

# LES STRUCTURES MUSCULO-SQUELETTIQUES

Avoir une approche intégrée de l'anatomie nécessite d'avoir une représentation élargie des connaissances. Ce chapitre permet de faire en partie le lien avec quelques bases physiologiques nécessaires à la compréhension du mouvement en action.

## La structure osseuse

L'os est un organe vivant, résistant, peu flexible à priori et solide. Sa dureté et sa rigidité le rend parfois fragile. L'ensemble des os forme le squelette ; soit 206 os. Le squelette pèse environ 20 % du poids du corps. Il existe parfois des os surnuméraires : les sésamoïdes.

Résistant et léger le squelette forme une armature mobile parfaitement adaptée aux fonctions de maintien et de motricité qu'il assure. La disposition de cette structure osseuse est le fruit de l'évolution, de la libération de la main, de la bipédie, du développement de l'encéphale...

Le squelette est divisé en deux parties : le squelette axial dont les os forment l'axe longitudinal (vertical) du corps et le squelette appendiculaire qui comprend les os des membres et des ceintures. On distingue (Fig. 7) :

La ceinture scapulaire relie le membre supérieur au squelette axial. La ceinture pelvienne relie le membre inférieur au squelette axial.

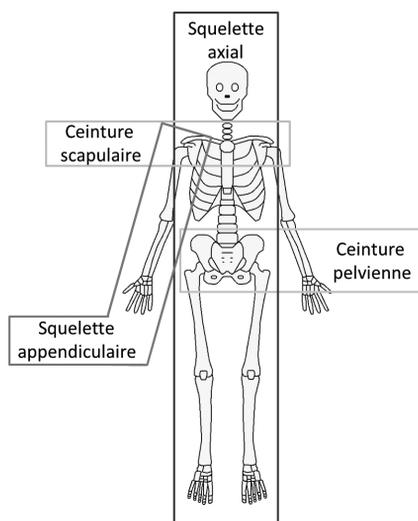


Figure 7 : L'organisation du squelette

Le système osseux inclut les articulations (jointures), les cartilages et les ligaments (faisceau de tissus conjonctif unissant les os au niveau des articulations). Les ligaments sont très résistants ; peu extensibles, ils permettent de garder les structures cartilagineuses et osseuses en contact. Il est nécessaire de distinguer et de ne pas confondre les ligaments et les tendons (les tendons fixent le muscle à la structure osseuse). Le

cartilage permet aux segments osseux de glisser entre eux. Les jointures confèrent au corps humain sa mobilité et sa souplesse en fonction des qualités intrinsèques (de tonicité et d'étirement des muscles et des ligaments) de chacun.

## **Les fonctions de la structure osseuse**

Six fonctions essentielles lui sont conférées : trois fonctions mécaniques et trois fonctions métaboliques.

### *Les fonctions mécaniques*

Les trois fonctions mécaniques de l'os permettent le soutien, la protection et le mouvement.

Le soutien : les os servent de charpente, ils sont mobilisés par les muscles (environ 600 muscles dans le corps) et articulés aux jointures. Les os servent de support et d'ancrage à tous les organes « mous ». Les os des membres inférieurs agissent comme des piliers supportant notre tronc en station debout.

La protection : comme structure solide, ils vont protéger les tissus mous des chocs et des forces externes. Protection de l'encéphale par la voûte (boîte) crânienne, de la moelle spinale (épine) par le rachis (colonne vertébrale), protection des viscères et des poumons par exemple par les côtes.

Le mouvement : grâce aux muscles, les segments osseux agissent comme des leviers pour déplacer le corps ou ses parties. C'est ainsi que nous pouvons marcher, courir, manipuler, attraper... La biomécanique traite de l'analyse du déplacement segmentaire : elle permet de caractériser les variables d'optimisation cinétique du mouvement. Son recours est indispensable pour comprendre le geste technique du sportif de haut niveau.

### *Les fonctions métaboliques*

Les trois fonctions métaboliques de l'os permettent, le stockage des minéraux, la formation des globules rouges et la croissance.

Le stockage des minéraux : les matières grasses sont stockées dans les cavités internes des os. L'os constitue un réservoir de minéraux comme le calcium et le phosphore. Une petite quantité de calcium (sous forme d'ions  $\text{Ca}^{++}$ ) doit toujours être présent dans le sang pour que le système nerveux transmette ses messages, que les muscles se contractent, que le sang coagule. La plus grande partie du calcium se dépose dans les os sous forme de sels. Des hormones régulent le transfert du calcium entre les os et le sang.

La formation des globules sanguins : l'hématopoïèse se réalise dans les cavités médullaires de certains os. Elle permet de fournir les trois lignées de cellules sanguines matures : érythrocytes, leucocytes et plaquettes.

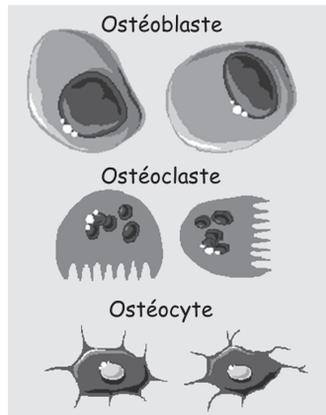
La croissance : les os déterminent le développement et la croissance des sujets en définissant les caractéristiques morphologiques (taille...). Le remodelage osseux est constant et évolutif selon un cycle de destruction (résorption) – formation.

## Constitution de la structure osseuse

La partie minérale représente les deux tiers du poids des os. Elle comprend une grande proportion de phosphate et de calcium, en de moindre proportion du fer et du fluor. La partie vivante de l'os comprend 1 % de protéines qui forment une matrice, des cellules osseuses ou ostéocytes, des fibres collagènes et les cellules de la moelle osseuse (soit un tiers du poids de l'os).

### *Les cellules osseuses*

Trois types de cellules différenciées assurent respectivement la formation et la destruction (résorption) du tissu osseux. Ce sont les ostéoblastes, les ostéoclastes et les ostéocytes (Fig. 8). Les ostéoblastes sont des cellules jeunes présentant un gros corps cellulaire. Ostéogènes (c'est-à-dire qui favorisent l'ostéof ormation), elles sécrètent la matrice osseuse constituée de collagène. Les ostéoclastes sont des cellules à plusieurs noyaux, formées par fusion. Situées dans les lacunes (cavités osseuses entre les différentes couches de lames osseuses concentriques), les ostéoclastes sont macrophages (c'est-à-dire qui détruisent les cellules osseuses anciennes). Les ostéocytes sont les cellules issues de l'ostéoblaste (avec une durée de vie dix ans). C'est une cellule fusiforme, aplatie, avec un noyau central et des prolongements fins qui unissent les cellules osseuses entre elles. Moins active que l'ostéoblaste, elle participe cependant au maintien de la matrice (en élaborant ses constituants capables d'ostéosynthèse), ou en la détruisant. Il existe aussi des cellules bordantes à la surface de l'os. En principe inactive, ces cellules peuvent se réactiver pour se comporter comme un ostéoblaste.

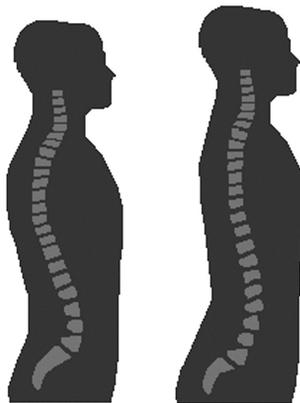


**Figure 8 : Les cellules osseuses**

La réduction de la masse osseuse est un phénomène physiologique naturel (ostéopénie). L'alimentation, le mode de vie, les facteurs héréditaires y jouent un rôle. La pratique régulière d'exercices physiques permet d'augmenter la densité osseuse et de diminuer les risques de fractures survenant avec l'âge (Winters-Stone et Snow, 2006). Les exercices de puissance sont plus favorables que les exercices de force pour maintenir la densité minérale osseuse chez la femme post-ménopausée (Stengel et al., 2005). Il y a une forte discrimination selon le genre. Après 50 ans chez la femme, la perte osseuse est beaucoup plus significative que chez l'homme. En effet, le remodelage osseux est fonction du taux d'œstrogène (en particulier au niveau de l'os spongieux). Pour les personnes de plus de 70 ans la perte est accentuée par la carence en calcium et en vitamine D. Une perte de

40 % du capital osseux trabiculaire apparaît chez la femme entre 20 et 80 ans. Le risque de fracture est fortement accentué. Selon la densité et la composition osseuse plusieurs classifications déterminent la qualité de l'os. Dans le cadre de l'ostéo-intégration, cette analyse détermine la conception, la fabrication et la réussite de la pose de tout implant.

L'exercice, la surcharge pondérale, l'alitement et l'apesanteur impactent la matrice osseuse. Ainsi, une étude a analysé l'effet de l'apesanteur sur la masse osseuse de quinze cosmonautes russes en séjour (entre un et six mois) dans la station MIR. La densité minérale demeure stable au niveau du radius. Une diminution significative est mesurée au niveau du tibia à partir de deux mois de mission. Cette perte varie selon les sujets mais se révèle proportionnelle au temps passé en état d'apesanteur. La récupération est presque totale après six mois sur terre. L'apesanteur réduit la pression sur les vertèbres en induisant très souvent des douleurs au niveau lombaire (les astronautes peuvent grandir de 5 à 7 cm : Fig. 9). Les structures osseuses de support subissent donc une déminéralisation plus importante en apesanteur car les effets de la pression sont moindres et ne favorisent plus le remodelage osseux. Cela explique les effets sur le tibia et non sur le radius.



**Figure 9 : Effet de l'apesanteur**

Dans l'espace, le sang ne se diffuse pas préférentiellement vers les pieds grâce à la pesanteur mais se distribue pareillement dans toutes les directions. L'astronaute a une allure un peu bouffie : les veines du cou et du visage sont plus dilatées à l'inverse les jambes qui deviennent plus minces. L'équilibre et l'orientation sont également perturbés dans l'espace. Au niveau de l'oreille interne, les otolithes sensibles à toute inclinaison de la tête sont stimulés de façon anachronique. Les informations transmises par les yeux et l'oreille interne ne concordent pas : cela provoque le mal de l'espace.

### *Le collagène*

Le collagène est une protéine (gélatineuse) présente dans toutes les structures du corps : peau, cartilages, tendons, ligaments et tissus conjonctifs. Il représente de 30 à 35 % des protéines totales de l'organisme. C'est une protéine fibrillaire qui se compose de trois chaînes de protéines décalées d'un quart de longueur. Se liant entre elles, les fibres collagènes forment une triple hélice qui confère ainsi à l'os sa résistance à l'étirement (Fig. 10). Fixée entre les molécules collagènes, l'hydroxyapatite rigidifie cette hélice. Le

collagène est le constituant structural de l'os, du cartilage, du tissu conjonctif et des ligaments. Le collagène de type I est le plus abondant. Il se retrouve dans la peau, les tendons, le tissu osseux. Le collagène de type II se trouve dans les cartilages, celui de type III dans les muscles et les parois des vaisseaux.

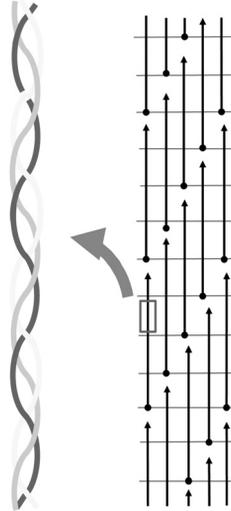


Figure 10 : Le collagène

L'os est constitué de lamelles concentriques : les ostéons (ou fibres de Havers). L'ostéon est l'unité histophysique. Ces lamelles sont superposées en couches successives et orientées dans des sens opposés pour augmenter la résistance (Fig. 11). Cette organisation spécifique confère à l'os toute sa rigidité mais aussi une « certaine souplesse » en lui permettant d'absorber les chocs. Les perches en fibres de carbone sont conçues structurellement selon le même principe pour être légère, rigide et flexible (permettant de restituer l'énergie cinétique accumulée lors de la course pour sauter plus haut). Les ostéons s'arrangent en unités cylindriques longitudinalement à l'axe diaphysaire des os longs et forment un tissu dense : c'est l'os compact (ou cortical).

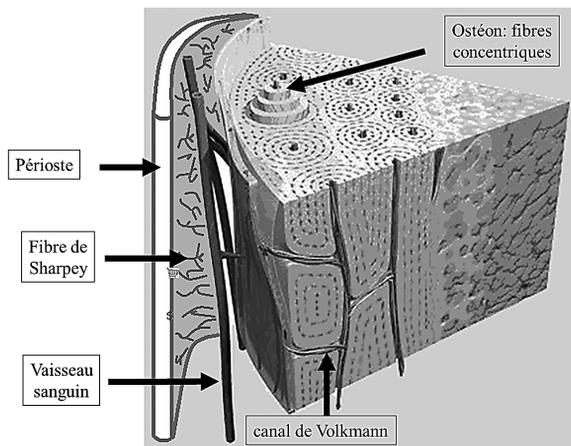


Figure 11 : Les ostéons

Bien que compact, des canaux perforants transpercent cette structure. Dans ces canaux perpendiculaires à l'axe central (canaux de Volkmann) transitent les vaisseaux sanguins jusqu'à la cavité médullaire. La cavité médullaire contient la moelle osseuse jaune (cellules adipeuses) chez l'adulte. Chez l'enfant, cette cavité abrite de la moelle rouge.

Les ostéons peuvent être très courts et organisés en lamelles osseuses irrégulières. Ils édifient alors un tissu composé d'un lacs de trabécules et forment un réseau d'espaces anastomosés (contenant de la moelle osseuse rouge). Les trabécules laissent place à des lacunes (petits espaces vides de matrice) contenant des ostéocytes (cellules à maturité). Les échanges métaboliques se font par des canaux fins irradiant l'ensemble de l'espace : les canalicules. Les trabécules sont bordés par une fine couche composée de cellules souches osseuses (ostéoclastes et ostéoblastes). Cette organisation se retrouve aux extrémités des os longs et forme un tissu moins discontinu : c'est l'os spongieux (ou trabiculaire). Bien que discontinu, les ostéons sont orientés pour résister aux forces de pression en formant des travées osseuses (Fig. 12). L'os compact représente 80 % de notre masse osseuse contre 20 % pour l'os spongieux.

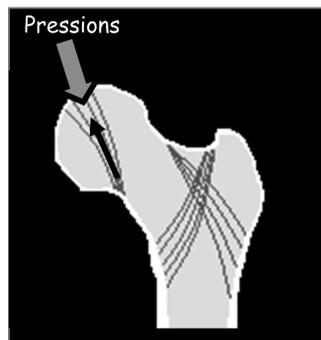


Figure 12 : Orientation des travées osseuses

### *Le périoste*

Le périoste est une membrane fibro-élastique très vascularisée, blanchâtre, entourant la surface de l'os. Fortement innervé, il transmet les informations douloureuses. C'est une couche ostéogène en profondeur. Suite à une fracture, c'est à partir du périoste que le cal osseux se constitue. Le périoste s'accroche fortement à l'os compact par les fibres de Sharpey et assure l'insertion des tendons et ligaments sur l'os. Des fortes tensions musculaires à répétition peuvent affecter le périoste en générant une inflammation : c'est la périostite. En athlétisme, des exercices pliométriques trop fréquents ou trop intensifs comme les multibonds génèrent ce type de traumatisme au niveau du tibia. Des douleurs se font ressentir souvent au repos s'accroissant à l'exercice (courses, sauts...) lors des phases d'accélération et de décélération. En effet, lors de la réception et la propulsion du pied au sol, les contraintes exercées sur les tendons sont maximales.

### *La moelle osseuse*

La moelle osseuse représente environ 4 % du poids corporel. On distingue la moelle osseuse rouge de la moelle osseuse jaune.

La moelle osseuse rouge possède une fonction sanguine importante : c'est une moelle hématogène. C'est un tissu qui contribue à la formation des globules et des plaquettes (rôle hématopoïétique). Cette activité décroît avec l'âge et ne se retrouve que dans certains os plats ou courts (sternum, côtes, vertèbres, os coxaux et du crâne). Elle concourt aussi à l'édification du tissu osseux (rôle ostéogène) mais aussi au développement des cellules immunitaires pour la défense de l'organisme.

La moelle osseuse jaune (dégénérescence graisseuse de la moelle rouge) occupe la cavité axiale diaphysaire des os longs. Cet adipocyte médullaire peu vascularisé possède des propriétés endocrines et participe à la croissance et au renouvellement de l'os. La moelle jaune devient grise en vieillissant.

La moelle osseuse n'est pas seule à assurer l'hématopoïèse ; la rate, le foie y concourent aussi.

### *Le cartilage*

Les extrémités osseuses (diaphyses) sont souvent recouvertes de cartilage articulaire pour favoriser le glissement et donc le mouvement des différents segments. Le cartilage est classé en trois types, le cartilage hyalin, le fibrocartilage et le cartilage élastique en fonction de la proportion en fibres collagènes.

Le cartilage n'est pas vascularisé ni innervé. Nourri par diffusion ou imbibition de la synovie et du tissu trabéculaire des épiphyses, il ne peut donc se développer et se régénérer. Cependant, à partir des cellules souches totipotentes (prélevées sur la moelle osseuse ou dans les fosses nasales), un remodelage est possible en comblant la perte cartilagineuse par spécialisation des cellules en cartilage hyalin. Les qualités électrostatiques de ce tissu pourraient aussi favoriser le glissement des structures entre elles notamment au niveau des jointures.

Le cartilage hyalin est une substance ferme de couleur légèrement bleutée. Les chondroblastes forment l'essentiel de la substance, les fibres collagènes sont imperceptibles. Le cartilage hyalin compose la majeure partie du squelette embryonnaire, recouvre l'extrémité des os longs dans les cavités articulaires, forme les cartilages costaux, les cartilages du nez, le larynx et la trachée. Souple, le cartilage hyalin peut se déformer et atténue les forces de compressions générées au niveau articulaire. Le cartilage hyalin situé entre la métaphyse et l'épiphyse assure la croissance de l'os : il s'appelle cartilage de conjugaison (ou épiphysaire). Son absence caractérise la fin de la croissance.

Le cartilage fibreux se compose d'un taux important de fibres collagènes. Orientées selon les pressions, les fibres collagènes forment des faisceaux denses et entrecroisés pour résister aux forces internes et externes. Les disques intervertébraux, la symphyse pubienne, les ménisques, sont composés de cartilage fibreux. La fonction essentielle de ces structures est de résister à la traction et à la compression.

Le cartilage élastique (de couleur jaunâtre) est riche en fibres collagènes élastiques. Il se retrouve essentiellement au niveau de l'oreille interne et externe. Le cartilage élastique permet de maintenir la forme d'une structure tout en demeurant souple.

La structure du cartilage varie avec l'âge (10 % de cellules, 80 % d'eau, lipides + polysaccharides). Les fibres collagènes s'épaississent, la masse hydrique diminuant. La calcification du tissu génère un cartilage arthrosique : c'est l'arthrose. L'arthrose est une maladie dégénérative s'observant sur les personnes âgées. Au ramollissement succède

une dégradation des cartilages puis l'os dénudé s'épaissit en formant des excroissances osseuses. Dans un premier temps, la raideur articulaire s'estompe en s'échauffant. Dans un second temps, l'amplitude du mouvement se réduit de plus en plus considérablement. Cette pathologie est fortement handicapante et douloureuse.

L'arthrite est une affection inflammatoire de l'articulation se traduisant par une douleur, un gonflement (œdème) et une chaleur locale (avec ou sans rougeur). Son origine peut être infectieuse, inflammatoire, génétique ou liée à une intolérance alimentaire.

La polyarthrite rhumatoïde est une maladie auto-immune c'est-à-dire où le système immunitaire attaque ses propres tissus. Cette maladie se manifeste par une inflammation de la membrane synoviale. Le cartilage s'érode, se cicatrise et s'ossifie en provoquant une déformation des os (des doigts par exemple).

Enfin la goutte est un rhumatisme dû à un taux d'acide urique trop élevé qui se dépose dans les articulations. Elle est plus fréquente chez l'homme (il est probable qu'un facteur héréditaire soit en jeu).

## Le remodelage osseux

En tant que structure adaptée, le tissu osseux compact et trabéculaire se renouvelle constamment : c'est le remodelage osseux. Le remodelage osseux est constitué de deux étapes, la résorption (destruction) et la formation. Ce processus de résorption – formation apparaît comme deux phénomènes complémentaires et indissociables. Pour un sujet sain, résorption et formation restent constant mais pas uniforme. Cependant, l'ensemble de la matrice spongieuse se renouvelle plus vite (25 % par an), que l'os compact (moins de 5 % par an). L'os spongieux est donc exposé plus vite et plus tôt au risque d'ostéoporose. Le pic de masse osseuse (PMO) est atteint à la fin de l'adolescence. Le remodelage dure environ quatre mois chez l'adulte ; la phase de formation étant plus longue que la phase de la résorption. Le remodelage n'est pas synchrone ce qui permet de réguler et d'adapter la formation osseuse en fonction de facteurs biochimiques (PTH, vitamine D) ou mécaniques comme la pression. Deux hormones, la calcitonine et la parahormone (PTH), permettent de réguler la formation osseuse en fonction du taux de calcium sanguin. Un déficit en calcium ou en vitamine D chez l'enfant peut induire un ramollissement osseux : c'est le rachitisme. Ces substrats sont souvent proposés comme additif alimentaire pour prévenir toute carence et maladie infantile.

Finalement, le remodelage osseux est soumis à deux boucles de régulations :

- un processus de régulation hormonale ayant pour but de maintenir la concentration de calcium dans le sang
- processus de régulation mécanique en rapport avec les contraintes exercées (forces internes et externes) sur la structure osseuse.

## Les contraintes mécaniques

Différents types de contraintes mécaniques s'exercent sur les segments osseux (Fig. 13). La contrainte peut générer une tension c'est-à-dire une déformation de la structure. La principale contrainte est la force de compression induite par la composante gravitaire. La compression et la traction agissent parallèlement à l'axe segmentaire. La flexion