

Chapitre I

Les os

1. FONCTIONS ET ANATOMIE DES OS

1.1. Fonctions

Le tissu osseux est l'un des tissus les plus résistants de l'organisme. C'est également un tissu dynamique, constamment remodelé, capable d'adapter sa densité aux taux de sollicitation pour minimiser les contraintes au niveau des zones les plus sollicitées. En plus de cette fonction mécanique de soutien du corps et de protection des organes, le squelette a deux autres principales fonctions.

* Une fonction de contrôle du métabolisme phosphocalcique : sous l'effet des pressions mécaniques le remodelage constant du tissu osseux entraîne la libération ou le stockage de sels minéraux : il assure ainsi (conjointement avec l'intestin et les reins) le contrôle du métabolisme phosphocalcique.

* Une fonction hématopoïétique : les os renferment dans leurs espaces médullaires la moelle hématopoïétique. Au niveau de cette moelle sont créées les différentes cellules du sang.

- Les globules rouges ou hématies sont chargés de transporter l'oxygène depuis les poumons jusqu'aux cellules de tout le corps et permettre ainsi leur fonctionnement.
- Les globules blancs ou leucocytes sont de différents types (polynucléaires, lymphocytes, plasmocytes...) et sont chargés de la défense du corps contre les infections.
- Les plaquettes sont de petits éléments qui ont pour rôle essentiel d'initier la coagulation du sang en cas de plaie.

1.2. Variétés anatomiques

Plusieurs variétés anatomiques d'os sont distinguées [1.1]. Chaque os présente une forme particulière qui répond à un besoin précis.

- Les os longs. Cette dénomination reflète leur morphologie et non leur taille. Ils comprennent un corps central et deux extrémités. Le radius, l'humérus, le tibia, le fémur... appartiennent à cette variété anatomique.
- Les os courts sont plus ou moins cubiques et contiennent principalement de l'os spongieux, l'os compact ne forme qu'une fine couche à leur surface. C'est le cas des os du poignet, de la cheville, des phalanges.
- Les os sésamoïdes sont un type particulier d'os courts enchâssés dans un tendon, c'est la particularité de la rotule.
- Les os plats sont minces et souvent légèrement courbés. Ils présentent deux faces d'os compact plus ou moins parallèles, séparées par une couche d'os spongieux. Le sternum, les côtes, les omoplates et la plupart des os du crâne appartiennent à cette catégorie.

- Les os irréguliers n'appartiennent à aucune des catégories précédentes. Ils sont de forme complexe et comportent surtout de l'os spongieux recouvert de fines couches d'os compact. C'est le cas de certains os du crâne, des vertèbres et des os iliaques.

1.3. Constitution

a. Structure anatomique macroscopique des os

La structure des os longs

Les os longs ont tous la même structure.

- La diaphyse est le corps de l'os, sa partie longitudinale. C'est un cylindre d'os compact relativement épais qui renferme un canal médullaire central. Chez les adultes, ce canal (également appelé cavité médullaire) contient la moelle jaune, composée principalement de lipides.

- Les épiphyses sont les extrémités de l'os, souvent plus épaisses que la diaphyse. L'intérieur des épiphyses est formé d'os spongieux, l'extérieur d'une fine couche d'os compact. La partie sollicitée au niveau de l'articulation est couverte d'une mince couche de cartilage articulaire (cartilage hyalin). Celui-ci amortit la pression sur l'extrémité de l'os lors des mouvements de l'articulation.

Hormis au niveau des surfaces articulaires où se trouvent les cartilages articulaires, les os sont entourés par une couche externe, le périoste. La cavité centrale des os longs est bordée par une couche interne, l'endoste.

- Le périoste est la membrane double, d'un blanc brillant, sur la surface externe de la diaphyse. Il comporte surtout des ostéoblastes (cellules productrices de matière osseuse) et des ostéoclastes (cellules qui détruisent la matière osseuse), cellules décrites paragraphe 1.3 b ci-après. Les points d'insertion et d'ancrage des tendons et des ligaments sont localisés sur ce périoste. Les fibres de Sharpey (fibres collagènes qui fixent le périoste à l'os sous-jacent) sont extrêmement denses en ces points.

- L'endoste est la fine membrane de tissu conjonctif sur les surfaces internes de l'os. Il recouvre les travées de l'os spongieux dans les cavités médullaires et tapisse les canaux qui traversent l'os compact. Comme le périoste, l'endoste contient à la fois des ostéoblastes et des ostéoclastes.

La structure des os courts, irréguliers ou plats

Ces os ont une structure simple : leur surface externe est constituée d'une fine couche d'os compact recouvert de périoste et l'intérieur est formé d'os spongieux tapissé d'endoste. Comme ces os ne sont pas cylindriques, ils ne possèdent ni diaphyse ni épiphyses. Ils contiennent de la moelle osseuse entre les travées, mais n'ont pas de canal médullaire.

Dans les os plats, la couche interne d'os spongieux située entre les deux couches d'os compact est appelée le diploé.

La disposition du tissu hématopoïétique dans les os

L'os spongieux situé dans les épiphyses des os longs ainsi que le diploé des os plats contiennent le tissu hématopoïétique ou moelle rouge.

Chez les nouveau-nés, la moelle rouge occupe le canal médullaire des os longs et toutes les cavités de l'os spongieux; chez les adultes, la plupart des os longs possèdent un canal médullaire rempli de moelle jaune et il ne subsiste qu'un peu de moelle rouge dans les cavités de l'os spongieux. C'est pourquoi, parmi les os d'un adulte, les têtes du

fémur et de l'humérus, et surtout le diploé des os plats, produisent des globules sanguins.

b. Cellules et matrice extra cellulaire

Les os sont principalement constitués de tissu osseux mais contiennent également des vaisseaux sanguins, des nerfs. Le tissu osseux est un tissu conjonctif spécialisé, appelé tissu squelettique. Il est caractérisé par la nature de la Matrice Extra Cellulaire (MEC) qui a la propriété de se calcifier et de se solidifier.

Les cellules

Quatre types de cellules constituent le tissu osseux [1.2] : d'une part les cellules ostéoformatrices qui comprennent les ostéoblastes, les ostéocytes et les cellules bordantes et d'autre part les cellules ostéorésorbantes, les ostéoclastes.

- Les ostéoblastes sont des cellules ostéoformatrices situées à la surface externe et interne du tissu osseux en croissance. Les ostéoblastes élaborent les constituants organiques de la Matrice Extra Cellulaire. Ils sont transformés en ostéocytes, ou sont mis au repos sous la forme de cellules bordantes.

- Les ostéocytes sont des ostéoblastes différenciés incapables de se diviser et sont entièrement entourés par la Matrice Extra Cellulaire minéralisée. Les ostéocytes siègent dans des logettes, les ostéoclastes, et participent au maintien de la matrice osseuse.

- Les cellules bordantes sont des ostéoblastes au repos qui revêtent les surfaces osseuses et sont susceptibles, s'ils sont sollicités, de redevenir des ostéoblastes actifs.

- Les ostéoclastes, cellules très volumineuses de 20 à 100 μm de diamètre, sont le siège du processus de résorption osseuse. Ils sont très mobiles et capables de se déplacer à la surface des travées osseuses d'un site de résorption à un autre.

Les ostéoclastes, les ostéoblastes et les cellules bordantes de l'os se trouvent à la surface du tissu osseux, alors que les ostéocytes sont situés à l'intérieur de la matrice extracellulaire du tissu osseux.

La Matrice Extra Cellulaire

La Matrice Extra Cellulaire de l'os est calcifiée et comporte une partie organique et une phase minérale.

- La matrice organique est composée de microfibrilles de collagène, annexe 2, et de différents éléments intervenant dans la phase de minéralisation de la Matrice Extra Cellulaire osseuse.

- La phase minérale est constituée de cristaux de phosphate de calcium (apatite) localisés entre les fibres de collagène et/ou à l'intérieur de celles-ci, sous la forme de petites aiguilles hexagonales.

c. Les tissus osseux

La plupart des os sont constitués d'une couche externe qui paraît lisse et dense à l'œil nu, le tissu osseux compact, et d'une zone interne de tissu osseux trabéculaire (ou spongieux). De la moelle osseuse, rouge ou jaune, est contenue dans les cavités entre les travées de cette structure.

Dans le cas des os longs, figure 1.1, l'os spongieux est situé au niveau des extrémités (épiphyses), la partie centrale de l'os contient la moelle osseuse.

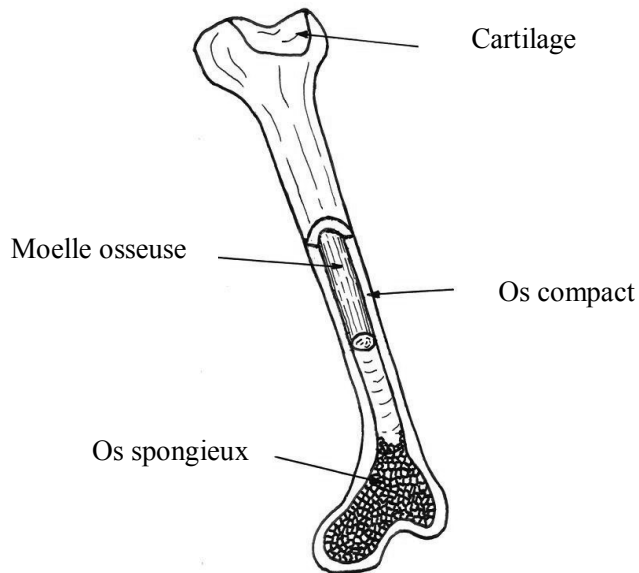


Figure 1.1 : coupe d'un os long.

L'os compact

L'ostéon, ou système de Havers, est l'unité structurale de l'os compact. Chaque ostéon est de forme cylindrique allongée, parallèle à l'axe longitudinal de l'os, figure 1.2. L'ostéon est constitué d'un ensemble de cylindres creux (6 à 15 par ostéon) composés de matrice osseuse et disposés concentriquement autour de son canal central, ou canal de Havers, qui contient des capillaires sanguins et des fibres nerveuses. Ces canaux sont reliés entre eux, avec la cavité médullaire et avec la surface de l'os par des canaux transversaux ou obliques, les canaux de Volkmann. Chaque cylindre de matrice est une lamelle de l'ostéon : l'os compact est souvent appelé os lamellaire.

Dans une lamelle donnée, les fibres de collagènes sont toutes parallèles mais les fibres de deux lamelles adjacentes sont toujours orientées dans des directions différentes. Cette alternance renforce les lamelles adjacentes ce qui fournit une résistance remarquable aux forces de torsion que subissent les os.

Les ostéocytes se trouvent dans de petits espaces vides à la jonction des lamelles, appelés lacunes. Ces lacunes sont reliées entre elles et au canal central de l'ostéon par les canalicules, canaux très fins, qui permettent aux nutriments et aux déchets de passer facilement d'un ostéocyte à l'autre. Ainsi, les ostéocytes sont bien alimentés même si la matrice osseuse est dure et imperméable aux nutriments.

La disposition des ostéons, avec l'axe orienté dans la direction des sollicitations mécaniques, confère à l'os compact un maximum de résistance. Si on considère la résistance en compression rapportée à la densité, l'os est une structure de référence dans le domaine des matériaux alvéolaires [1.3].

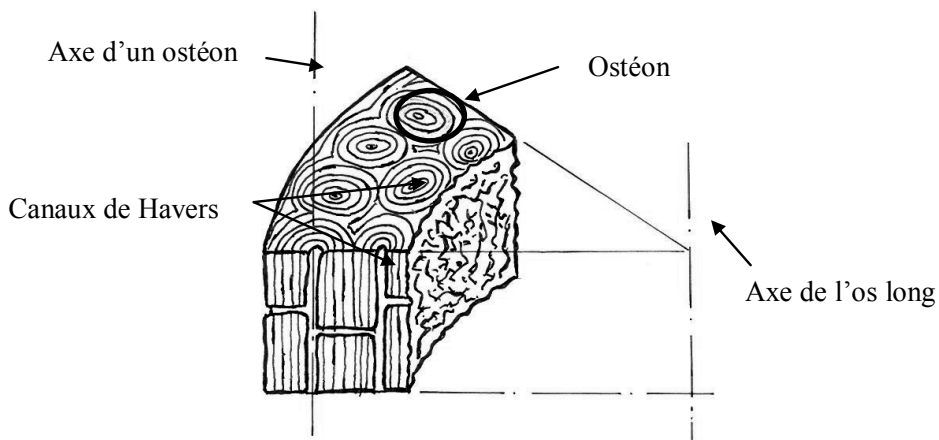


Figure 1.2 : élément d'os compact, cortical.

L'os spongieux

Le tissu osseux spongieux (trabéculaire) est essentiellement présent dans les os courts et les os plats (sternum, ailes iliaques) ainsi que dans les épiphyses des os longs. Il est formé par un labyrinthe tridimensionnel de trabécules (parois) de tissu osseux, ramifiées, délimitant un labyrinthe d'espaces interconnectés occupés par de la moelle osseuse et des vaisseaux, figure 1.3. La forme et la densité des cellules des alvéoles dépendent de l'intensité et de la direction des contraintes que l'os doit supporter. Les alvéoles ont tendance à s'aligner dans la direction où la contrainte est la plus grande, et leur densité augmente avec l'intensité du chargement.

L'os spongieux n'a pas d'ostéons mais ses travées comportent des lamelles irrégulières et des ostéocytes reliés par des canalicules. Les nutriments partent des espaces médullaires entre les travées et arrivent aux ostéocytes de l'os spongieux par diffusion à travers les canalicules.

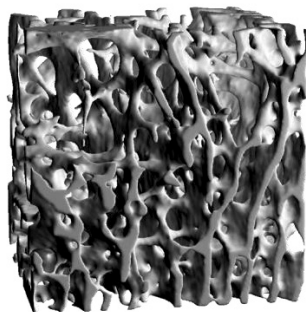


Figure 1.3 : tissu osseux spongieux.
Côté du cube : 5 mm. Photo UMR 791 INSERM.

2. DEVELOPPEMENT, CROISSANCE ET REMODELAGE

On distingue trois phases au cours de la vie de l'os.

- La phase de croissance, durant laquelle l'os est synthétisé. Le pic de masse osseuse est atteint trois ans après la puberté.
- L'âge adulte au cours duquel le phénomène de remodelage osseux maintient une masse à peu près constante. L'os est un tissu constamment renouvelé durant son existence. Il est résorbé par les ostéoclastes puis reconstruit par les ostéoblastes. La pérennité de la matrice osseuse repose sur l'équilibre de ce cycle. Grâce à ce procédé, l'os peut s'adapter aux chargements et se reconstruire en cas de fracture.
- Avec l'avancement en âge de l'individu, la dégradation et la synthèse sont déséquilibrées, la masse osseuse diminue.

2.1. Développement osseux

L'ostéogénèse et l'ossification désignent le processus de formation des os qui conduit à la formation du squelette osseux chez l'embryon. La croissance osseuse est une autre forme d'ossification qui se poursuit jusqu'à l'âge adulte, tant que le sujet continue de grandir. Chez l'adulte, l'ossification sert essentiellement au remaniement et à la consolidation des os.

Le squelette de l'embryon est entièrement composé de membranes fibreuses et de cartilage hyalin (articulaire) jusqu'à la 6^{ème} semaine de gestation. Ensuite la plus grande partie de ces structures est progressivement remplacée par le tissu osseux. Deux processus de formation osseuse existent alors : l'ossification intra-membraneuse et l'ossification endochondrale.

a. L'ossification intra-membraneuse

L'os intra-membraneux se forme à partir d'une membrane fibreuse. Les os produits sont des os plats. La substance fondamentale de la matrice osseuse se dépose entre les fibres de collagène, à l'intérieur de la membrane fibreuse, pour constituer l'os spongieux. Des plaques d'os compact finissent par enfermer le diploé.

Les étapes successives de l'ossification sont :

- la formation d'un point d'ossification dans la membrane fibreuse ;
- la formation d'une matrice osseuse à l'intérieur de la membrane fibreuse ;
- la formation de l'os fibreux et du périoste ;
- la formation des plaques d'os compact et de la moelle rouge.

b. L'ossification endochondrale

L'ossification se fait à partir du cartilage hyalin et conduit à l'os endochondral ou os cartilagineux. Ce processus est plus complexe que le précédent car le cartilage doit être désintégré au fur et à mesure de l'ossification. La majorité des os du squelette est formée par cette ossification. Les ostéoblastes qui se trouvent sous le périoste sécrètent une matrice osseuse sur le modèle du cartilage hyalin, constituant ainsi une gaine osseuse. La détérioration de la matrice cartilagineuse forme des cavités, ce qui permet l'entrée d'un bourgeon qui est à l'origine du point d'ossification primaire : il contient une artère et une veine nourricière, des vaisseaux lymphatiques, des neurofibres, des éléments de moelle rouge, des ostéoblastes et des ostéoclastes. La matrice osseuse se dépose autour des restes de cartilage.

2.2. Croissance des os

La croissance des os a lieu principalement pendant l'enfance et l'adolescence. La plupart des os cessent de croître au début de l'âge adulte.

a. La croissance en longueur des os

Les os longs s'allongent sous l'effet de la croissance interstitielle des cartilages épiphysaires et du remplacement du cartilage par de la matière osseuse. La croissance en longueur s'accompagne d'un remaniement presque continu des extrémités (épiphyses), afin de conserver les proportions adéquates entre la diaphyse et les épiphyses.

b. La croissance en épaisseur ou en diamètre des os

Les os s'épaississent grâce à l'efficacité de l'activité du périoste. Les ostéoblastes, situés sous le périoste, sécrètent une matrice osseuse sur la surface externe de l'os ; les ostéoclastes, situés sur l'endoste de la diaphyse, détruisent l'os avoisinant la cavité médullaire. La résorption est généralement moins importante que la formation de matière osseuse, l'os s'épaissit et son diamètre augmente.

2.3. Le remodelage osseux

Dans l'os compact aussi bien que dans l'os trabéculaire, le tissu osseux est en constant renouvellement [1.4]. Ce remodelage osseux intervient par résorption et formation successives de tissu osseux, processus au cours duquel ostéoclastes et ostéoblastes sont étroitement associés.

Le tissu osseux est renouvelé environ tous les quatre mois chez l'adulte. Le mécanisme de renouvellement comprend plusieurs phases.

- Phase d'activation : sous l'effet de facteurs ostéorésorbants les cellules bordantes, qui recouvrent normalement la surface osseuse, laissent passer les ostéoclastes (cellules de la résorption osseuse). En même temps, des ostéoblastes se différencient en ostéoclastes.
- Phase de résorption du tissu osseux : chaque ostéoclaste devenu actif se fixe à la Matrice Extra Cellulaire. La phase de résorption commence par la dissolution de la phase minérale (acidification) et se poursuit par la dégradation de la matrice organique sous l'action d'enzymes.
- Phase d'inversion : une fois que les ostéoclastes ont creusé une lacune dans le tissu osseux, ils meurent. Des macrophages viennent alors les remplacer, pour lisser le fond de la lacune.
- Phase de formation de tissu osseux : cette phase également composée de deux étapes est la plus longue. Une fois la résorption terminée, les cellules du fond de la lacune se différencient en ostéoblastes qui synthétisent une nouvelle Matrice Extra Cellulaire progressivement minéralisée par la suite.

Chez les adultes jeunes et en bonne santé, la masse osseuse totale demeure constante, car dans l'ensemble les taux de dépôt et de résorption d'os sont égaux. Le processus de remaniement n'est pas toujours uniforme ou équilibré :

- un dépôt osseux peut se produire dans une zone où l'os a subi une blessure ;

- la formation de tissu osseux est moins rapide que la résorption lorsque l'individu avance en âge, c'est ce qui conduit à l'ostéoporose, paragraphe 4.1.

3. PROPRIETES MECANQUES DE L'OS

3.1. L'os compact

Le comportement de l'os compact frais, chargé dans le sens longitudinal, est élastique jusqu'à une déformation de 0.7% en traction ou en compression [1.3]. La rupture se produit à 3% de déformation, figure 1.4. Dans le sens transverse, en traction, l'os est moins rigide et la rupture se produit à une déformation de 0.6%. Ces valeurs correspondent à des os frais. S'ils sont secs, le module d'Young augmente et la contrainte à la rupture diminue. L'os sec est également plus fragile.

Le module d'Young d'un os compact frais est d'environ 17 GPa dans le sens longitudinal et 11.5 GPa dans le sens transverse. La contrainte de compression maximale est de 193 MPa dans le sens longitudinal et 133 MPa dans le sens transverse. En traction les contraintes maximales sont de 148 MPa dans le sens longitudinal et 49 Mpa dans le sens transverse.

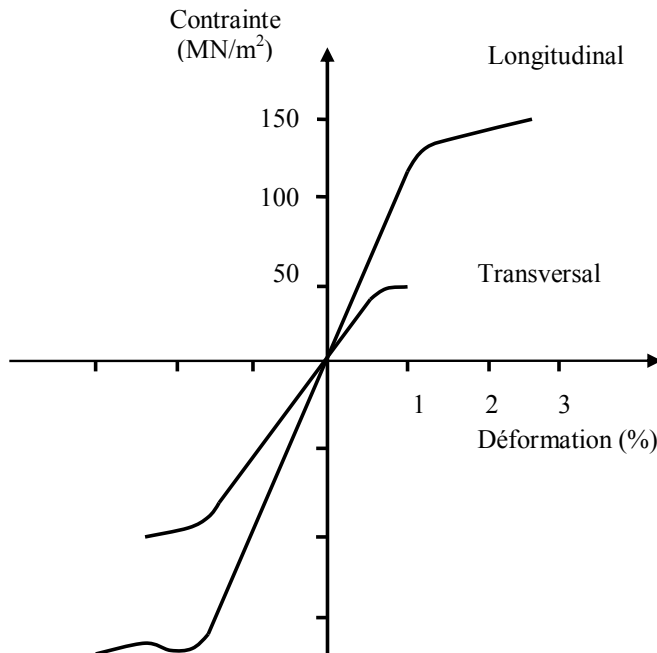


Figure 1.4 : essai de traction-compression de l'os compact.

Les différentes caractéristiques mécaniques de l'os compact frais sont résumées tableau 1.1 : masse volumique, modules d'Young, module de cisaillement, coefficient de Poisson, limite élastique en traction et en compression, énergie de rupture, ténacité.