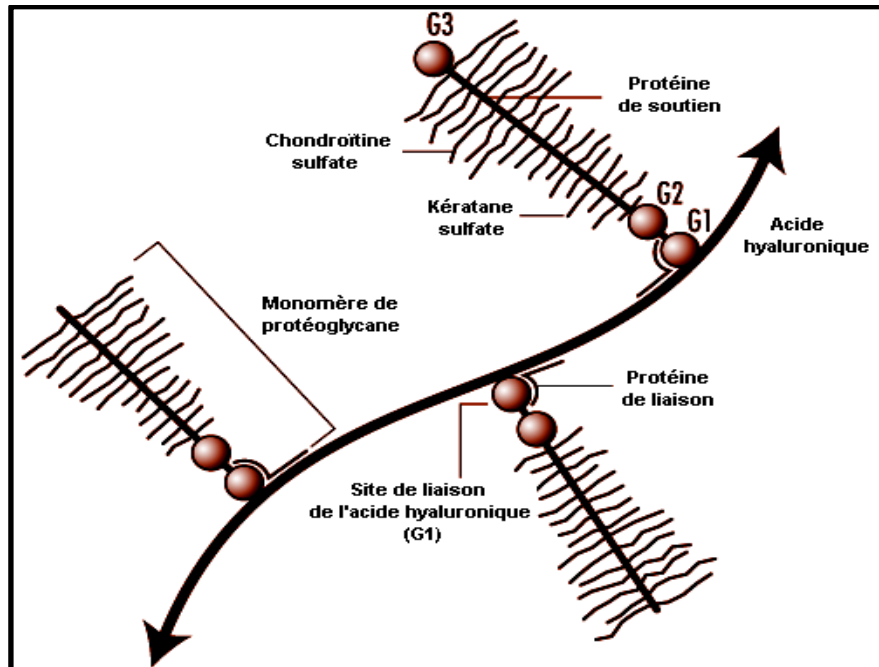
Le disque, comme les autres cartilages, contient principalement une matrice de fibres collagènes enrobée dans un gel de protéoglycanes et d'eau. Le collagène et l'eau représentent 90 à 95% de la masse tissulaire totale, bien que les proportions varient avec la localisation à l'intérieur du disque, avec l'âge et avec l'état de dégénérescence. Des cellules dispersées à travers la matrice assurent la synthèse et le maintien de ces différents composants (voir figure 16).



**Figure 16 : Schéma de la structure du disque montrant des fibres collagéniques entremêlées avec de nombreuses molécules de protéoglycanes en forme d'écouvillon et quelques cellules**

Les protéoglycanes: le protéoglycane le plus important du disque, l'aggrécane, est une grosse molécule composée d'une protéine centrale sur laquelle sont accrochés de nombreux glycosaminoglycanes (chaînes répétitives de disaccharides) (voir figure 17). Ces chaînes latérales ont une haute densité de charges négatives qui leur permettent d'attirer les molécules d'eau (hydrophiles). Cette propriété, que l'on appelle pression de gonflement, revêt une grande importance pour le fonctionnement du disque.

Des agrégats importants de protéoglycanes peuvent se former quand des molécules individuelles se fixent sur une chaîne d'un autre composé chimique, l'acide hyaluronique. La taille des aggrécanes varie (avec des poids moléculaires allant de 300 000 à 7 millions de daltons) en fonction du nombre de molécules qui participent à l'agrégat. D'autres types plus petits de protéoglycanes ont récemment été également trouvés dans le disque et le cartilage basal: la décorine, le biglycane, la fibromoduline et le lumican par exemple. Leur fonction est en général inconnue, mais la fibromoduline et la décorine pourraient être impliquées dans la régulation de la formation de la trame collagénique



**Figure 17 : Schéma d'un agrégat de protéoglycanes discal. Les domaines G1, G2 et G3 sont des structures globulaires localisées sur la protéine de soutien**

### L'eau:

Constituant principal du disque, l'eau représente 65 à 90% du volume tissulaire, selon l'âge et la région du disque. Il existe une corrélation entre la quantité de protéoglycanes et la teneur en eau de la matrice. La quantité d'eau change également en fonction de la charge qui s'exerce sur le disque; c'est pourquoi la teneur en eau varie entre la nuit et le jour, la charge étant très différente pendant le sommeil. L'eau est importante et pour le fonctionnement mécanique du disque et pour le transport des substances dissoutes à l'intérieur de la matrice.

### Le collagène:

Le collagène est la principale protéine de structure de l'organisme; il comporte une famille d'au moins dix-sept protéines différentes. Tous les collagènes ont des zones hélicoïdales et sont stabilisés par une série de ponts à l'intérieur et entre les molécules qui leur confèrent une importante résistance aux contraintes mécaniques et aux dégradations enzymatiques. La longueur et la forme des différents types de molécules de collagène et la proportion des zones hélicoïdales varient. Le disque est composé de plusieurs types de collagènes avec, dans la partie extérieure de l'annulus, une prédominance de collagène de type I et, dans le noyau et le cartilage basal, une prédominance de type II. Les deux types forment des fibrilles qui constituent la trame de la structure du disque. Les fibrilles du noyau sont beaucoup plus fines ( $\gg 0,05 \mu\text{m}$  de diamètre) que celles de l'annulus ( $0,1$  à  $0,2 \mu\text{m}$  de diamètre). Les cellules du disque sont souvent entourées par une capsule composée d'autres types de collagènes comme le collagène de type VI.

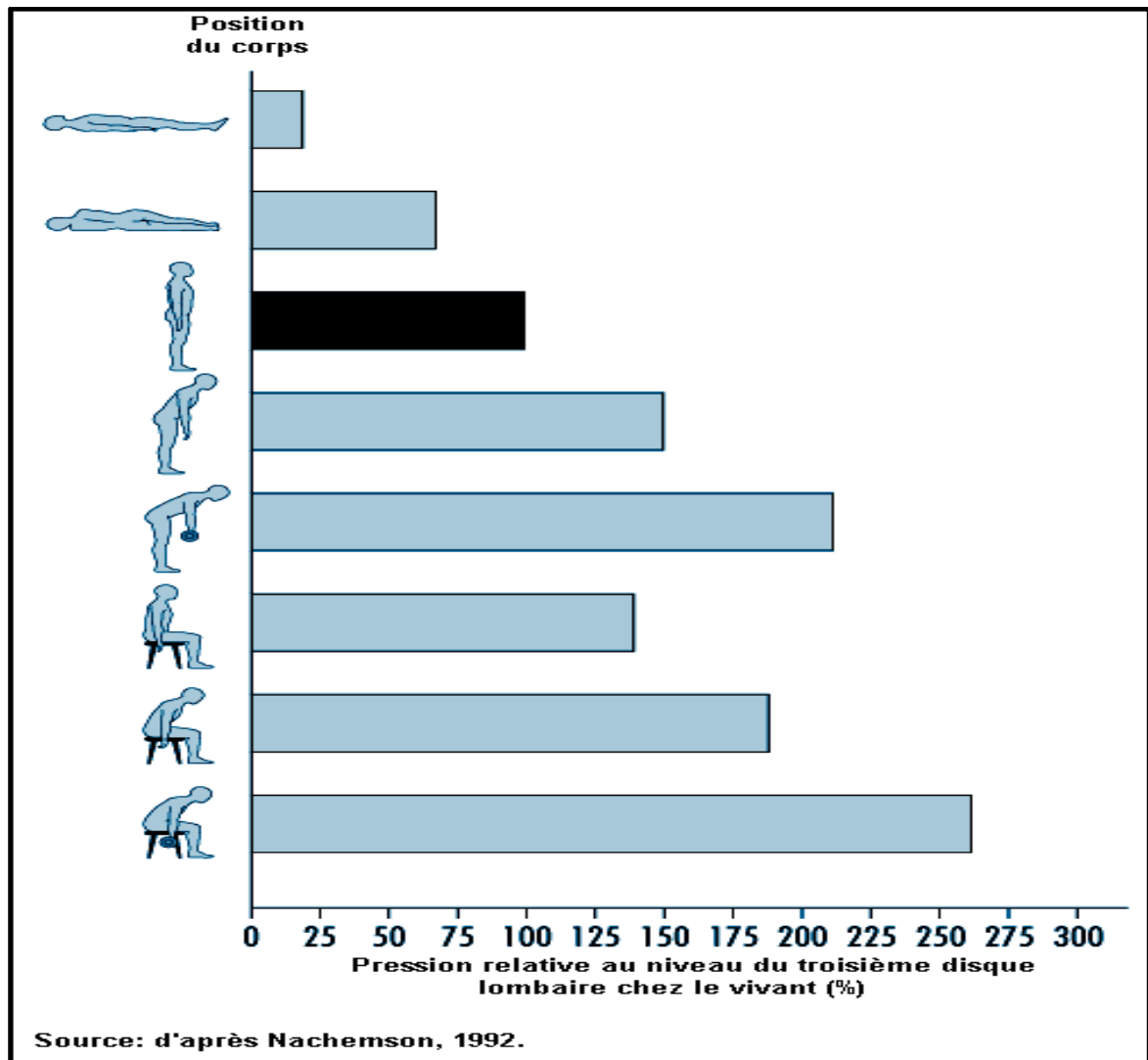
### Les cellules:

Comparés à d'autres tissus, les disques intervertébraux ont une très faible densité cellulaire. Bien que cette densité soit faible, l'activité permanente des cellules est vitale pour la santé du disque, car elles produisent des macromolécules qui, tout au long de la vie, remplacent celles qui sont détruites et disparaissent au fil du temps.

### La fonction

Le disque a surtout une fonction mécanique. Il transmet la charge le long du rachis et lui permet de se courber et de se tourner. Les charges qui s'exercent sur le disque proviennent du poids corporel et de l'activité musculaire et se modifient avec la position du corps (voir figure 18).

Au cours des activités quotidiennes, le disque est soumis à des charges complexes. L'extension ou la flexion du rachis produisent sur le disque des forces de tension et de compression dont l'intensité, en raison des différences de poids corporel et de géométrie, augmente au fur et à mesure que l'on descend le long du rachis. La rotation de la colonne génère des forces de cisaillement.



**Figure 18 Pressions intra discales relatives dans différentes postures par comparaison avec la station debout (100%)**

Les disques sont soumis à une pression variant en fonction de la position du corps: de 0,1 à 0,2 MPa environ au repos, et de 1,5 à 2,5 MPa au cours des mouvements de flexion ou de levage. Cette pression est essentiellement liée à la pression hydraulique au niveau du noyau et de la partie interne de l'anneau dans un disque normal. Quand la charge sur le disque augmente, la pression se répartit uniformément à travers la lame basale et dans tout le disque.

Lorsqu'il est en charge, le disque se déforme et perd de sa hauteur. La lame basale et le débord de l'anneau discal sont soumis à une pression croissante et, de ce fait, la pression sur le noyau s'élève. Le degré de déformation du disque dépend de la vitesse de la mise en charge. Le disque peut se déformer de

façon considérable, se comprimant ou s'expansant de 30 à 60% au cours de la flexion ou de l'extension du rachis.

Les distances entre les apophyses épineuses adjacentes peuvent augmenter de plus de 300%. Si la charge cesse, en quelques secondes, le disque reprend rapidement sa taille initiale, mais si elle est maintenue, le disque continue à perdre de sa hauteur. Cet «affaissement» résulte de la poursuite de la déformation des structures discales, mais aussi de la perte hydrique, puisque le disque perd ses liquides du fait de l'augmentation de la pression.

Au cours des activités quotidiennes, le disque perd progressivement entre 10 et 25% de ses liquides quand il est soumis à de fortes pressions et il les regagne lors du repos en position couchée. Cette perte d'eau peut conduire à une diminution de stature de 1 à 2 cm entre le matin et le soir chez les travailleurs diurnes.

Au fur et à mesure que la composition du disque se modifie avec l'âge ou la dégénérescence, sa réaction aux charges mécaniques change également. Du fait de la perte des protéoglycanes et donc de la teneur en eau, le noyau ne peut plus réagir aussi efficacement. Ce changement se traduit par une répartition non uniforme des contraintes sur la lame basale et sur les fibres de l'anneau et, en cas de dégénérescence sévère, les fibres internes peuvent faire saillie à l'intérieur quand le disque est en charge, ce qui peut alors causer des contraintes anormales sur d'autres structures discales pouvant aller jusqu'à leur rupture.

La vitesse d'affaissement est également augmentée dans les disques dégénérés qui, ainsi, perdent de la hauteur plus vite que des disques normaux soumis à la même charge. L'étroitesse de l'espace discal affecte d'autres structures rachidiennes telles que les muscles et les ligaments et conduit, en particulier, à une augmentation de la pression sur les facettes articulaires, responsable des changements dégénératifs au niveau des disques anormaux.

### 2.1.2- Le rôle des principaux composants dans la fonction discale

#### **Les protéoglycanes**

La fonction discale dépend du maintien de l'équilibre entre la pression de l'eau dans le disque et sa pression de gonflement. La pression de gonflement est fonction de la concentration en ions attirés à l'intérieur du disque par les protéoglycanes chargés négativement et dépend ainsi directement de la concentration en protéoglycanes. Si la charge sur le disque augmente, la pression de l'eau s'élève et perturbe cet équilibre.

L'augmentation de la concentration en protéoglycanes, ainsi que celle de la pression osmotique du disque compensent la fuite des liquides à l'extérieur du disque. Un tel mouvement liquidien se poursuit jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint ou que la charge sur le disque cesse.

Les protéoglycanes exercent un rôle sur les mouvements liquidiens également par d'autres biais. Du fait de leur haute concentration dans les tissus, les espaces entre les chaînes sont très fins (0,003 à 0,004  $\mu\text{m}$ ). A travers des pores aussi petits, les courants liquidiens sont très lents, et quand bien même la différence de pression est importante, la vitesse à laquelle les liquides disparaissent et donc la vitesse d'aplatissement du disque, est lente elle aussi.

Cependant, puisque les disques dégénérés ont des concentrations de protéoglycanes plus basses, les liquides peuvent circuler plus vite à travers la matrice. Cela pourrait expliquer que les disques dégénérés perdent de la hauteur plus rapidement que les disques normaux. La charge et la concentration élevée en protéoglycanes contrôlent l'entrée et les mouvements des autres substances dissoutes à l'intérieur du disque. Des petites molécules d'éléments nutritifs telles que le glucose et l'oxygène peuvent facilement entrer dans le disque et se répartir dans la matrice.

Les substances chimiques chargées positivement et les ions tels que le  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^{2+}$  (le sodium ou le calcium) se trouvent en concentration plus élevée dans le disque chargé négativement que dans les liquides interstitiels environnants. Les grosses molécules, telles que l'albumine sérique ou les immunoglobulines, sont trop volumineuses pour pénétrer dans le disque et sont présentes uniquement en concentrations très faibles.

Les protéoglycanes peuvent également avoir des répercussions sur l'activité et le métabolisme cellulaires. Les petits protéoglycanes tels que le biglycane peuvent lier des facteurs de croissance et d'autres médiateurs de l'activité cellulaire, les relarguant quand la matrice est dégradée.

## **L'eau**

L'eau est la principale composante du disque et la rigidité du tissu est assurée grâce aux propriétés hydrophiles des protéoglycanes. Lors d'une perte en eau, le disque devient plus flasque et déformable, au fur et à mesure que la trame collagénique se relâche. Cependant, dès que le disque a perdu une proportion importante de son eau, ses propriétés mécaniques changent du tout au tout, le tissu se comportant davantage comme un solide que comme une structure composée soumise à une charge. L'eau fournit également le milieu grâce auquel les éléments nutritifs et les déchets sont échangés entre le disque et le sang environnant.

## **Le collagène**

La trame collagénique, qui peut supporter des charges d'étirement élevées, fournit une structure au disque et permet son ancrage aux corps vertébraux voisins. Cette trame est gonflée par l'eau retenue par les protéoglycanes; la trame retient alors les protéoglycanes et les empêche de s'échapper du tissu. Ces trois composés ainsi réunis forment une structure qui est capable de supporter des charges de compression élevées.

L'organisation des fibres collagènes fournit au disque sa flexibilité. Les fibres sont disposées en couche d'orientation alternée, avec une angulation telle que celles de chaque couche s'orientent en direction des corps vertébraux voisins. Le tissage hautement spécialisé assure aux disques des angulations extrêmes, permettant ainsi la flexion du rachis, même si les fibres collagènes elles-mêmes ne peuvent s'étirer que d'environ 3%.

## **Le métabolisme**

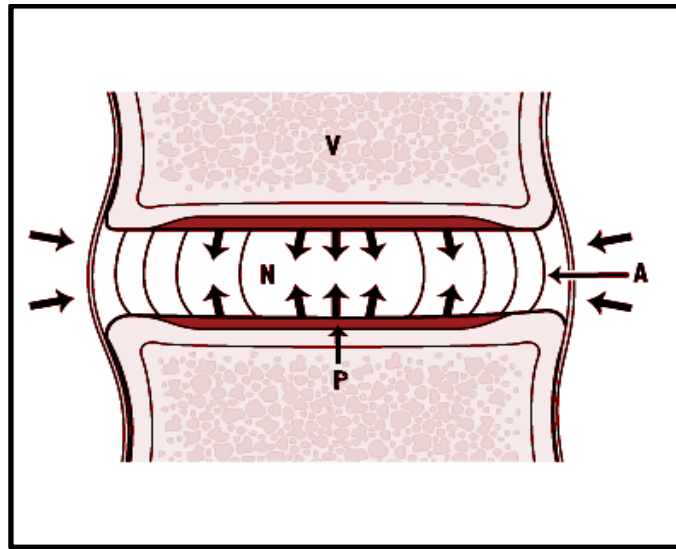
Les cellules du disque produisent de grosses molécules, ainsi que des enzymes qui peuvent détruire les composants matriciels. Dans un disque sain, les vitesses de production et de destruction de la matrice sont équilibrées. Si cet équilibre est rompu, la composition du disque change. Pendant la croissance, les vitesses de synthèse des molécules nouvelles ou de remplacement sont plus élevées que les vitesses de dégradation et les matériaux matriciels s'accumulent autour des cellules. Avec l'âge et la dégénérescence, le processus s'inverse. Normalement, les protéoglycanes sont renouvelés tous les deux ans environ, le collagène bien moins souvent. Si l'équilibre est perturbé ou si l'activité cellulaire baisse, la teneur de la matrice en protéoglycanes finit par diminuer, ce qui affecte les propriétés mécaniques du disque.

Les cellules du disque répondent également aux changements de contrainte mécanique. La mise en charge affecte le métabolisme discal, bien que les mécanismes n'en soient pas clairement établis. Actuellement, il est impossible de dire que tel type de sollicitation mécanique favorise un équilibre stable, alors que tel autre encourage la dégradation de la matrice par rapport à sa synthèse.



### 2.1.3-L'apport d'éléments nutritifs

Le disque reçoit des éléments nutritifs tels que l'oxygène et le glucose à partir du sang des tissus adjacents; ceux-ci doivent diffuser à travers la matrice jusqu'aux cellules situées au centre du disque. Les cellules peuvent être distantes de 7 à 8 mm du vaisseau sanguin le plus proche. Des gradients très importants se développent. A l'interface entre le disque et le corps vertébral, la concentration en oxygène se situe aux alentours de 50%, alors qu'au centre du disque elle est inférieure à 1%. Le métabolisme du disque se fait, pour l'essentiel, en condition anaérobie. Quand l'oxygène tombe au-dessous de 5%, le disque augmente sa production de lactate qui est un déchet métabolique. La concentration en lactate dans le centre du noyau peut être six à huit fois plus élevée que celle du sang ou du milieu interstitiel (voir figure 19.)



**Figure 19 : Les principales filières nutritionnelles du disque intervertébral utilisent la diffusion à partir des vaisseaux du corps vertébral (V), à travers les plateaux (P) jusqu'au noyau (N), ou à partir du sang provenant de l'extérieur de l'annulus (A)**

On explique souvent la dégénérescence discale par la baisse de l'apport d'éléments nutritifs. La perméabilité de la plaque basale du disque diminue avec l'âge, ce qui peut entraver l'acheminement des éléments nutritifs au disque et entraîner une accumulation de déchets tels que le lactate. Dans les disques où l'apport d'éléments nutritifs est réduit, les concentrations d'oxygène dans le centre du disque peuvent descendre à des niveaux très bas.

Le métabolisme en anaérobie augmente et la production de lactate et l'acidité peut alors tomber à cet endroit à un pH de 6,4. A des valeurs de pH et à des pressions d'oxygène aussi basses, la vitesse de synthèse matricielle est réduite, aboutissant à une chute de la teneur en protéoglycanes. De plus, les cellules elles-mêmes peuvent ne pas survivre à des expositions prolongées à un pH acide. Un pourcentage élevé de mort cellulaire a été relevé dans les disques humains.

La dégénérescence du disque conduit à une perte en protéoglycanes et à une modification de sa structure, avec une désorganisation de la trame collagénique et une pénétration de vaisseaux sanguins. Il est possible que certains de ces changements puissent être réversibles puisqu'il a été montré que le disque possédait certaines capacités de réparation.

#### 2.1.4-Les pathologies

Dans ce paragraphe on se limite à décrire deux pathologies qui ont pour cause biomécanique à savoir :

##### **a) La rupture et la saillie discale:**

La rupture de l'anneau postérieur du disque est assez courante chez les adultes jeunes ou d'âges moyens physiquement actifs. Le diagnostic ne peut pas être fait par rayons X en dehors de la réalisation d'une discographie au cours de laquelle un produit de contraste est injecté au centre du disque. Une déchirure peut alors être mise en évidence par le cheminement du liquide de discographie. Parfois, des fragments isolés ou séquestrés de matériel discal peuvent passer à travers la fissure à l'intérieur du canal rachidien. L'irritation ou la pression exercée sur le nerf sciatique sont responsables de douleurs intenses et de paresthésie (sciatique) dans les membres inférieurs.

##### **b) La maladie discale dégénérative:**

C'est un terme employé pour désigner un groupe de patients à la pathologie mal définie qui souffrent de douleurs lombaires et présentent parfois des modifications de leur image radiologique telles qu'une diminution de hauteur du disque et, éventuellement, la formation d'ostéophytes en bordure des corps vertébraux. Il pourrait s'agir du stade terminal de certaines situations pathologiques, par exemple d'une déchirure de l'anneau discal non traitée.

#### 2.1.5- Les facteurs de risque

**Nous citons ici deux risque d'origine biomécanique à savoir :**

##### **La charge**

La charge sur les disques dépend de la posture. D'après les mesures intra discales, les pressions qui s'exercent sur la colonne sont cinq fois plus grandes en posture assise qu'au repos en position couchée (voir figure 18). Si en plus le sujet lève une charge, surtout à distance du corps, la pression intra discale peut augmenter de façon considérable. Il peut alors se produire une rupture du disque qui, dans d'autres circonstances, aurait pu rester intact.

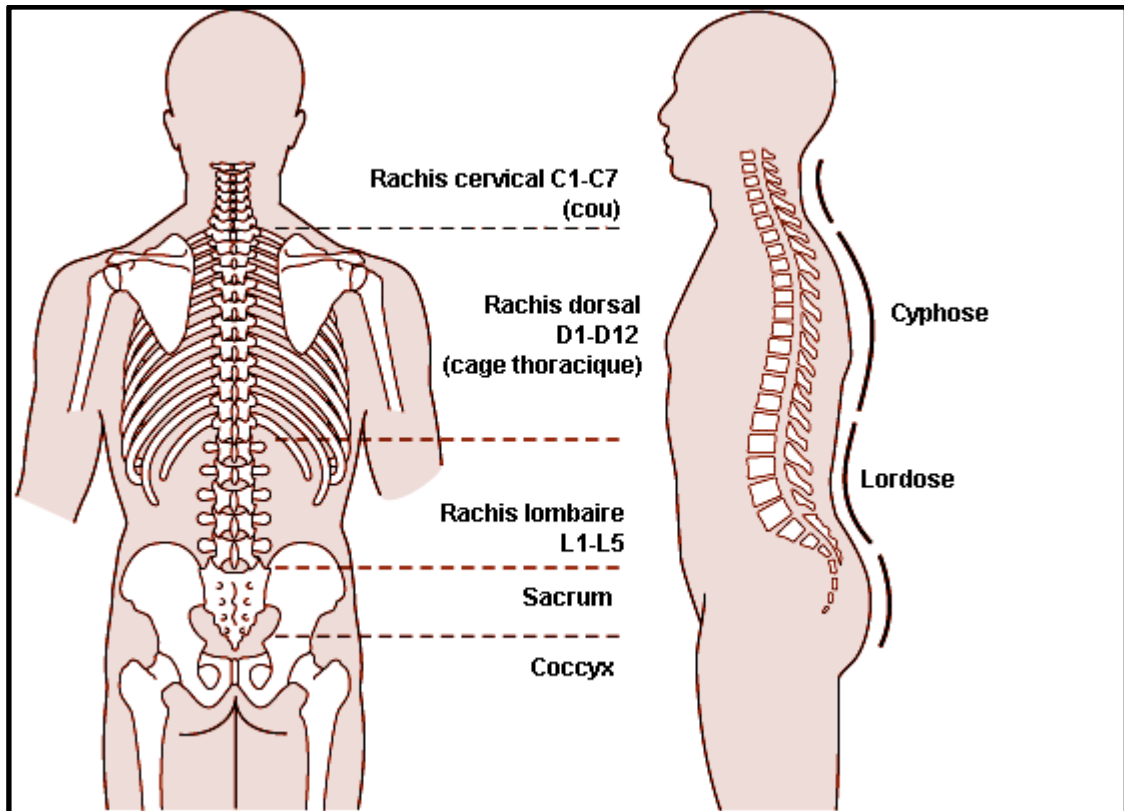
D'après une synthèse des études épidémiologiques sur cette question, le levage ou le port répété de charges lourdes ou l'exécution de tâches en position fléchie ou en hyper extension représentent un facteur de risque pour les troubles lombaires. De même, certains sports, tels que l'haltérophilie, peuvent être associés à une incidence plus élevée de douleurs lombaires que la natation, par exemple. Le mécanisme qui intervient n'est pas clair, bien que les différentes circonstances de charge soient en rapport.

##### **Les vibrations**

Des études épidémiologiques ont montré que l'incidence des douleurs lombaires augmentait chez les individus exposés à des vibrations de forte intensité. Le rachis peut être endommagé à des fréquences naturelles de résonance, particulièrement entre 5 et 10 Hz. Or, de nombreux véhicules produisent des vibrations dans cette gamme de fréquences. Les études analysées ont mis en évidence une relation entre de telles vibrations et l'incidence des lombalgies. Ayant pu montrer que les vibrations affectaient les petits vaisseaux sanguins dans d'autres tissus, on peut supposer que c'est le même mécanisme qui agit sur le rachis.

## 2.2- La structure et la fonction de la région lombaire

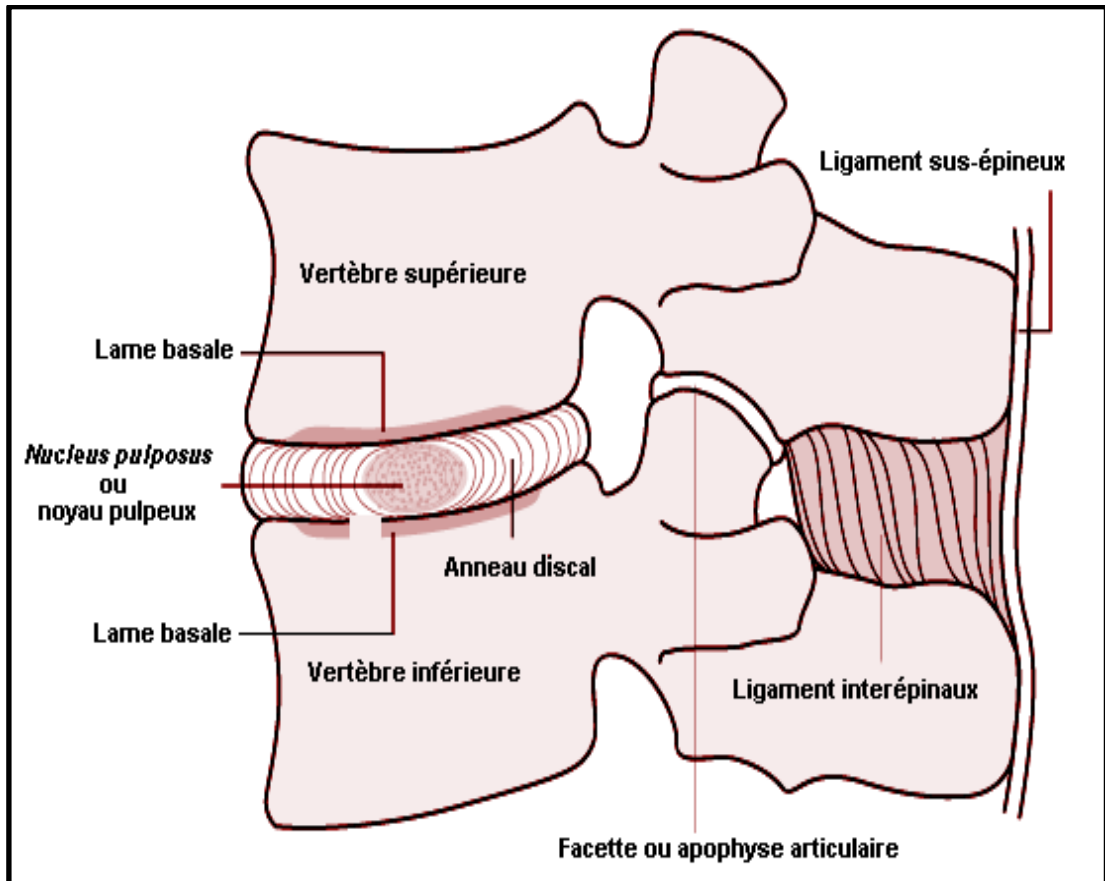
Du fait de la station debout, la structure de la partie inférieure du rachis humain diffère anatomiquement de celle de la plupart des autres vertébrés. La station debout augmente les forces mécaniques sur les structures du rachis lombosacré. Normalement, le rachis lombaire se compose de cinq vertèbres. Le sacrum est rigide et le coccyx n'a pas de fonction connue chez l'être humain, (voir figure 20)



**Figure 20 : Le rachis, ses vertèbres et ses courbures**

Les vertèbres sont liées entre elles par des disques intervertébraux situés entre les corps vertébraux, au moyen de ligaments et de muscles. Ce sont ces tissus d'attachement mous qui confèrent au rachis sa souplesse. Deux vertèbres adjacentes forment une unité fonctionnelle, (voir figure 21).

Les corps vertébraux et les disques sont les éléments portants du rachis. Les parties postérieures des vertèbres forment l'arc postérieur qui protège les structures nerveuses dans le canal rachidien. Les arcs postérieurs sont attachés les uns aux autres par des articulations apophysaires (articulations zygapophysaires) qui déterminent la direction du mouvement. Les arcs postérieurs sont également reliés par de nombreux ligaments qui conditionnent l'amplitude des mouvements du rachis. Les muscles qui étirent le tronc vers l'arrière (les extenseurs) sont attachés aux arcs postérieurs. D'importants sites d'attachement sont représentés par trois processus osseux (deux latéralement et une apophyse épineuse) sur chaque arc postérieur vertébral.

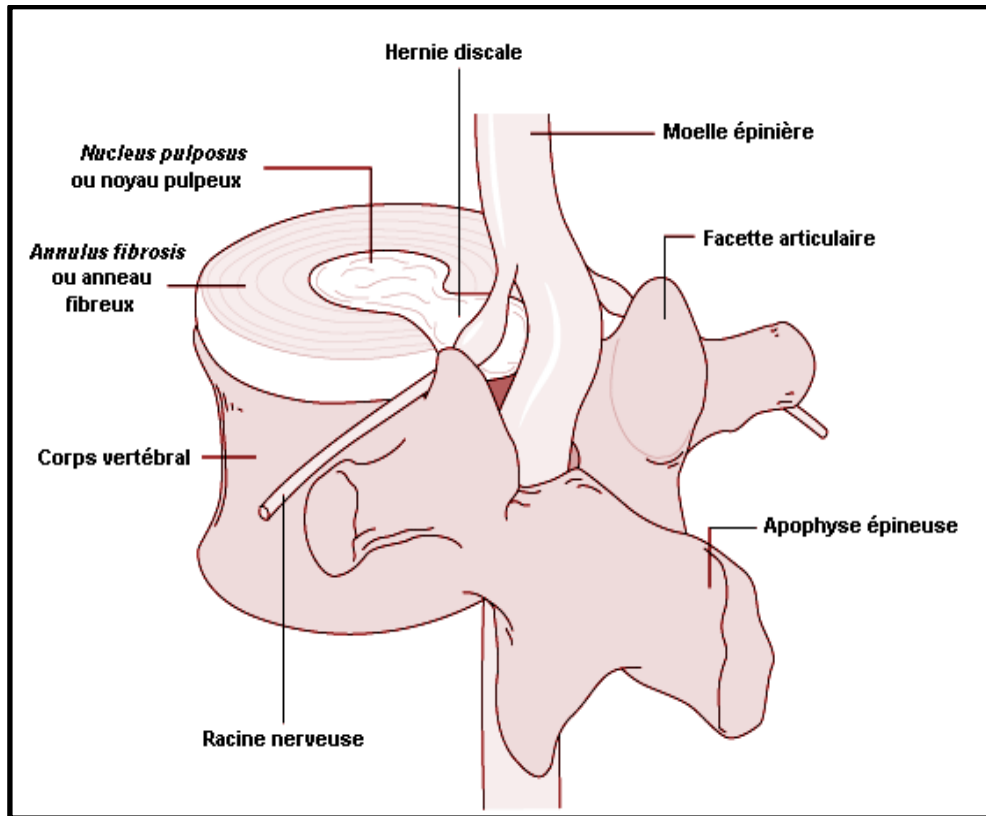


**Figure 21 : Unité fonctionnelle de base du rachis**

Le cordon médullaire se termine au niveau des premières vertèbres lombaires (L1-L2). Le canal lombaire contient les extensions de la moelle, appelées queue de cheval, qui est composée des racines nerveuses rachidiennes.

Les racines nerveuses sortent du canal rachidien par paires à travers les trous de conjugaison (foramens). Une collatérale innerve les tissus du dos à partir de chaque racine nerveuse rachidienne. Il y a des terminaisons nerveuses qui transmettent les sensations douloureuses (extrémités nociceptives) dans les muscles, les ligaments et les articulations.

Dans un disque intervertébral sain, de telles extrémités ne sont pas retrouvées, à l'exception de la partie la plus externe de l'annulus. Cependant, le disque est considéré comme la plus importante source de lombalgies. Les ruptures de l'anneau sont connues pour être douloureuses. Comme séquelle de la dégénérescence du disque, une hernie de la partie interne semi-gélatineuse du disque intervertébral, le noyau, peut se produire à l'intérieur du canal rachidien et conduire à une compression ou à une inflammation le long du nerf rachidien avec des symptômes et des signes de sciatique (voir figure 22).



**Figure 22 : La hernie du disque intervertébral**

Les muscles assurent la stabilité et la mobilité du dos. Les muscles du dos redressent le tronc (extension) et les muscles abdominaux lui permettent de se pencher en avant (flexion). La fatigue due à des charges soutenues ou répétées, une brutale hypersollicitation des muscles ou des ligaments peuvent être responsables d'une douleur lombaire, bien que l'origine exacte d'une telle douleur soit difficile à localiser. Tout le monde n'est pas d'accord quant au rôle des lésions des tissus mous dans les affections lombaires.

## 2.3- Les lombalgies

### 2.3.1- La fréquence

Les estimations de prévalence de la lombalgie varient en fonction des définitions utilisées dans les études. Les taux de prévalence des syndromes lombalgiques dans l'ensemble de la population finlandaise de plus de 30 ans sont donnés dans le tableau 1. Trois personnes sur quatre présentent une lombalgie (et une sur trois, une sciatalgie) au cours de leur vie. Chaque mois, une personne sur cinq souffre de lombalgie ou de sciatalgie et, à n'importe quel moment, une personne sur six présente un syndrome lombalgique cliniquement confirmé. La sciatique ou la hernie discale intervertébrale sont moins fréquentes et touchent 4% de la population.

Environ la moitié de ceux qui ont un syndrome lombalgique présentent des déficiences fonctionnelles qui sont sévères dans 5% des cas. La sciatique est plus fréquente chez l'homme que chez la femme, mais les autres affections lombaires sont réparties également entre les deux sexes. La lombalgie est relativement inhabituelle avant l'âge de 20 ans, mais sa prévalence augmente régulièrement jusqu'à l'âge de 65 ans, après quoi elle diminue.

|  |                           |                           |
|--|---------------------------|---------------------------|
|  | <b>Hommes<sup>+</sup></b> | <b>Femmes<sup>+</sup></b> |
|--|---------------------------|---------------------------|

|                                                                                               |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
| Prévalence de la lombalgie au cours de l'existence                                            | 76,3 | 73,3 |
| Prévalence de la sciatalgie au cours de l'existence                                           | 34,6 | 38,8 |
| Prévalence sur cinq années de sciatalgie ayant causé un repos au lit d'au moins deux semaines | 17,3 | 19,4 |
| Prévalence de lombalgie ou de sciatalgie d'une durée d'un mois                                | 19,4 | 23,3 |
| Prévalence ponctuelle cliniquement vérifiée de                                                |      |      |
| Syndrome douloureux lombaire                                                                  | 17,5 | 16,3 |
| Sciatique ou hernie discale*                                                                  | 5,1  | 3,7  |

+ rapportée à l'âge.

\* p <0,005.

**Tableau 1 : Prévalence des affections du dos dans la population finlandaise de plus de 30 ans, exprimés en pourcentages**

La prévalence des changements dégénératifs du rachis lombaire augmente avec l'âge. Environ la moitié des hommes de 35 à 44 ans et neuf hommes sur dix de 65 ans et plus présentent des signes radiographiques de dégénérescence discale du rachis lombaire. Des signes de dégénérescence discale sévère sont relevés dans 5 à 38% de ces cas, respectivement. Les modifications dégénératives sont un peu plus fréquentes chez l'homme que chez la femme. Les individus qui présentent des modifications dégénératives du rachis lombaire ont plus souvent des lombalgies que ceux qui n'en présentent pas, mais les modifications dégénératives sont également courantes chez des personnes qui n'ont aucun symptôme. En imagerie par résonance magnétique (RMN), la dégénérescence discale est retrouvée chez 6% de femmes asymptomatiques de 20 ans ou moins, et chez 79% de celles âgées de 60 ans et plus.

En général, la lombalgie est plus courante chez les travailleurs manuels. Aux Etats-Unis, ce sont les manutentionnaires, les aides-soignants et les chauffeurs de camions qui ont les taux les plus élevés d'accidents du dos ouvrant droit aux soins.

### 2.3.2- Les facteurs de risque au travail

Des études épidémiologiques ont confirmé que la lombalgie, la sciatique, la hernie discale intervertébrale et les modifications dégénératives du rachis lombaire étaient associées au travail physique lourd. Malgré cela, on ne sait pas bien quelles sont les limites admissibles pour la charge physique du dos.

La lombalgie est liée au levage ou au transport fréquents d'objets lourds ou encore à des efforts, également fréquents, de traction ou de poussée. Les forces d'extension élevées s'appliquent aux muscles et aux ligaments et celles de fortes compressions aux os et aux surfaces articulaires. Ces forces sont à l'origine de lésions mécaniques des corps vertébraux, des disques intervertébraux, des ligaments et des parties postérieures des vertèbres. Ces lésions peuvent être causées par des surcharges brutales ou par une fatigue due à une mise en charge répétée. Les microtraumatismes répétés qui surviennent, même sans que l'on s'en aperçoive, sont généralement considérés comme étant la cause principale de la dégénérescence du rachis lombaire.

La lombalgie est aussi associée à des mouvements fréquents ou prolongés de torsion ou de flexion antérieure ou à des positions du tronc autres que neutres. La mobilité est nécessaire à la nutrition du disque intervertébral et les positions statiques peuvent gêner cet apport nutritif. Dans les autres tissus mous, la fatigue peut apparaître. La posture assise de façon prolongée dans une position fixe (chez la couturière à la machine ou chez le conducteur de véhicules à moteur) augmente aussi le risque de lombalgie.

On a constaté que la conduite prolongée d'un véhicule à moteur augmentait le risque de lombalgie, de sciatique ou de hernie discale. Les conducteurs sont en effet exposés à des vibrations transmises à

l'ensemble du corps, qui ont un effet délétère sur la nutrition discale. Les soubresauts liés aux chaussures défoncées, la contrainte posturale et la manutention effectuée par les chauffeurs professionnels peuvent également contribuer à ce risque.

Le traumatisme direct causé par un accident tel qu'une chute ou une glissade est une cause évidente de lésion du dos. Il est prouvé que non seulement les lésions aiguës mais aussi les lésions traumatiques du dos contribuent de façon notoire au développement des syndromes lombalgiques chroniques.

La lombalgie est associée à différents facteurs psychosociaux professionnels: travail monotone ou sous pression, absence de soutien de l'entourage, collègues ou supérieurs. Les facteurs psychosociaux jouent un rôle reconnu dans le déclenchement de la lombalgie, ainsi que dans sa guérison, mais tout le monde ne s'accorde pas quant à leur importance étiologique précise.

## 2.4- Comportement biomécanique du disque sain et dégénérer

### 2.4.1- Comportement mécanique du disque sain

La structure complexe du disque lui confère la capacité de résister à des chargements mécaniques élevés. Sous l'effet d'une charge compressive, la pression au sein du nucleus augmente et des contraintes radiales de tension sont transmises à la structure fibreuse de l'annulus (figure 23a), qui tend à limiter la protubérance des parois discales.

Lorsque la contrainte exercée est supérieure à celle que peut supporter le nucleus, le fluide est expulsé, ce qui entraîne l'accroissement de la concentration des molécules de protéoglycanes dans le disque. La pression osmotique, qui tend à conserver le fluide au sein du disque par l'attraction des charges négatives associées aux protéoglycanes, est alors augmentée.

Le processus d'exsudation prend fin lorsque l'équilibre est atteint entre la pression osmotique et la contrainte externe appliquée sur le disque. Lors des moments de repos, les charges appliquées sur le disque étant diminuées, le fluide réintègre le milieu afin qu'un nouvel équilibre osmotique soit atteint. Ce comportement illustre les processus menant à la nature viscoélastique discale.

Les matériaux biphasiques composés d'un solide élastique et d'un fluide visqueux se comportent de manière viscoélastique. Selon le type de sollicitations appliquées, deux phénomènes sont observables, la relaxation de contraintes ou le fluage. La relaxation résulte de l'application d'une déformation constante, causant une réduction graduelle de la contrainte interne obtenue par un retour à l'équilibre du milieu. Le fluage est généré par l'application d'une charge constante ayant pour effet d'accroître progressivement la déformation lors de l'exsudation du fluide. De ce fait, tant que l'équilibre entre la pression osmotique et celle exercée n'est pas satisfait, le fluide continue de s'écouler et le matériau de se déformer.

Le disque intervertébral lombaire est principalement soumis à des contraintes compressives résultant du poids du corps, mais également à des modes de sollicitation physiologiques en inflexion latérale, flexion/extension et torsion lors des activités quotidiennes. Lorsque soumis à un chargement résultant de l'inclinaison du disque, le nucleus s'excentre dans la direction inverse de l'inclinaison (figure 23b).

Selon la direction du chargement, une partie de l'annulus est soumise à des efforts en compression alors que l'autre subit une tension, majoritairement supportée par les fibres de collagène de l'annulus.

Également, les fibres de collagènes sont très sollicitées lors d'un effort en torsion, elles peuvent même être chargées directement, sans l'action de la pressurisation du nucleus.

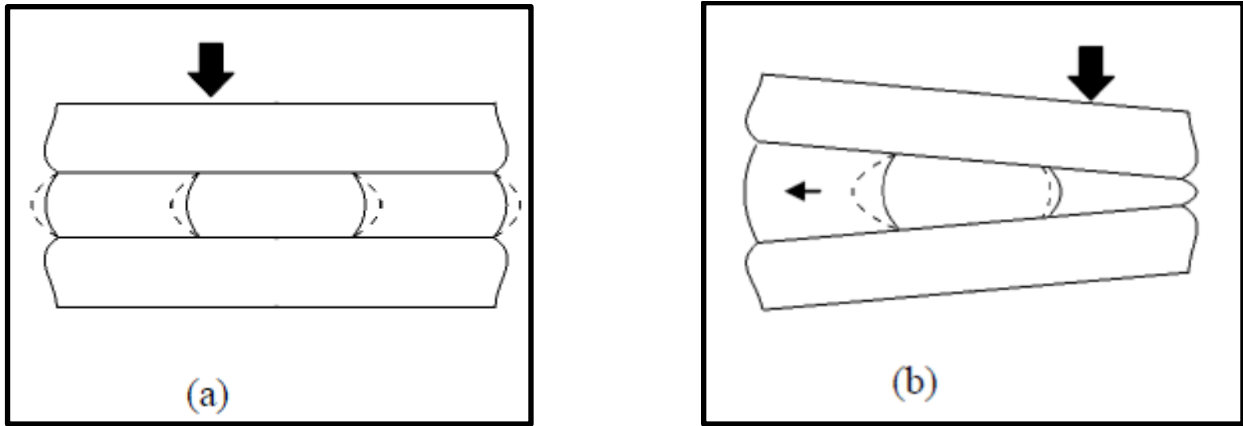
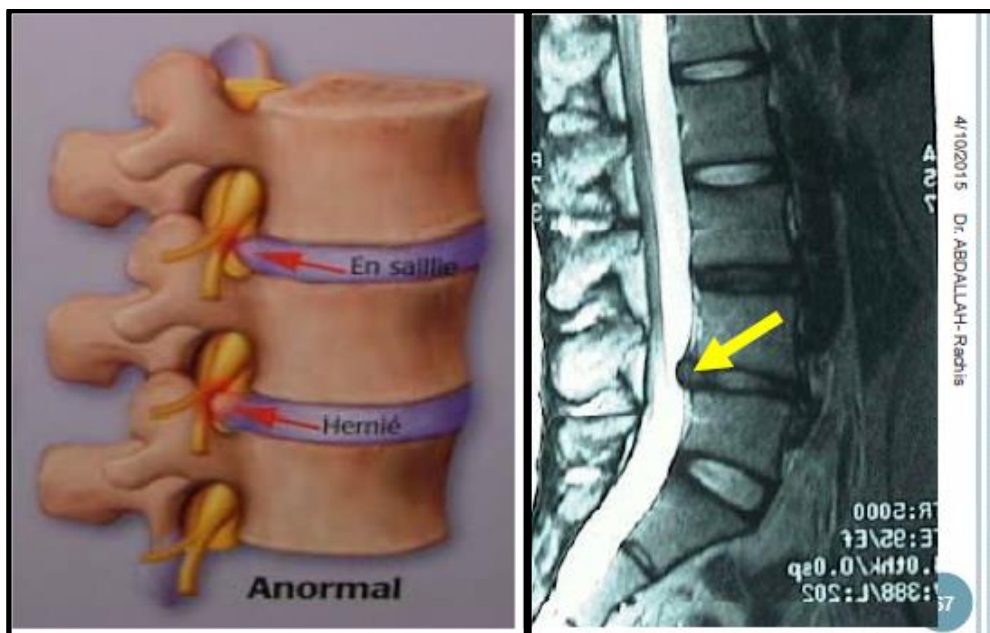


Figure 23 : Réaction du disque intervertébral lombaire lorsque soumis à un chargement en compression pure (a) ainsi qu'à un chargement en flexion (b).

### Dégénérescence du disque intervertébral

La dégénérescence du disque intervertébral est une pathologie qui entraîne des changements au niveau des aspects biologique et morphologique du disque. Les fonctions biomécaniques de l'articulation intervertébrale s'en trouvent altérées. Puisque la dégénérescence cause la dégradation mécanique du tissu discal, il est probable que le sujet souffre de maux de dos, principalement dans la région lombaire, puisqu'il s'agit du segment rachidien le plus sollicité (voir figure 24)

Le mal de dos est une problématique de santé publique majeure, puisqu'environ 80 % de la population en souffre au moins une fois dans leur vie. Il s'agit de la cause la plus fréquente de limitation d'activité pour les personnes âgées de 45 ans et moins.





**Figure 24 : image de gauche présentant des disques dans un état anormal présentant une hernie sur disque inférieur et une sciatique au niveau du disque supérieur deux pathologies due à la dégénérescence du disque**

**L'image de droite présentant une radiographie de la région lombaire ou il y'a glissement du disque L4/L5 vers la moelle épinière suite a un écrasement causant une pression sur cette dernière**

### **Manifestation biologique et morphologique de la dégénérescence**

La dégénérescence du disque intervertébral est une pathologie dont les symptômes sont semblables à ceux d'un vieillissement normal du disque. Avec la dégénérescence, la concentration en protéoglycanes et la teneur en eau diminuent au sein du disque, plus particulièrement dans le nucleus. La composition de la matrice extracellulaire est également modifiée avec l'apparition des collagènes de type III, VI et X.

De plus, dans le nucleus, la proportion de collagène de type I croît considérablement, et devient le type de collagène majoritaire de cette région. Tous ces changements impliquent la transformation des propriétés du disque, qui a maintenant plutôt les particularités d'un solide que celles d'un liquide.

D'un point de vue macroscopique, la désorganisation et la fissuration des lamelles de l'annulus sont observées avec l'évolution de la dégénérescence. En raison du retrait des molécules de protéoglycanes, la pression intradiscale diminue, le disque s'affaisse et le taux de vascularisation et d'innervation augmente. L'aspect gélatineux du nucleus disparaît au profit d'une apparence fibreuse, semblable à celle de l'annulus; la frontière entre les deux structures devient diffuse.

Il est difficile de faire la différence entre le disque dégénéré (fissures, affaissement) et le disque âgé (dégradation normale dû au vieillissement du tissu). Le disque dégénéré pathologique pourrait être défini comme une accélération du processus normal de vieillissement, causée par une combinaison de mécanismes tels les problèmes de nutrition, l'accumulation de déchets et les fractures de la matrice fibreuse sous l'action de charges mécaniques.

Les échanges entre le disque et son environnement se trouvent diminués avec la dégénérescence en raison de la calcification des plateaux cartilagineux et de la diminution des artères en périphérie de l'annulus. Le disque dégénéré est privé de nutriments et les déchets s'y accumulent, causant une diminution du PH, ce qui favorise la nécrose cellulaire.

Les cellules étant responsables du renouvellement de la matrice cellulaire et ayant besoin des nutriments pour fonctionner, la diminution de viabilité des cellules contribue à la dégénérescence discale.

Outre les composants du disque, des changements secondaires associés à la dégénérescence sont observés sur les structures du rachis, telles la présence d'ostéophytes, les contraintes élevées dans les facettes articulaires et l'arthrose.

### **Classification de la dégénérescence**

Afin d'évaluer le degré de dégénérescence, différentes échelles de gradation ont été élaborées. Le système de gradation de Thompson, présenté au tableau 2, est l'un des plus connus dans la littérature. Il est basé sur l'apparence morphologique des différentes zones du disque dans le plan transverse.

| <b>Grade</b> | <b>Nucleus</b> | <b>Annulus</b> | <b>Plateau cartilagineux</b> | <b>Corps vertébral</b> |
|--------------|----------------|----------------|------------------------------|------------------------|
|--------------|----------------|----------------|------------------------------|------------------------|

|   |                                           |                                                       |                                                                                                          |                                                     |
|---|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1 | Gel capable de gonfler                    | Lamelles fibreuses discrètes                          | Hyalin d'épaisseur uniforme                                                                              | Bords arrondis                                      |
| 2 | Tissu fibreux blanc à la périphérie       | Infiltration de matériau nucléaire entre les lamelles | Épaisseur irrégulière                                                                                    | Bords pointus                                       |
| 3 | Tissu fibreux consolidé                   | Perte de démarcation entre annulus et nucleus         | Défauts focaux dans le cartilage                                                                         | Quelques chondrophytes ou ostéophytes sur les bords |
| 4 | Fissures horizontales                     | Disruption focale                                     | Fibrocartilage provenant de l'os sous-chondral; irrégularités et sclérose focale dans l'os sous-chondral | Ostéophytes < 2mm                                   |
| 5 | Fissures étendues de l'annulus au nucleus |                                                       | Sclérose diffuse                                                                                         | Ostéophytes >2 mm                                   |

**Tableau 2 : Classification macroscopique de Thompson pour la dégénérescence discale**

#### 2.4.2 Comportement biomécanique du disque dégénéré

Avec la dégénérescence, la pression osmotique est réduite en raison de la diminution de protéoglycanes dans le nucleus, ce qui contribue à diminuer la résistance à l'affaissement du nucleus. Dans le disque sain, la pression ressentie dans le nucleus est transmise à l'annulus par le biais de contraintes de tension tangentielles et radiales.

Par contre, lorsque le disque dégénère, le nucleus s'affaisse et l'annulus doit reprendre une partie des charges en compression, ce qui favorise le délaminage et la création de fissures.

De manière générale, la structure discale se rigidifie avec la dégénérescence. L'affaissement du disque conduit à la perte de hauteur discale et à l'augmentation de l'aire transverse, lesquelles contribuent à rigidifier le tissu. Le module d'élasticité de l'annulus augmente considérablement dans le disque dégénéré, tandis que celui du nucleus tend à diminuer. Ainsi, pour l'application d'un même chargement, les contraintes ressenties dans le nucleus seront plus importantes pour le disque sain que pour le disque dégénéré.

La perméabilité est une propriété physique directement liée à la composition du disque intervertébral. Dans l'annulus sain, la perméabilité est anisotrope, alors qu'elle devient isotrope dans l'annulus dégénéré. De manière générale, la perméabilité augmente avec l'évolution de la dégénérescence. Le fluide est expulsé plus rapidement lorsque le disque est dégénéré, ce qui accélère le taux de déformation du disque, et favorise ainsi les risques de blessures.

#### **Modèles in vivo pour l'étude biomécanique de la dégénérescence**

Plusieurs études expérimentales ont été réalisées afin d'évaluer l'effet de la dégénérescence sur le comportement biomécanique du disque intervertébral, plus spécialement sur la transmission de chargement et la mobilité.

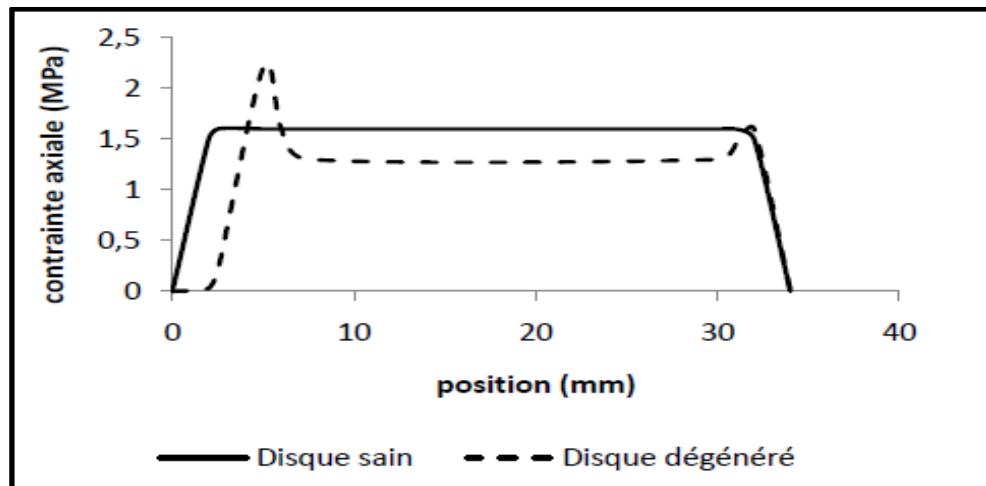
#### **Transmission de chargement**

La pression hydrostatique du nucleus est une composante clef caractérisant la capacité du disque à reprendre de lourdes charges.

Pour le disque sain, peu importe le type de chargement, le profil de contrainte est uniforme et symétrique, alors que pour le disque dégénéré, le profil de contrainte est asymétrique, principalement pour

l'application de chargements combinés (exemple : compression et flexion). Selon les résultats des études, le disque dégénéré arbore un comportement se rapprochant davantage à un solide.

Dans une autre étude expérimentale sur des disques intervertébraux cadavériques afin de mieux saisir les dysfonctionnements du disque lors de la dégénérescence. Il a été conclu que la contrainte axiale diminue au centre du nucleus avec la dégénérescence, alors qu'elle augmente de manière ponctuelle dans l'annulus, plus particulièrement dans la région postérieure (figure 25).



**Figure 25 : Profil de contrainte des disques normal et dégénéré in vitro. Les côtés gauche et droit correspondent respectivement aux régions postérieure et antérieure du disque. (Selon McNally et coll., 1996)**

LE DISQUE INTERVERTÉBRAL LOMBAIRE EST UN TISSU ELASTIQUE RESPONSABLE DE LA MOBILITÉ DU TACHIS. LORSQUE LE DISQUE EST ENDOMMAGÉ, SA MOBILITÉ EST ALTÉRÉE Plusieurs études ont été réalisées afin d'identifier une relation entre le niveau de dégénérescence et l'amplitude de mobilité discale, selon différents cas de chargements physiologiques : rotation axiale, inflexion latérale, flexion et extension (tableau 3).

Des tests de compression, flexion et extension sur des unités fonctionnelles lombaires intactes et lésées ont été réalisés (fissures de l'annulus, retrait du nucleus). De manière générale, selon les différents cas de sollicitation, la mobilité des disques intacts est toujours inférieure à celle des disques endommagés. Elle augmente par la suite plus les dommages causés aux disques sont importants.

Selon l'ensemble des études expérimentales réalisées afin de comprendre la relation entre la mobilité et la dégénérescence discale, la rotation axiale et l'inflexion latérale ont été identifiées comme étant les plus susceptibles d'influencer l'amplitude de mouvement des disques selon le niveau de dégénérescence.

Plusieurs auteurs ont observé une variation importante de l'amplitude de mouvement en inflexion latérale en relation avec le niveau de dégénérescence du disque en appliquant un chargement de 10 Nm sur des unités fonctionnelles cadavériques, ont observé une diminution de la mobilité associée à une augmentation du niveau de dégénérescence.

En effet, de manière générale, la mobilité tend à croître avec la dégénérescence pour des chargements en torsion. Ceci est principalement causé par la formation de fissures qui accompagne la dégénérescence.

La flexibilité du disque est régie par les propriétés discales géométriques et mécaniques. Avec l'évolution de la dégénérescence, la perte de hauteur et l'augmentation de l'aire transverse permettent d'accroître la rigidité du disque, et tendent ainsi à décroître l'amplitude de mouvement. Inversement, la perte d'eau

dans le nucleus, l'apparition de fissure dans l'annulus et l'augmentation de la perméabilité discale contribuent à accroître la flexibilité, principalement en torsion.

Outre la dégénérescence, d'autres paramètres influents sont en jeu lors des tests : sexe, niveau vertébral, âge, états des éléments postérieurs, etc. Ainsi, il serait nécessaire de pouvoir contrôler ces facteurs afin d'isoler l'effet de la dégénérescence, ce qui est difficile à envisager avec les études expérimentales.

UFL = Unités fonctionnelles lombaires

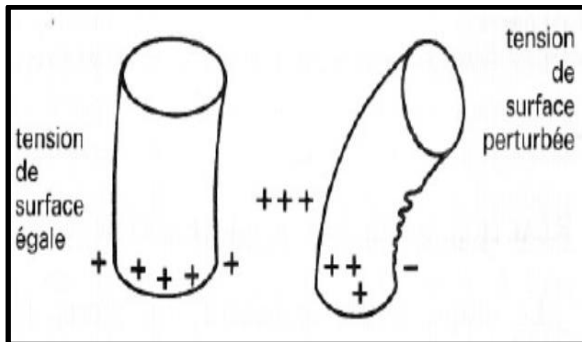
| Études                    | Échantillons                                                                  | Moment maximal appliqué | Types de chargements pour lesquels la mobilité est influencée par la dégénérescence | Observations                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mimura et coll., (1994)   | 12 segments lombaires (35 – 64 ans)<br>Tous mâles                             | 10 Nm                   | Inflexion latérale                                                                  | Variation de propriétés mécaniques accroît la flexibilité<br>Variation de propriétés géométriques décroît la flexibilité                                                                         |
| Krismer et coll., (2000)  | 36 segments lombaires (20 – 92 ans)<br>9 segments femelles/ 27 segments mâles | 8,5 Nm                  | Rotation axiale                                                                     | Sous un chargement en rotation axiale, la flexibilité augmente faiblement pour un niveau moyen de dégénérescence, et augmente de manière plus importante pour un niveau de dégénérescence élevé. |
| Fujiwara et coll., (2000) | 110 UFL (39 - 88 ans)<br>52 femelles/58 mâles                                 | 6,6 Nm                  | Mâle : Inflexion latérale + Rotation axiale + Flexion<br>Femelle : Rotation axiale  | De façon générale, la flexibilité augmente pour un niveau moyen de dégénérescence et diminue pour un niveau élevé                                                                                |
| Tanaka et coll., (2001)   | 114 UFL (39 - 87 ans)<br>49 femelles/65 mâles                                 | 5,7 Nm                  | Inflexion latérale<br>Rotation axiale                                               | La rotation axiale est le type de chargement pour lequel la mobilité est la plus influencée par la dégénérescence                                                                                |

Tableau 3 : Études expérimentales investiguant l'impact de la dégénérescence discale sur la flexibilité du rachis

### 3-Biomécanique de la colonne lombaire

#### 3.1-Introduction

Le segment lombaire du rachis est constitué de cinq vertèbres connectées en haut à la zone transitionnelle dorso-lombaire, et reposant en bas sur le socle du sacrum, considéré comme fixe. L'analogie mécanique est un tube peu incurvé (voir figure 26),



| Contraintes                 |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| Disques                     | Ligaments               |
| Rotation + + + (annulus)    | Flexion-Extension + + + |
| Flexion-Extension + + +     | Traction + +            |
| Écrasement + +(amortisseur) | .                       |
| Traction?                   |                         |

Figure 26. - Représentation biomécanique de la colonne vertébrale: une colonne creuse dont les tensions de surface varient lorsque l'on s'écarte de l'attitude naturelle. Dans la position de lordose moyenne courante, les tensions de surface sont les mêmes tout autour de la colonne creuse. Le changement de position, qu'il s'agisse d'une lordose exagérée ou d'une lordose effacée, résulte forcément en une exagération de tension de surface d'un côté, un écrasement de l'autre.

la pression verticale étant supportée par trois colonnes : la colonne des articulations inter-corporéales {les disques intervertébraux) d'une part, et les colonnes des articulations interfacéaires ou «zygapophyses » en langage anatomique moderne.

#### 3.2- Caractéristiques du disque intervertébral

Le disque intervertébral fonctionne à la fois comme un amortisseur de compression verticale, un organe qui dissipe les chocs et vibrations venus du membre inférieur, un lien entre deux vertèbres, enfin un organe de mobilité qui doit être susceptible de répondre sans dommages à des contraintes de compression et de traction.

#### Hystérésis

Lorsqu'on soumet un disque intervertébral à la compression, puis que l'on relâche la contrainte, on obtient un retour à l'épaisseur d'origine, dans un délai compris entre cinq et dix minutes.

#### Déformation et rupture

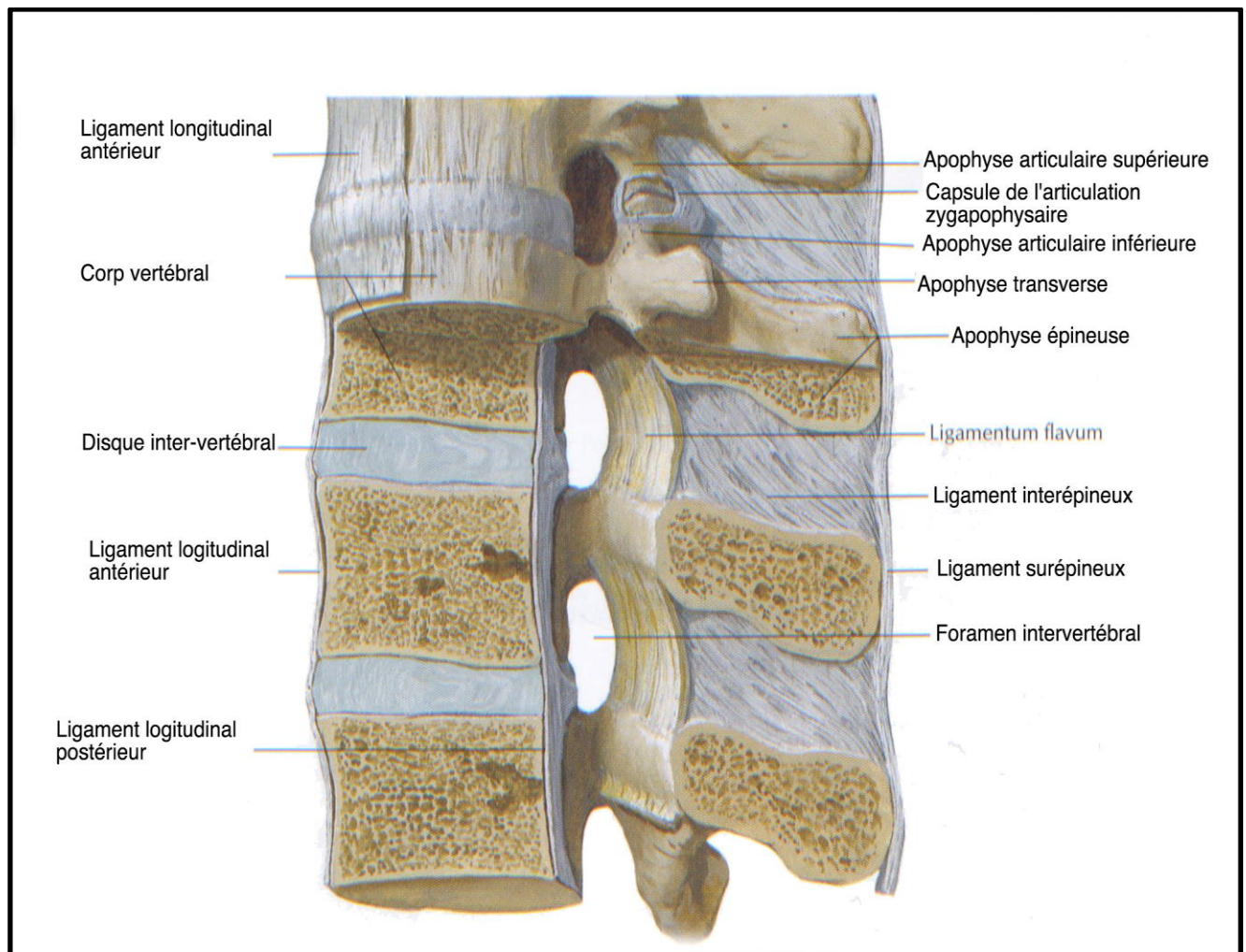
Les chercheurs proposent une courbe idéale qui représente les réactions du disque à la compression: jusqu'à l'application d'une force de 800 newtons le disque se laisse aisément écraser, puis il devient beaucoup plus rigide, nécessitant pour les déformations qui suivent l'application d'une contrainte beaucoup plus intense. Suivant les échantillons et le niveau où l'échantillon de disque a été prélevé, la rupture se produira entre 3 200 et 4000 newtons.

#### Réaction du disque à la traction

Le disque résiste également aux efforts de traction, en particulier ceux qui sont imposés à sa partie antérieure lors d'un effort d'extension du rachis, où à sa partie postérieure lors d'un effort en flexion, La partie postérieure du disque résiste mieux à la traction : par contraste, la partie antérieure du disque se laisse moins déformer lors des efforts en compression.

### Élasticité et points de rupture des ligaments du rachis

Le surtout ligamentaire du rachis se compose des formations suivantes: ligament longitudinal antérieur (LLA), ligament longitudinal postérieur (LLP), ligamentum flavum ou ligament jaune à la partie postérieure du canal rachidien, ligament interépineux placé entre les apophyses épineuses, ligament surépineux placé très postérieurement le long des apophyses épineuses, ligament inter-transversaire entre les apophyses transverses (voir figure. 27).



**Figure 27. - Aspect de la colonne ostéo-disco-ligamentaire, soulignons l'importance des moyens d'union passif. A noter la direction particulière des fibres du ligament inter-épineux, oblique en haut et en arrière.**

La rupture d'un ligament du rachis se produit d'une manière assez particulière. A l'inverse d'autres structures ligamentaires ou tendineuses qui se rompent soudainement lorsque le maximum d'extensibilité est dépassé par la charge, les ligaments du rachis passent par deux étapes successives: tout d'abord un

premier pic signale l'allongement extrême du premier lot de faisceaux de collagène, et l'entrée en jeu des réserves. Puis un second pic signale la rupture complète de toutes les fibres.

Le tableau 4 reprend, pour chacune des structures ligamentaires, l'apparition du premier pic de rupture.

| Nom du ligament                       | Valeur de rupture en N | Déformation en mm |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|
| L.L.A. (niveau L3-L4)                 | 525                    | 6                 |
| L.L.A. (niveau L4-L5)                 | 504                    | 6.2               |
| L.L.P.(niveau L2-L3)                  | 410                    | 3.4               |
| L.L.P.( niveau L3-L4)                 | 366                    | 5.2               |
| Ligament jaune (niveau L3-L4)         | 510                    | 6.2               |
| Ligament inter-épineux (niveau L4-L5) | 270                    | 3.5               |
| Ligament sur épineux (niveau L5-S1)   | 135                    | 5.2               |

Tableau 4. - Résistance à la traction des échantillons de ligaments

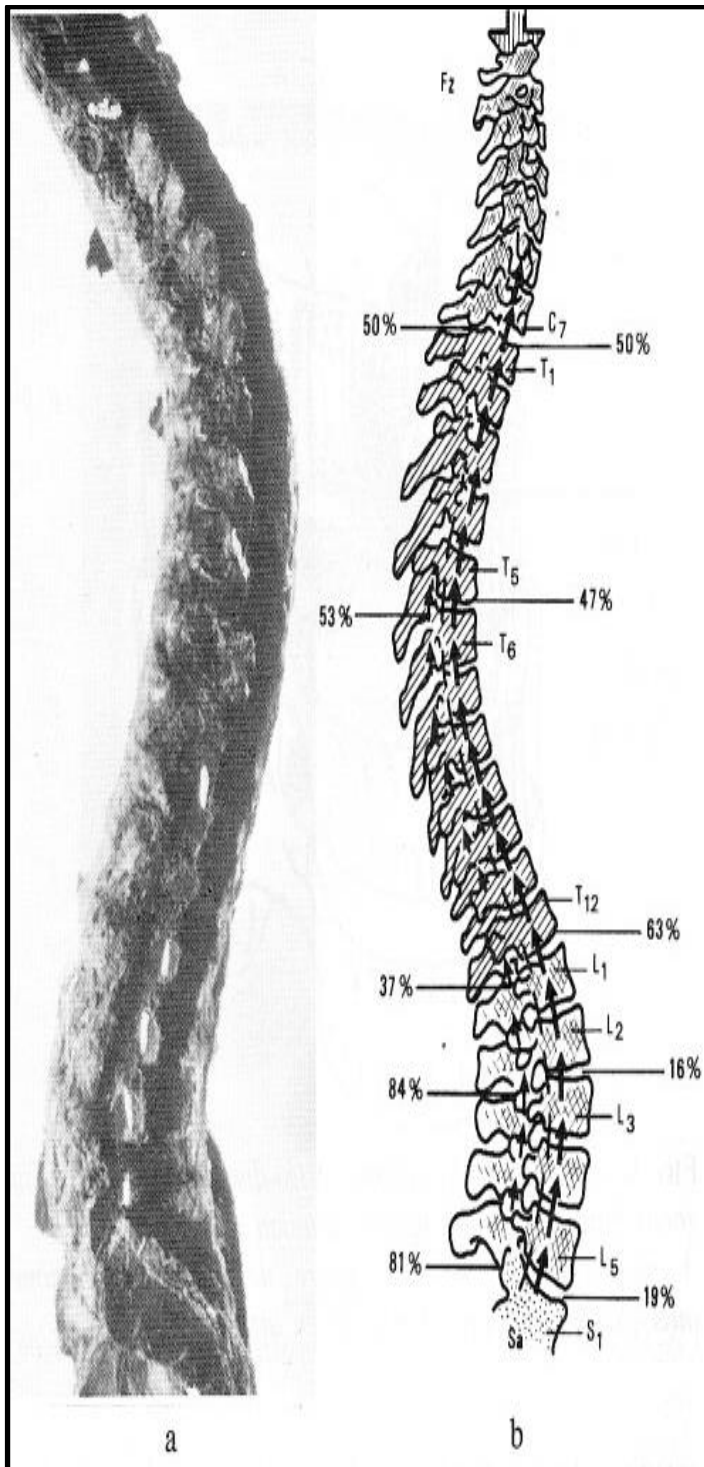
Il est important de noter que, entre les apophyses épineuses L5-S1, il n'y a plus de ligaments inter épineux et le ligament susépineux se trouve remplacé par des fibres de l'aponévrose lombaire. La structure la plus solide à ce niveau semble être constituée par les tendons des muscles spinaux.

A noter également que le ligamentum flavum, ou ligament jaune, est une structure tout à fait particulière, constamment précontrainte à 15 % de sa longueur d'origine, ce qui signifie qu'il ne se détend complètement que dans l'extension. Ce ligament a été nommé « syndesmose élastique », ce qui rend compte de son rôle très important d'union solide et élastique des pièces osseuses du rachis

### 3.3- Répartition des contraintes entre les articulations inter-corporelles et articulaires postérieures

De nombreux auteurs se sont attachés à dissocier les valeurs de contraintes dissipées par le disque intervertébral et celles qui s'appliquent à la double colonne des articulaires postérieures du rachis. L'intensité des contraintes mesurées ou inférées augmente à mesure que l'équipement devient plus performant. Les articulaires postérieures ne supportaient que 20 % de la contrainte verticale, mais il s'agissait d'une évaluation par soustraction.

Cet auteur mesurait les contraintes interdistales, puis attribuait aux articulaires postérieures ce qu'il n'avait pas pu mesurer. L'utilisation de transducteurs permettant de mesurer les déplacements micrométriques des pièces osseuses en réponse à une contrainte appliquée verticalement aux articulaires postérieures des valeurs comprises entre 25 et 47 % de la contrainte totale. Ce facteur mécanique peut expliquer certaines lombalgies distinctement ressenties dans les articulaires postérieures (figure 28).



**Figure 28 - Les contraintes verticales sont réparties entre les articulations intercorporeales et les zygapophyses. La répartition des contraintes n'est pas égale à chaque étage du rachis, et les structures qui dissipent cette énergie sont également très différentes:**

**a) l'orientation des zygapophyses change à chaque étage: en haut une articulaire postérieure du rachis cervical, au milieu deux articulaires postérieures dorsales, en bas les articulaires postérieures lombaires;**

**b) résultat de la compression d'une colonne ostéo-discoligamentaire: dans la région D12-L1 les articulations intercorporeales dissipent les deux tiers de la contrainte, c'est également le lieu où se produisent les fractures du mur antérieur. Plus bas, les zygapophyses acceptent 80 % de la contrainte, c'est la région du dos où se manifestent les lombalgies chroniques qui peuvent parfois être attribuées à une**

### **Mécanique des zygapophyses**

Les articulaires postérieures, ou en terminologie anatomique plus moderne « zygapophyses » paraissent mal adaptées à leurs rôles de support d'une contrainte verticale. En effet, les surfaces articulaires sont disposées verticalement, les supérieures enfilées dans les inférieures à la manière d'une série de pots de fleurs. Il s'agit d'articulations synoviales, ce qui signifie qu'elles sont sensibles à 6 grammes de pression seulement et ne peuvent opposer aucune résistance par friction.

Lors d'une extension, la surface articulaire supérieure dérape vers le bas et son mouvement est arrêté par la partie inférieure de la capsule articulaire. Cette capsule n'est pas très épaisse, environ 2 millimètres, mais elle est renforcée à sa partie inférieure par un épais matelas graisseux et souvent une formation méniscoïde qui permet sans doute d'absorber une partie de la contrainte. A l'extrême, la vertèbre

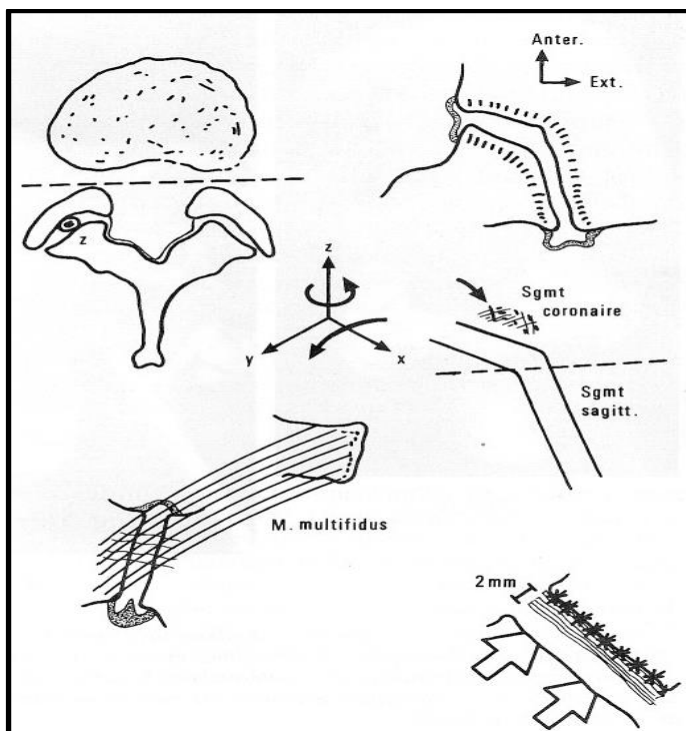


supérieure va s'appuyer sur le « pars interarticularis » de la vertèbre inférieure. Ayant soumis les «zygapophyses » à une compression progressive, la rupture de la capsule a eu lieu pour une valeur de 6 000 newtons. Il n'y avait toujours pas de fracture osseuse.

A la partie supérieure à l'articulation, la capsule est renforcée par un épais matelas de fibres diagonalement issues du ligamentum flavum. Ce rempart constitue la berge latérale du canal rachidien.

A la partie postérieure, la capsule se trouve renforcée par la terminaison des fibres musculaires du multifidus de chaque étage, muscles issus de l'apophyse transverse immédiatement supérieure (figure 29). Les examens de tomographie scanner ont permis d'étudier la forme des surfaces articulaires des zygapophyses, celles-ci sont en règle générale :

- a) non symétriques entre le côté droit et le côté gauche;
- b) mal congruente ou non congruente.



**Figure 29.** - Cette figure composite résume la réflexion engagée aujourd'hui sur les zygapophyses : il existe un segment coronaire chargé de résister aux efforts de flexion du rachis lombaire, et un segment sagittal chargé de résister aux contraintes en rotation.

A la partie postérieure, le muscle multifidus s'attache sur la partie postérieure de la capsule articulaire. Un bourrelet graisseux renforce la partie inférieure de cette capsule. Des contraintes répétées sur un matériau de type cartilage, les fissures apparaissent à 2 mm à l'intérieur du matériau, ce qui explique l'aspect intact en superficie de ce cartilage, et le fait qu'il s'arrache du lit osseux.

### 3.4- Mouvements isolés des vertèbres lombaires

La colonne lombaire se caractérise par une mobilité quasi nulle en rotation axiale (entre 2 et 6 degrés goniométriques), une mobilité très modérée en ce qui concerne l'inclinaison latérale (entre 4 et 10 degrés goniométriques), et une mobilité importante antéro-postérieure dans ce que nous nommons couramment flexion-extension (entre 10 et 20 degrés goniométriques). Il est remarquable de voir que c'est le segment L5-S1, mal pourvu en ligaments comme nous l'avons vu plus haut, qui fournit la valeur la plus importante de flexion-extension: 20 degrés, c'est-à-dire 5 degrés de plus que le segment qui le suit immédiatement, l'espace L4-L5 (figure. 30).

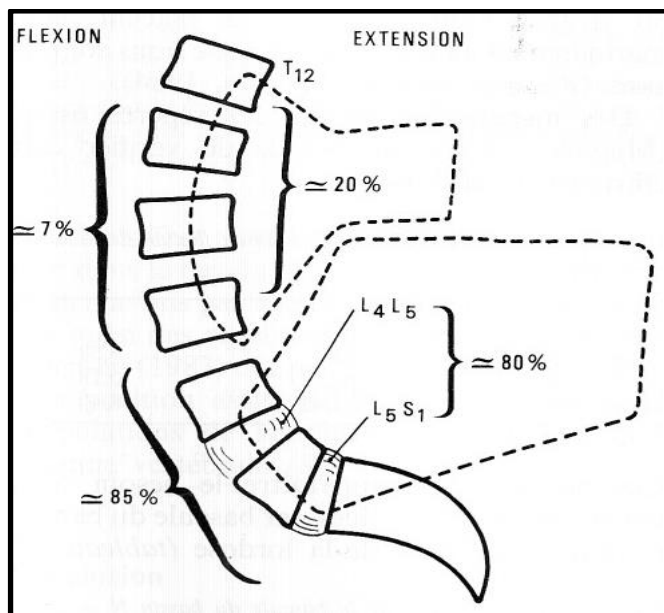
Ce segment L5-S 1 possède également la plus grande liberté en rotation axiale de toute la colonne lombaire, 6 degrés goniométriques. Il est par contre de tous le plus bridé en inclinaison latérale, seulement

4 degrés goniométriques. La mobilité du segment L5-S 1 est également mise en évidence car la différence qui existe lorsqu'on recherche l'indice de Schober à partir de la vertèbre L5, ou bien à partir de la vertèbre S1 . ( voir tableau 5)

Le test de Schober, en médecine, permet de mesurer la flexion de la portion de la colonne vertébrale située au niveau des vertèbres lombaires1.

### Teste de schober

Pour ce faire, on pratique deux marques, respectivement à la vertèbre L5 (environ au niveau de l'épine iliaque postéro-supérieure) et 10 cm au-dessus de cette dernière, chez un patient en station debout. Le patient est ensuite prié de se pencher en avant autant que possible et on mesure ensuite l'augmentation d'écart entre les deux marques pratiquées précédemment. Un écart de moins de 3 cm est considéré comme pathologique, la normale attendue est de +5cm.



**Figure 30.** - Pourcentage des flexions et extensions attribuables aux différents étages du rachis lombaire. A noter que la plus grande partie de la liberté articulaire réside dans les deux étages inférieurs. Ceci renforce l'idée qu'il est indispensable de mesurer l'indice de Schober à partir d'une pièce fixe, le premier segment sacré.

### 3.5- Mouvement du complexe lombo-pelvien

Il est difficile, voire impossible, d'étudier la mécanique lombaire sans se préoccuper des mouvements de l'articulation coxo-fémorale, car il existe une «harmonie lombo-pelvienne» dont nous donnerons 3 exemples :

a) flexion antérieure du tronc: on est aisément effrayé par les calculs d'écrasement des disques intervertébraux basés sur l'idée d'une «grue vertébrale» : on s'imagine qu'il est possible de se pencher en avant en gardant les membres inférieurs à la verticale. Ceci est strictement impossible. Le recul automatique du bassin lorsqu'un sujet se penche en avant assure que la projection verticale du centre de

| Site de la mesure | X     | s    |
|-------------------|-------|------|
| A partir de L5    | 14,02 | 0,72 |
| A partir de S1    | 15,36 | 0,86 |

Tableau5. - Indice de Schober mesuré sur une population de rameurs N = 25

Ces mesures montrent que l'indice de Schober mesuré à partir de la vertèbre L5 ne permet pas de déceler la très grande mobilité de la charnière lombo-sacrée.

Bien entendu la sollicitation de flexion antérieure du tronc chez les rameurs risque d'accroître cette mobilité de la charnière lombo-sacrée.

Il semble pourtant nécessaire de s'assurer que l'on prend comme base d'un indice de Schober le plateau supérieur de la vertèbre S1, sinon une part importante de la mobilité rachidienne lombaire reste inexplorée.

gravité reste placée entre les deux pieds, le corps entier dans une position d'équilibre beaucoup plus favorable que les dessins abusifs bien connus (voir tableau 6) ;

|                                   | x     | s    |
|-----------------------------------|-------|------|
| Départ postérieur du bassin en cm | 13,60 | 4,66 |

Tableau 6. - Déplacements postérieurs du bassin en cm N = 40

b) la rétroversion active ou « verrouillage lombaire » est un exercice qui fait appel à une connaissance du carrefour lombo-pelvien, or la récente étude montre qu'il existe des sujets normaux incapables d'exécuter un mouvement de rétroversion du bassin (17 sujets sur 58). Certains ne présentent aucune mobilité segmentaire L5-S 1 au cours de rétroversion du bassin (6 sujets). Certains sujets normaux démontrent une accentuation de lordose à l'étage L5-S 1 lors de la rétroversion (17 sujets). L'exercice très courant qui consiste à tenter d'aplatir la lordose est donc plus difficile qu'on ne le pourrait imaginer de prime abord.

Notez également que, même dans une position de flexion maximale, le segment L5-S 1 reste en extension relative : les deux vertèbres ne se placent jamais dans une position de « flexion », elles diminuent l'extension;

c) la combinaison des deux facteurs précédents présente un danger pour le patient porteur d'une anomalie transitionnelle basse (spondylolisthesis) qui tente d'exécuter une rétroversion du bassin : il est forcé de produire au départ de l'activité un recul du bassin automatique, ce qui recule la position du centre de gravité par rapport au soutien fourni par l'articulation de hanche. La modification du « couple-charnière » lombo-pelvien se fait au détriment de la stabilité de l'articulation L5-S1, avec accroissement des contraintes à cet étage ;

d) en position assise, il est remarquable de constater que, lorsqu'un sujet normal est assis sur un siège habituel il n'y a en fait que 30 degrés lombaires, qui se placent automatiquement en délordose lorsque nous sommes assis.

Des mesures prises sur des repères osseux ont permis de vérifier cette affirmation (tableau 7).

|            | X     | s     |
|------------|-------|-------|
| Assis 75°  | 46    | 9,58  |
| Assis 90°  | 64,12 | 10,18 |
| Assis 105° | 75,45 | 8,40  |

Tableau 7. - Mesure de l'amplitude en flexion de la hanche N = 20

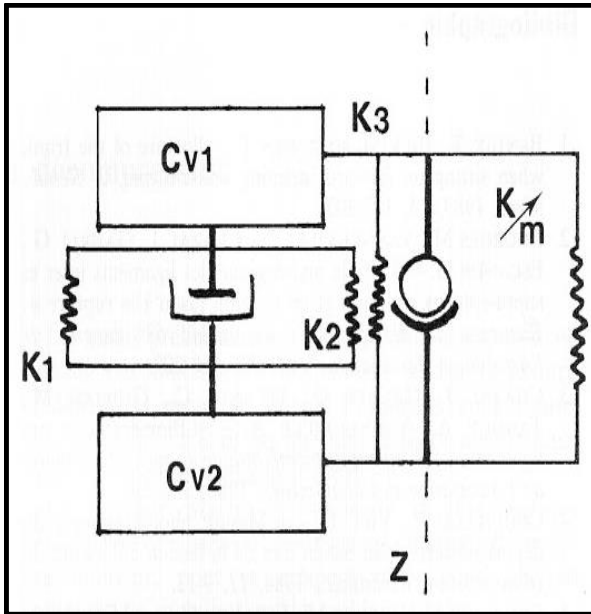
Ces mesures font apparaître le besoin d'une correction de supplément par bascule du bassin et donc effacement de la lordose (tableau 8).

|            | X     | s     |
|------------|-------|-------|
| Assis 75°  | 21,45 | 10,45 |
| Assis 90°  | 17,27 | 10,22 |
| Assis 105° | 21,57 | 8,28  |

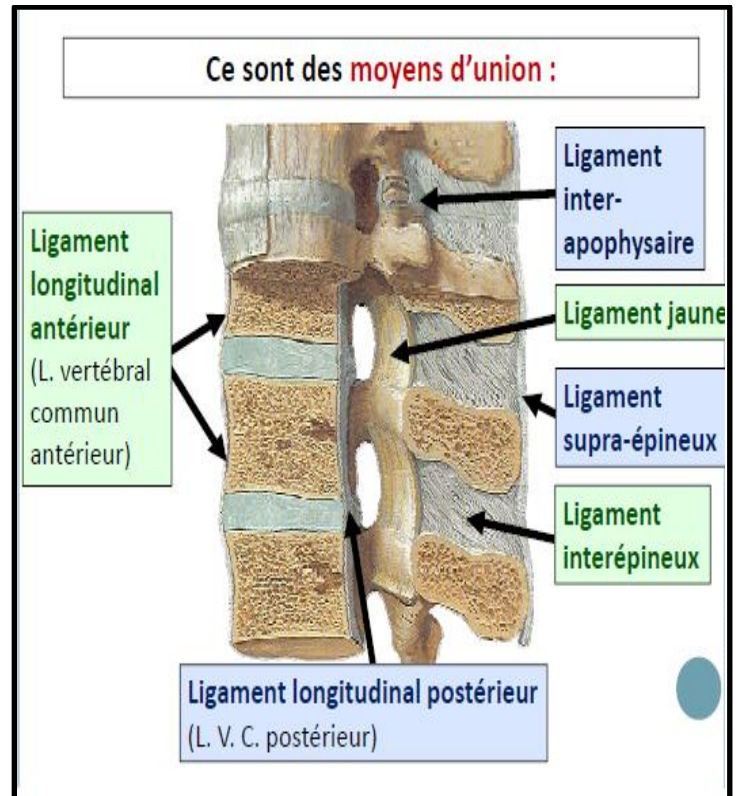
Tableau8. - Mesure de la bascule du

bassin N = 20

### 3.6-Modèle mécanique du comportement viscoélastique de la colonne vertébrale



**Figure 31.** - Modèle mécanique du comportement viscoélastique de la colonne vertébrale



**Figure 32 ;** liaison ligamentaire dans la colonne vertebrale

Dans la figure 31 nous présentons le modèle mécanique du comportement viscoélastique de l'unité fonctionnelle de base (voir Figure 21 et 32 ) de la colonne vertébrale:

En K1 et K2, modélisation de la raideur à la traction manifestée par les fibres de l'anulus; En K3, rappel élastique du ligamentum-flavum; en  $K/m$ , rappel en traction élastique de la masse des ligaments inter épineux et sur épineux entre les deux corps vertébraux (Cv1 et Cv2), le nucléus-pulposus fonctionne comme un piston hydraulique amortisseur qui dissipe l'énergie; en Z, la ligne des contacts des zygapophysys représente un contact quasi-indéformable.

A noter que les portions élastiques représentées «K» sont modélisées en ressorts à traction qui se laissent allonger et restituent l'énergie emmagasinée en tirant vers leur longueur de repos. La mise en tension constante de ces éléments de traction élastique fait varier la tension de surface et s'apparente donc à la pathologie de la position extrême.

Les nécessités de la modélisation nous font assimiler les ligaments communs vertébraux antérieurs et postérieurs aux tractions K1 et K2 de l'anulus fibrosius « K » symbolise un ressort idéal, dont les caractéristiques sont la rigidité et la compliance.

## 4- Etude de la réponse du disque intervertébral L4-L5 aux différentes sollicitations

### 4.1- Introduction

La compréhension du comportement mécanique de la colonne vertébrale reste, à l'heure actuelle, un sujet d'étude largement investi que ce soit dans son fonctionnement normal ou pathologique. Cependant les investigations pratiquées in vivo posent toujours des problèmes éthiques et elles restent très difficiles à réaliser. Ainsi, l'analyse paramétrique par la méthode des éléments finis s'est révélée être un outil particulièrement intéressant pour la recherche sur le comportement biomécanique du disque intervertébral.

C'est dans les années 1970 que les premiers modèles sont apparus avec la réalisation de modèles en deux dimensions puis en trois dimensions, incluant lors de l'étude soit un niveau segmentaire, soit plusieurs niveaux, investiguent une simple couche de l'anneau fibreux suivant différentes régions lors d'une sollicitation circonférentielle, et rapportent des variations du module d'élasticité suivant les quatre secteurs (antéro-interne, antéro externe, postéro-interne, postéro-externe), afin d'évaluer les effets de la dégénérescence et du vieillissement sur les propriétés du disque.

Dans l'hypothèse d'une analyse paramétrique, le modèle "idéal" devrait inclure tous les facteurs suivants pour simuler le plus fidèlement possible le comportement biomécanique du disque intervertébral :

1. Les données géométrique (diamètres, surface, volume, épaisseur, aspect cunéiforme)
2. Les volumes relatifs du noyau pulpeux et de l'anneau fibreux (rapport de la surface du noyau / la surface du disque)
3. Les variations des propriétés matérielles du noyau pulpeux et de l'anneau fibreux (suivant l'âge, le degré de dégénérescence et la localisation au sein du disque)

### 4. 2- Méthode

#### 4.2.1- Description du modèle

Les caractéristiques géométriques du modèle s'appuient sur l'étude concernant le diamètre antéro-postérieur avec 34 mm, et 45 mm latéralement (tableau 9).

La hauteur moyenne de notre disque fut établit à 12 mm (7.76 mm postérieurement contre 16.64 mm antérieurement compte tenu de l'aspect cunéiforme du disque intervertébral)

Notre étude a également tenu compte de l'inclinaison des plateaux vertébraux donnant un aspect cunéiforme au disque intervertébral (figure 1). Ainsi, nous avons choisi un angle de divergence vers l'avant de 14°.

D'un point de vue géométrique le noyau (secteur central) a été modélisé sous une forme ovalaire et il fut déplacé de 3.8 mm postérieurement. La surface totale de notre modèle s'élevait à 1256 mm<sup>2</sup>, et celle du noyau pulpeux à 353 mm<sup>2</sup>, ce qui a porté le rapport entre la surface du disque et la surface du noyau pulpeux à 28 %.

| Paramètres                          | Dimensions           |
|-------------------------------------|----------------------|
| Diamètre antéro-postérieur          | 34 mm                |
| Diamètre latéral                    | 45 mm                |
| Epaisseur                           | 12 mm                |
| Inclinaison des plateaux vertébraux | 14°                  |
| Surface du disque                   | 1256 mm <sup>2</sup> |
| Surface du noyau                    | 353 mm <sup>2</sup>  |

**Tableau 9 :** Caractéristiques géométriques de la modélisation du disque intervertébral L4 – L5. Selon les études de [Botford and al.,1994] et [Zengwu Shao and al.,2002], [Kimura and al.,2001] et [Shirazi-Adl and al.,1990]

#### 4.2.2- Dessin du model

Le model du disque lombaire L4/L5 (voir figure 33) a été dessiné en utilisant les données du tableau 9 ci-dessus avec Edition du plan de ce disque (voir figure 34) ;

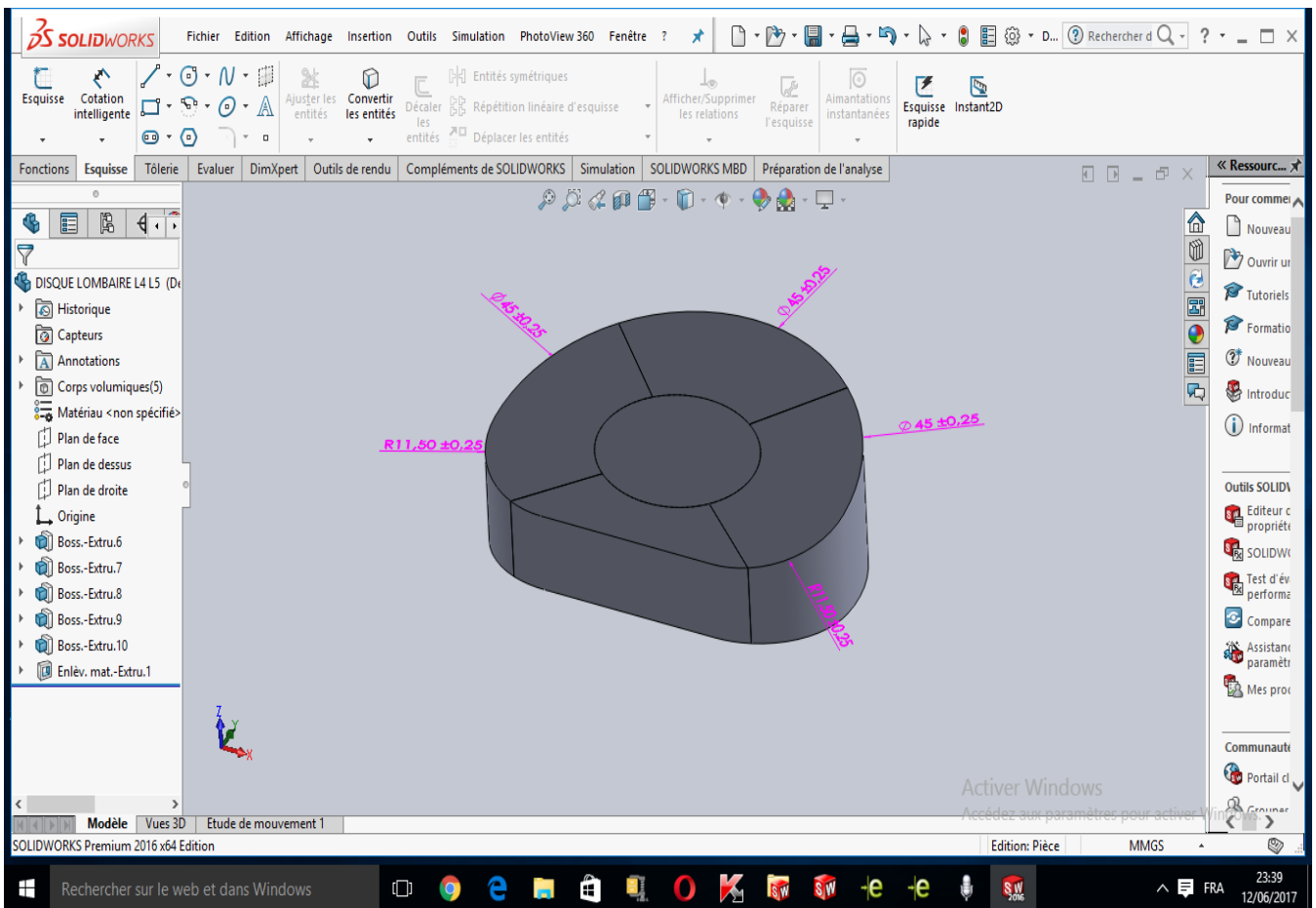
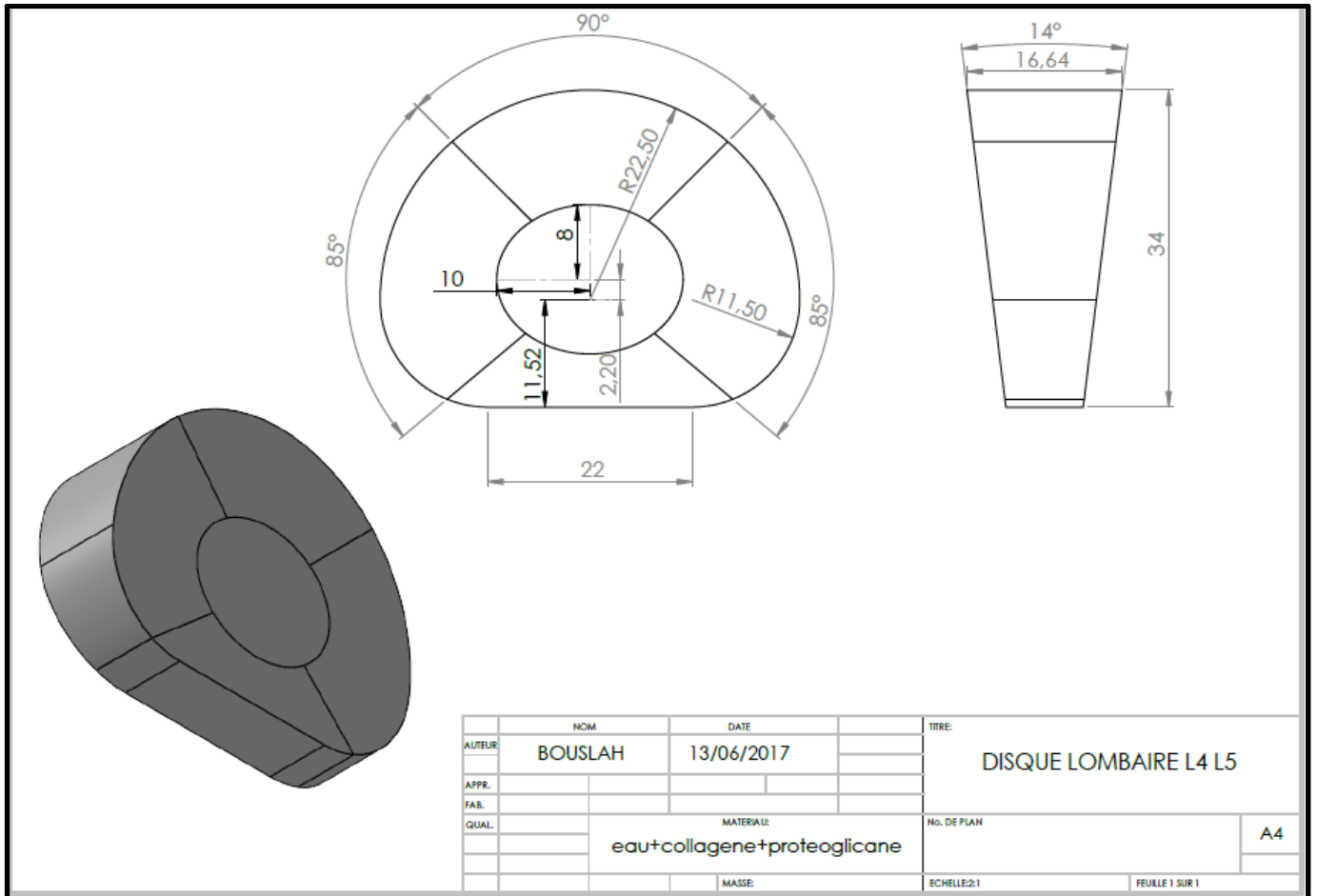


Figure 33 ; capture écran du dessin du disque lombaire L4/L5 sur SolidWorks 2016

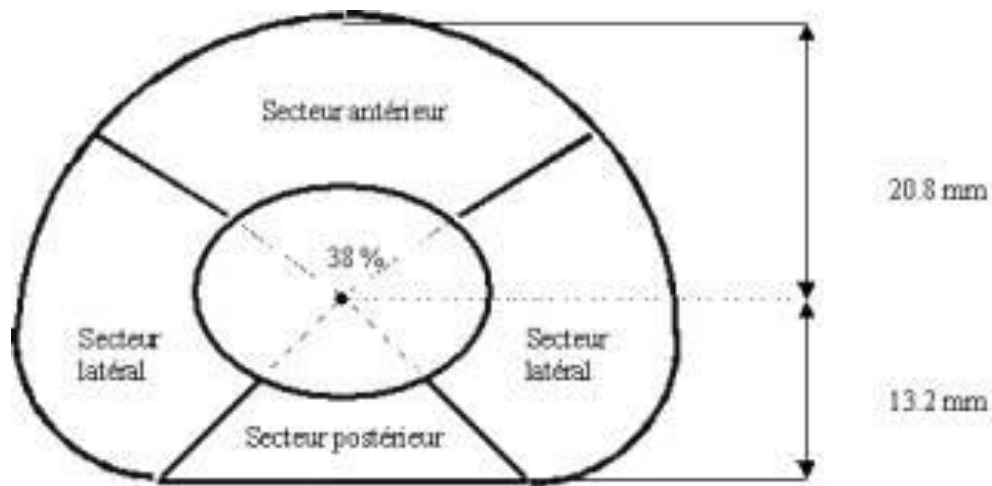


**Figure 34** : plans du disque intervertébral L4 – L5.

Compte tenu de la variation des propriétés matérielles au sein du disque intervertébral, nous avons retenu la fraction du disque en cinq secteurs différents, en prenant comme origine le centre du noyau. Les cinq secteurs du disque ont été déterminés comme suit :

- Une partie antérieure formant un angle de  $100^\circ$
- Deux parties latérales droite et gauche formant un angle de  $85^\circ$  chacune
- Une partie postérieure formant un angle de  $90^\circ$
- Un secteur central (noyau)

La (figure 35) ci-dessous nous montre une représentation schématique des différentes parties du modèle,.



**Figure 35** : Représentation schématique des cinq secteurs composant le modèle.

#### 4.2.3- Propriétés matérielles

Les propriétés matérielles du disque ont fait l'objet d'une importante recherche bibliographique afin de se rapprocher au maximum de la réalité.

Les conclusions de ces études ont orienté notre choix dans l'établissement des valeurs du module d'élasticité avec 30 MPa pour le secteur antérieur, 22 MPa pour les deux secteurs latéraux, et 17 MPa pour le secteur postérieur.

D'autre part la dégénérescence du disque intervertébral a été simulée par une réduction uniforme du module d'élasticité jusqu'à - 30 % par rapport aux valeurs normales énoncées précédemment, et cela dans les cinq secteurs de notre modèle sur base d'une moyenne

Le comportement mécanique du disque est étudié en considérant le noyau pulpeux comme une structure incompressible. Comme fut le cas de la plupart des études qui ont modélisé le noyau pulpeux comme un fluide incompressible et non visqueux. D'après une moyenne établie au travers de plusieurs études nous avons opté pour un module d'élasticité de 1 MPa pour un noyau poroélastique. Celles-ci sont résumées dans (le tableau 10) ci dessous:

| Eléments                          | Module d'élasticité (MPa) | Coefficient de Poisson |
|-----------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Secteur antérieur                 | 30                        | 0.45                   |
| Secteurs latéraux droit et gauche | 22                        | 0.45                   |
| Secteur postérieur                | 17                        | 0.45                   |
| Secteur central (incompressible)  | 1666                      | 0.45                   |

**Tableau 10** : Propriétés matérielles des 5 éléments composant le disque intervertébral.

#### 4.2.4 - Protocole :



La face inférieure du modèle a été fixée, les différentes charges ont été appliquées à la face supérieure de chaque élément du modèle. Pour la première partie de notre étude, nous avons choisi d'appliquer au modèle une pré-charge de 400 N représentant le poids du corps en amont du disque intervertébral L4 – L5

Dans un second temps, plusieurs niveaux de dégénérescence du disque ont été simulés afin d'établir une comparaison par rapport à un modèle sain. Ces différents niveaux de dégénérescence ont été simulés grâce à la diminution du module d'élasticité pour la simple raison que plus la dégénérescence du disque intervertébral était importante et plus le module d'élasticité était faible.

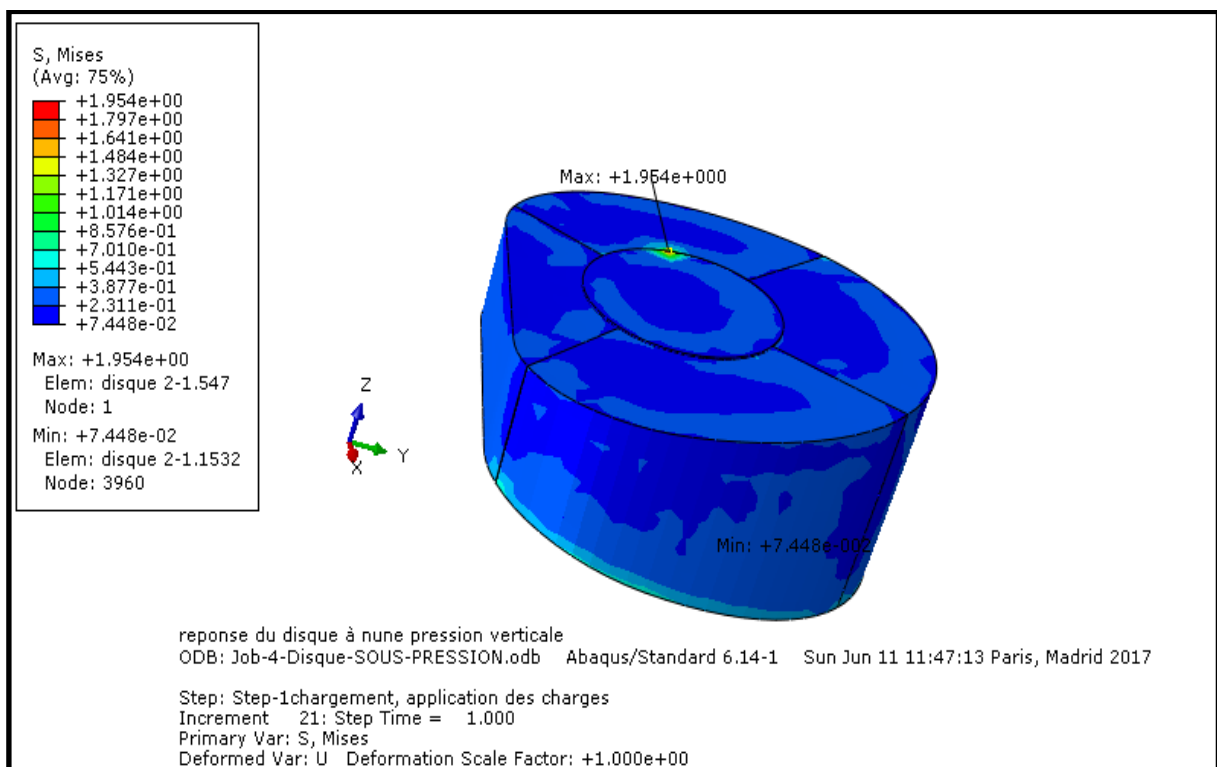
les conditions de charge étudiées sont les suivantes :

- Une pré-charge de 400 N seule ;
- Une pré-charge de 400 N couplée à un moment de force en flexion de 10 Nm ;
- Une pré-charge de 400 N couplée à un couple de torsion de 10 Nm ;
- Une pré-charge de 400 N couplée à un moment de force en flexion de 10 Nm et à un couple de force en torsion de 10 Nm.

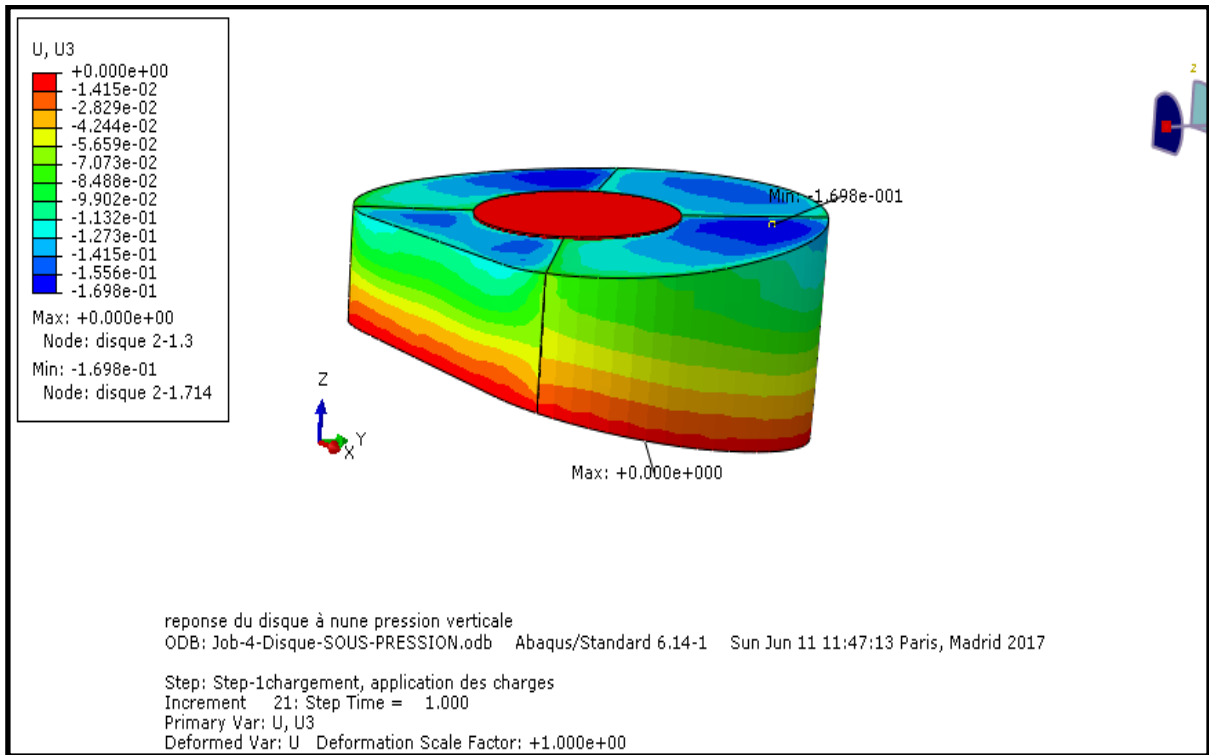
### 4.3. Calcul numérique et Résultats

#### 4.3.1 Calcul numérique

Le calcul numérique a été réalisé sur le logiciel Abaqus en important les données du modèle qui a été dessiné sur SolidWorks, voir ci-dessous les deux captures écrans du modèle donnant respectivement les contraintes limites (voir figure 36) et les déformations voir (figure 37)



**Figure 36** : les contraintes limites



**Figure 37:** les déformations

#### 4.3.2- Résultats déformations et contraintes

Nous avons pu observer que les contraintes et les déformations maximales se produisaient toutes dans la partie supérieure du disque intervertébral, au niveau de l'interface disque – plateau cartilagineux supérieur.

Le tableau (11) ci-dessous nous donne les déformations obtenues entre les deux modèles de disque L4-L5 (sain et dégénéré).

Nous pouvons retenir que pour un modèle de disque intervertébral sain au noyau incompressible, c'est l'anneau qui subit la majeure partie de la déformation pour les quatre conditions de charge de l'étude.

Nous pouvons expliquer ce résultat non seulement par la nature incompressible du noyau et celle élastique de l'anneau, mais également par le fait que dans notre étude le disque intervertébral ne soit pas encadré par des corps vertébraux et des plateaux cartilagineux.

Nous pensons que ces structures jouent un rôle très important dans la répartition des contraintes sur l'ensemble du disque intervertébral.

| Conditions de charge |        | Pré-charge<br>400 N       | Pré-charge<br>400 N +<br>Torsion 10<br>Nm | Pré-charge<br>400 N +<br>Flexion 10<br>Nm | Pré-charge<br>400 N +<br>Torsion 10<br>Nm + Flexion<br>10 Nm |        |
|----------------------|--------|---------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| Type de noyau        |        | NI                        | NI                                        | NI                                        | NI                                                           |        |
| Déformations (mm)    | Noyau  | 0                         | 0                                         | 0                                         | 0                                                            |        |
|                      | Anneau | Postéro-externe           | 0.1556                                    | 0.8976                                    | 1.1642                                                       | 1.2414 |
|                      |        | Antéro-externe            | 0.0488                                    | 0.6928                                    | 1.0778                                                       | 1.155  |
|                      |        | Postéro latéraux externes | 0.1698                                    | 0.8138                                    | 0.3108                                                       | 1.032  |
|                      |        | Postérieur gauche         | 0.1415                                    | 0.7855                                    | 0.2825                                                       | 1.0045 |
|                      |        | Antéro-externe gauche     | 0.1273                                    | 0.7713                                    | 0.2683                                                       | 1.3386 |
|                      |        | Antéro-externe droit      | 0.1415                                    | 0.7855                                    | 0.2825                                                       | 1.3528 |

**Tableau 11 :** Tableau comparatif des déformations tridimensionnelles suivant x, y, z (en mm) obtenues pour un modèle de disque intervertébral sain avec noyau incompressible pour NI = Noyau incompressible.

le modèle du disque intervertébral au noyau incompressible n'est quasiment pas déformé compte tenu de son module d'élasticité très élevé. Les déformations maximales observées pour le modèle du disque intervertébral au noyau incompressible s'étendent de **0.0488 mm à 1.3528 mm** pour les quatre conditions de charge étudiées,

#### 4.3.3. Les contraintes

| Conditions de charge | Pré-charge<br>400 N | Pré-charge 400<br>N + Torsion | Pré-charge 400 N +<br>Flexion 10 Nm | Pré-charge 400<br>N + Torsion 10 |
|----------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
|----------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|

|               |        |                                              | 10 Nm                                                                    |                                           | Nm + Flexion<br>10 Nm               |         |
|---------------|--------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| Type de noyau |        | NI                                           | NI                                                                       | NI                                        | NI                                  |         |
| Contraintes   | Noyau  | 0.07448<br>pour<br>Secteur<br>centrale       | 4.7911<br>pour les<br>zones<br>antéro-<br>externe<br>droite et<br>gauche | 5.2711<br>pour la zone antéro-<br>externe | 8.0011 pour<br>secteur<br>antérieur |         |
|               | Anneau | Postéro-<br>interne                          | 0.2311                                                                   | 0.6511                                    | 1.1311                              | 1.3511  |
|               |        | Postéro-<br>latérales<br>droite et<br>gauche | 0.2311                                                                   | 0.6511                                    | 1.1311                              | 1.3511  |
|               |        | Postéro-<br>interne<br>droite                | 0.2311                                                                   | 0.6511                                    | 1.1311                              | 1.3511  |
|               |        | Antéro-<br>externes<br>droite et<br>gauche   | 0.2311                                                                   | 0.6511                                    | 2.64448                             | 2.8711  |
|               |        | Postéro-<br>externes<br>droite et<br>gauche  | 0.07448                                                                  | 0.49448                                   | 1.36448                             | 1.5911  |
|               |        | Antéro-<br>externe                           | 0.2311                                                                   | 0.6511                                    | 1.5211                              | 1.74772 |
|               |        | Antéro-<br>interne et<br>moyen               | 0.07448                                                                  | 0.49448                                   | 1.5211                              | 1.74772 |

**Tableau 12** : Tableau comparatif des contraintes (en MPa) obtenu pour un modèle de disque intervertébral sain avec noyau incompressible (NI = Noyau incompressible).

Tenon compte des résultats obtenu pour modèle de disque intervertébral au noyau incompressible, c'est le noyau qui supporte la majeure partie de la charge. En effet, les contraintes maximales observées sont de 0.07448, 4.7911, 5.2711, et 8.0011 MPa respectivement pour une pré-charge seule, une pré-charge + torsion, une pré-charge + flexion, une pré-charge + torsion + flexion respectivement.

. Cette simulation d'un modèle de disque intervertébral au noyau incompressible nous a permis d'établir un parallèle avec le phénomène de dégénérescence naturel des tissus.

Ainsi, avec l'âge, il apparaît une variation à la baisse du contenu en eau du disque intervertébral (90 % à la naissance, 80 % à 20 ans, et un peu plus de 70 % passé l'âge de 60 ans) . Aussi nous pensons que les contraintes et les déformations seront d'autant plus importantes dans l'anneau fibreux à mesure que le noyau perd de son eau.

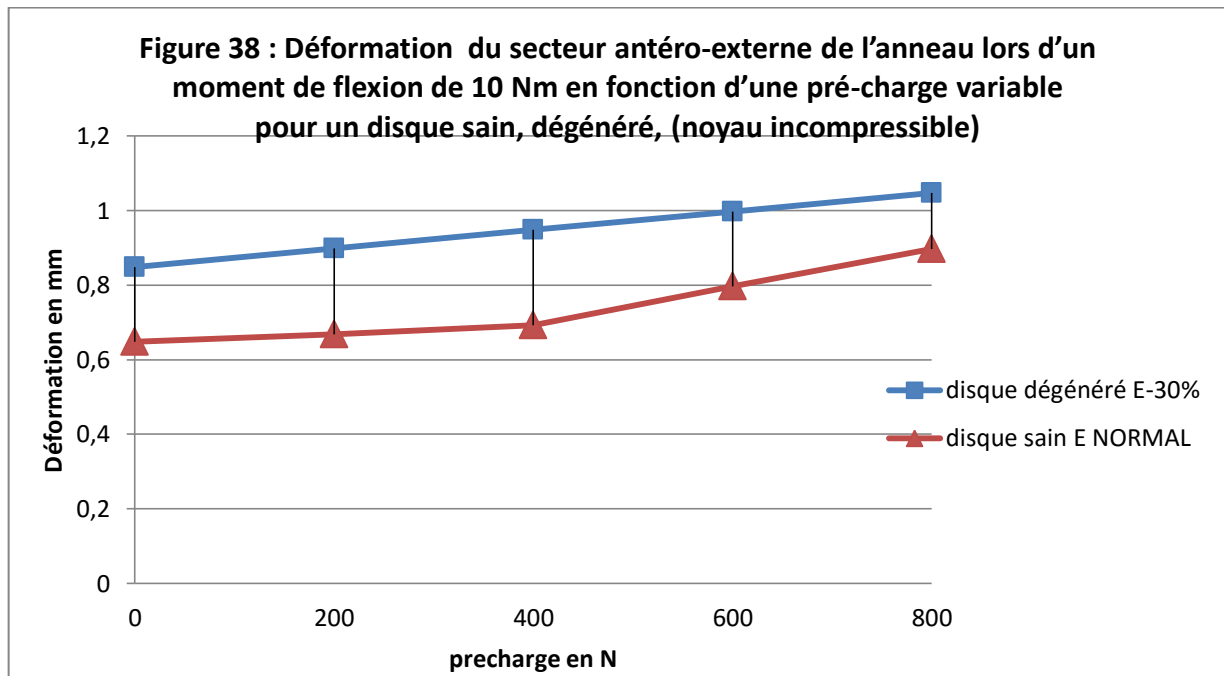
#### 4.3.4- Etude de la flexion

Nos résultats montrent que, pour un moment de flexion de 10 Nm, la déformation est la plus importante pour un disque dégénéré s'échelonnant de 0.848 à 1.048 mm, de 0.648 à 0.897 mm pour le disque sain, et, pour une pré-charge de 0 et 800 N respectivement

Nous avons également constaté une évolution exponentielle de la déformation de la zone antéro-externe de l'anneau fibreux en fonction du module d'élasticité pour une pré-charge de 400 N et pour une pré-charge de 800 N. De plus, nous avons montré que pour une pré-charge est de 800 N (excès pondéral), la déformation du secteur antéro-externe de l'anneau fibreux augmente plus rapidement que pour une pré-charge de 400 N (figure 5).

Pour un moment de flexion de 10 Nm, la déformation du secteur postérieur de l'anneau est exponentielle pour un disque sain. Cette déformation est la plus importante pour un disque dégénéré s'échelonnant de 0.66 à 0.88 mm, de 0.6 à 0.8 mm pour le disque sain, pour une pré-charge s'échelonnant de 0 N et 800 N respectivement. De plus cette déformation augmente plus rapidement pour le disque dégénéré que pour le disque sain (figure 6).

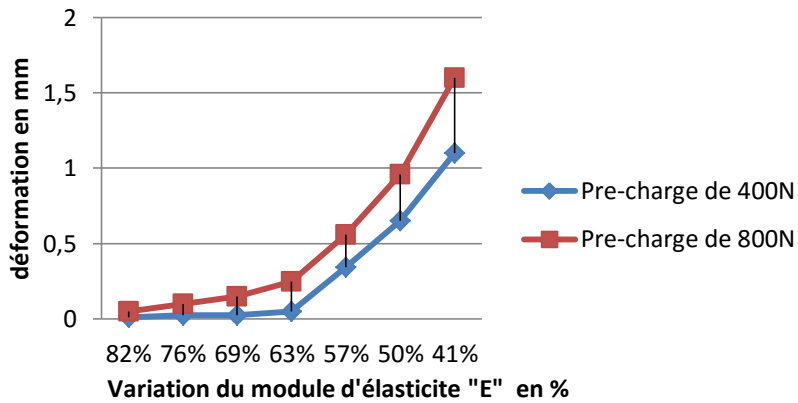
Par ailleurs nous avons constaté une évolution exponentielle de la déformation du secteur postérieur en fonction du module d'élasticité pour une pré-charge de 400 N et pour une pré-charge de 800 N. Ainsi pour une pré-charge de 800 N (excès pondéral), la déformation du secteur postérieur augmente plus rapidement que pour une pré-charge de 400 N (poids normal) (figure 7).



| Disque sain | P (N) | U(mm)   |
|-------------|-------|---------|
| 1           | 0     | 0,64792 |
| 2           | 200   | 0,6684  |
| 3           | 400   | 0,6928  |
| 4           | 600   | 0,79672 |
| 5           | 800   | 0,89672 |

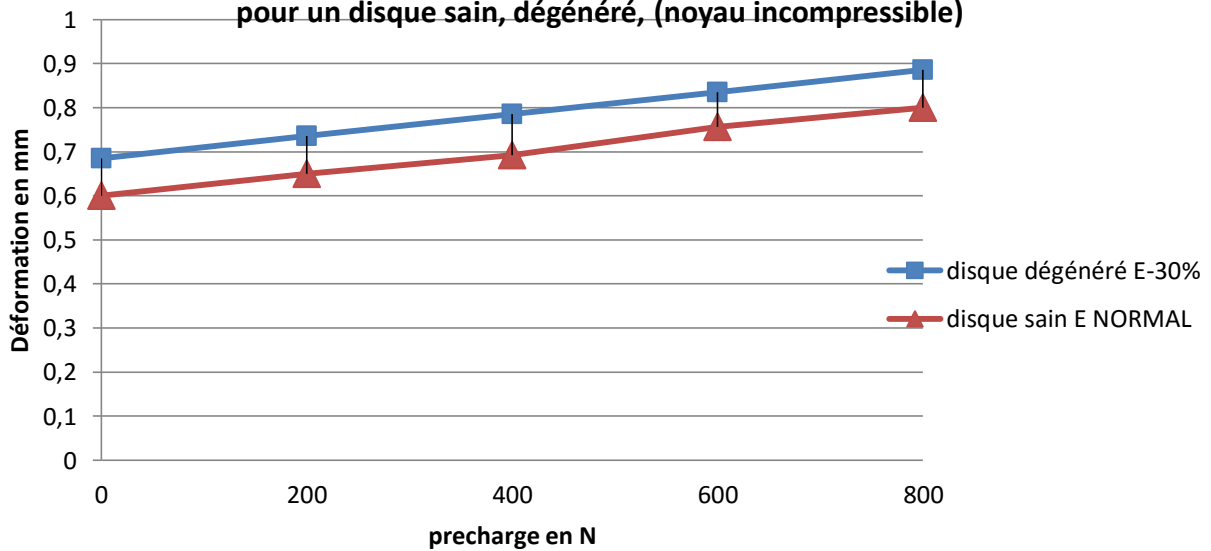
| disque dégénéré | P(N) | U(mm)   |
|-----------------|------|---------|
| 1               | 0    | 0,84792 |
| 2               | 200  | 0,89792 |
| 3               | 400  | 0,94792 |
| 4               | 600  | 0,99792 |
| 5               | 800  | 1,04792 |

Figure39: Evolution de la déformation tridimensionnelle (suivant x, y, z) du secteur antéro-externe lors d'une flexion de 10 Nm en fonction du module d'élasticité pour une pré-charge de 400 N (poids normal) et de 800 N (excès de pondéral)



|      |        |        |
|------|--------|--------|
| 1    | 0,819  | 0,0122 |
| 2    | 0,756  | 0,0233 |
| 3    | 0,693  | 0,0244 |
| 4    | 0,63   | 0,0488 |
| 5    | 0,567  | 0,345  |
| 6    | 0,504  | 0,65   |
| 7    | 0,411  | 1,1    |
| 800N | E en % | U(mm)  |
| 1    | 0,819  | 0,05   |
| 2    | 0,756  | 0,1    |
| 3    | 0,693  | 0,15   |
| 4    | 0,63   | 0,2488 |
| 5    | 0,567  | 0,56   |
| 6    | 0,504  | 0,96   |
| 7    | 0,411  | 1,5988 |

Figure40: Déformation du secteur posterieur externe de l'anneau lors d'un moment de flexion de 10 Nm en fonction d'une pré-charge variable pour un disque sain, dégénéré, (noyau incompressible)

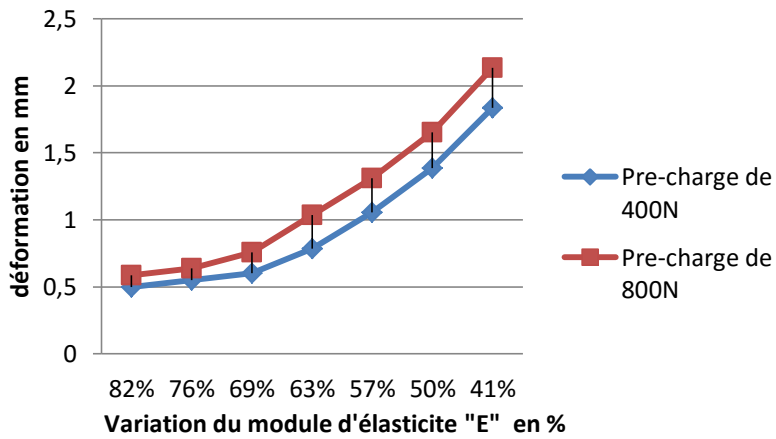


| Disque sain | P (N) | U(mm)   |
|-------------|-------|---------|
| 1           | 0     | 0,6     |
| 2           | 200   | 0,65    |
| 3           | 400   | 0,6928  |
| 4           | 600   | 0,75672 |
| 5           | 800   | 0,8     |

| disque dégénéré | P(N) | U(mm)  |
|-----------------|------|--------|
| 1               | 0    | 0,6855 |
| 2               | 200  | 0,7355 |
| 3               | 400  | 0,7855 |
| 4               | 600  | 0,8355 |
| 5               | 800  | 0,8855 |

| Disque sain | P (N) | U(mm)   |
|-------------|-------|---------|
| 1           | 0     | 0,64792 |
| 2           | 200   | 0,6684  |

**Figure 41 :** Evolution de la déformation du secteur postérieur de l'anneau lors d'une flexion de 10 Nm en fonction du module d'élasticité pour une pré-charge de 400 N (poids normal) et de 800 N (excès de pondéral)



|   |     |         |
|---|-----|---------|
| 3 | 400 | 0,6928  |
| 4 | 600 | 0,79672 |
| 5 | 800 | 0,89672 |

| disque dégénéré | P(N) | U(mm)   |
|-----------------|------|---------|
| 1               | 0    | 0,84792 |
| 2               | 200  | 0,89792 |
| 3               | 400  | 0,94792 |
| 4               | 600  | 0,99792 |
| 5               | 800  | 1,04792 |

#### 4.4. Perspectives et améliorations

Nous pensons que les recherches menées sur le disque intervertébral lombaire dans de multiples domaines relatifs à son anatomie et ses propriétés matérielles, nous ont permis de réaliser ce modèle. Néanmoins, nous regrettons le fait de ne pas avoir incorporé les corps vertébraux adjacents au disque intervertébral et les plateaux cartilagineux qui nous ont semblé par la suite revêtir un caractère très important dans la répartition des charges au travers du système.

A l'avenir il nous paraît intéressant de poursuivre cette subdivision du disque intervertébral, voire même d'y ajouter deux secteurs postéro-latéraux droit et gauche supplémentaires, et pourquoi pas des subdivisions radiales en plusieurs couches avec des propriétés matérielles différentes circonférentiellement et radialement. La littérature reste malgré tout assez peu fournie et controversée concernant la valeur des propriétés matérielles (coefficient de Poisson et module de Young) du noyau pulpeux et des différentes parties de l'anneau fibreux, que ce soit pour un disque sain ou un disque dégénéré.

#### 5. Conclusion :

Dans cette étude sur le disque intervertébral L4-L5 a permis de mettre en évidence le fait que les contraintes et les déformations maximales se produisaient toutes dans la partie supérieure du disque intervertébral, au niveau de l'interface disque-corps vertébral supérieur.

Pour un modèle au noyau incompressible, les résultats ne semblent pas concluants compte tenu de l'absence des corps vertébraux adjacents au disque intervertébral.

Nous retiendrons malgré tout que les déformations maximales occasionnées dans le noyau pulpeux s'étendaient de 0.0488 mm à 1.3528 mm pour les quatre conditions de charge, tandis que les contraintes maximales sur le contour variaient de 0.07448 à 8.0011MPa pour le modèle au noyau incompressible où les résultats montrent que c'était le secteur central qui supportait l'entièreté de la charge.

Nous pensons que les recherches et les conclusions apportées peuvent constituer un support dans la compréhension de la biomécanique du disque intervertébral mais également dans le perfectionnement des prothèses discales. De plus, nous avons démontré que l'excès pondéral et la dégénérescence du disque conduisaient à l'augmentation des contraintes dans les cinq secteurs antérieur et postérieur de l'anneau fibreux lors d'un moment de flexion. Ainsi, ces résultats suggèrent l'hypothèse selon laquelle l'excès pondéral et la dégénérescence discale seraient deux facteurs nuisibles à l'intégrité du disque intervertébral pouvant conduire à l'émergence de pathologies lombaires.

Finalement le disque lombaire comme organe complexe doué d'une mécanique parfois déroutante, doit concilier des exigences de stabilité, mobilité et transmission des forces. Cet aperçu de la complexité du fonctionnement ne fait que présager des contraintes et cisaillements qui se manifestent aux deux extrémités, dans les zones-charnières qui le délimitent. Il semble aujourd'hui évident que, d'un point strictement mécanique, les articulations postérieures ont toutes les raisons d'être à l'origine de nombreuses lombalgies.

La colonne vertébrale humaine, peu propulsive, nécessairement très stable et chargée d'amortir ou de dissiper chocs et contraintes, doit être conçue comme une unité complexe ostéo-ligamentaire dont les propriétés viscoélastiques (fig. 31) ne doivent jamais être négligées lors de l'analyse d'une condition algique,



## Bibliographie

### Livre et thèses

- **Anatomie humaine** : tome 2 descriptive, topographique et fonctionnelle,  
Auteur Henri Rouviere et André Delmas, 15<sup>e</sup> Edition Masson 2002
- **Initiation à la rhéologie** : 3<sup>e</sup> Édition 2001 auteur : Guy Couarraze jeans-Louis Grossiord
- **Étude biomécanique de la dégénérescence du disque intervertébral à l'aide d'un modèle éléments finis poroélastique**  
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées  
Amélie Chagnon Université de Montréal, décembre 2009.
- **Etude paramétrique du disque intervertébral 14-15 a cinq secteurs par la méthode des éléments finis en flexion-torsion**  
SALEM W.1,2, KLEIN P.1, BONNET C.1  
1. Université Libre de Bruxelles - Unité de Recherche en Thérapies Manuelles, ISEPK. - Avenue F. Roosevelt 50, CP:168, 1050 Bruxelles, Belgique,  
  
2. Haute Ecole Paul Henri Spaak - Département de Kinésithérapie (ISEK) - Avenue Ch. Schaller 91, 1160 Bruxelles
- **Biomécanique de la colonne lombaire** Ann. Kinésithér., 1989, t. 16, nO 1-2, pp. 59-68  
© Masson, Paris, 1989  
MISE AU POINT Éric VIEL  
Docteur ès sciences, chargé de cours, DEA de génie biomédical, ENSAM, Directeur, École de Cadres « Bois Larris », F 60260 Lamorlaye.

### Logiciel :

- Logiciel de DAO et CAO **SolidWorks 2016**
- Logiciel de modélisations numérique **Abaqus 6.14**

### Site internet

- **Cours sur le rachis**  
<http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/anatomie2an-rachis.pdf>

