



6

LE TISSU OSSEUX ET LES OS

SOMMAIRE ET OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Cartilages (p. 165)

1. Expliquer les propriétés fonctionnelles de chaque type de tissu cartilagineux.
2. Situer les principaux cartilages d'un squelette adulte.
3. Expliquer et différencier les deux modes de croissance du cartilage.

Fonctions des os (p. 165-167)

4. Énumérer et décrire cinq fonctions importantes des os.

Classification des os (p. 167-168)

5. Comparer et montrer les différences structurales entre les quatre classes d'os, puis donner des exemples de chaque classe.

Structure des os (p. 168-172)

6. Décrire l'anatomie macroscopique d'un os long typique et d'un os plat. Préciser la situation et les fonctions de la moelle osseuse rouge et jaune, du cartilage articulaire, du périoste et de l'endoste.
7. Montrer l'importance fonctionnelle du relief osseux.
8. Décrire la structure du tissu osseux compact et du tissu osseux spongieux.
9. Discuter de la composition chimique des os. Montrer les avantages relatifs que leur confèrent leurs composants organiques et inorganiques.

Développement des os (ostéogenèse) (p. 172-176)

10. Comparer et montrer les différences entre les deux types de formation osseuse: l'ossification intramembraneuse et l'ossification endochondrale.
11. Décrire le processus de croissance des os longs qui se produit au niveau des cartilages épiphysaires.

Homéostasie osseuse: remaniement et consolidation (p. 176-181)

12. Comparer la situation et les fonctions des ostéoblastes, des ostéocytes et des ostéoclastes dans le remaniement osseux.
13. Expliquer de quelle façon la régulation hormonale et les forces physiques influent sur le remaniement osseux.
14. Décrire les étapes de la consolidation des fractures.

Déséquilibres homéostatiques des os (p. 181, 184)

15. Montrer les différences entre les troubles du remaniement osseux manifestes dans l'ostéoporose, l'ostéomalacie et la maladie osseuse de Paget.

Développement et vieillissement des os: chronologie (p. 184-185)

16. Décrire la succession et les causes des modifications de la structure osseuse et de la masse osseuse au cours de la vie.

Nous avons tous entendu des expressions comme « avoir mal aux os », « un sac d'os », « sec comme un os », etc., autant d'images peu flatteuses et inexactes

de l'un des tissus les plus intéressants de notre organisme. Les os sont également les principaux éléments de notre squelette. C'est notre cerveau, et non les os, qui détermine la sensation d'épuisement; nos os n'ont rien de sec; et pour ce qui est du «sac d'os», ils sont effectivement plus visibles chez certains d'entre nous, mais s'ils n'étaient pas là pour former notre squelette, nous ramperions sur le sol comme des limaces, incapables d'adopter une forme précise. Le squelette comprend également des cartilages, qui sont moins forts que les os, mais plus élastiques. Dans ce chapitre, nous présentons les principales localisations des cartilages du squelette. Nous nous penchons plus particulièrement sur la structure et les fonctions générales du tissu osseux ainsi que sur la dynamique de sa formation et de son remaniement au cours de la vie. Les chapitres 7 et 8 traiteront des os qui constituent notre squelette et des articulations qui en permettent la mobilité.

CARTILAGES

Bien que notre squelette soit initialement formé de cartilages et de membranes fibreuses, ces premiers supports sont rapidement remplacés par les os. Les quelques cartilages qui restent dans le squelette adulte siègent principalement dans les régions nécessitant des tissus plus souples, comme nous le verrons ci-dessous.

Structure, types et localisation des cartilages

Un **cartilage** du squelette se compose de l'une des trois variétés de *tissu cartilagineux*; ce tissu possède la caractéristique d'être constitué principalement d'eau. (Ainsi que nous l'avons expliqué dans l'encadré de la page 133, c'est la haute teneur en eau du cartilage qui lui confère son élasticité, c'est-à-dire sa capacité à reprendre sa forme initiale après avoir été comprimé.) Dépourvu de nerfs et de vaisseaux sanguins, le cartilage est entouré d'une membrane de tissu conjonctif dense appelée *périchondre* (*peri* = autour; *khondros* = cartilage). Tel un corset, le périchondre réprime l'expansion du cartilage lorsqu'il est comprimé.

Comme nous l'avons vu au chapitre 4, le corps comprend trois types de tissu cartilagineux: le cartilage hyalin, le cartilage élastique et le cartilage fibreux. Tous ont la même composition de base: des cellules appelées *chondrocytes* sont emprisonnées dans de petites cavités (lacunes) à l'intérieur d'une *matrice extracellulaire* faite de substance fondamentale gélatineuse et de fibres. Les trois types de tissus cartilagineux peuvent se retrouver dans les cartilages du squelette (figure 6.1).

Cartilage hyalin

Le **cartilage hyalin** est composé de chondrocytes sphériques (voir la figure 4.8g, p. 127) et les seules fibres que contient sa matrice sont des fibres collagènes. Le cartilage hyalin, qui ressemble à du verre givré à l'état frais, est un support à la fois flexible et élastique. C'est le type de cartilage le plus répandu dans le corps humain. Comme on peut le constater à la figure 6.1, il comprend (1) le **carti-**

lage articulaire, qui recouvre les extrémités des os dans les articulations mobiles; (2) le **cartilage costal**, qui relie les côtes au sternum; (3) le **cartilage du larynx**, qui forme le squelette du larynx; (4) les **cartilages trachéal et bronchial**, qui fortifient les autres voies de passage du système respiratoire; et (5) les **cartilages du nez**, qui soutiennent le nez.

Cartilage élastique

Le **cartilage élastique** ressemble beaucoup au cartilage hyalin (voir la figure 4.8h, p. 128), mais il contient un plus grand nombre de fibres élastiques, ce qui lui permet de mieux résister à des flexions répétées. On le trouve à quelques endroits seulement dans le squelette (figure 6.1) — il soutient notamment l'oreille externe et forme l'épiglotte (languette mobile qui se replie pour couvrir l'orifice du larynx lors de la déglutition).

Cartilage fibreux

Le **cartilage fibreux**, ou **fibrocartilage**, se présente comme une alternance de rangées de chondrocytes sensiblement parallèles et de faisceaux de fibres collagènes épaisses (voir la figure 4.8i, p. 129). Il résiste bien à la compression et à l'étirement. On le trouve là où s'exercent des pressions et des étirements considérables, par exemple dans les coussins cartilagineux du genou (ménisques) et les disques intervertébraux de la colonne vertébrale.

Croissance du cartilage

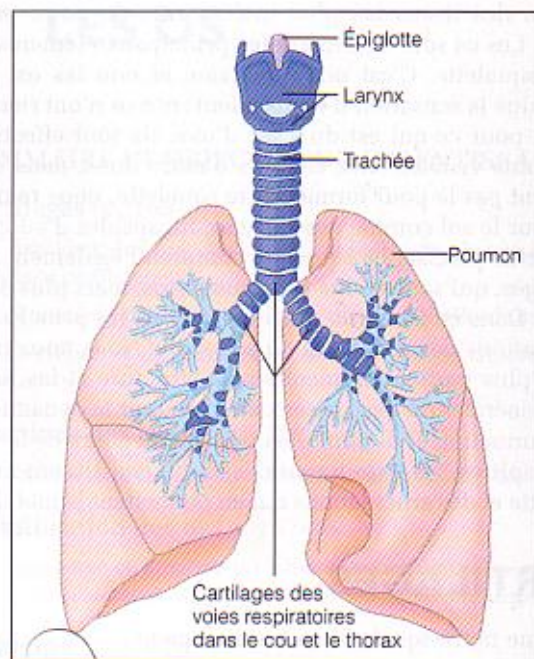
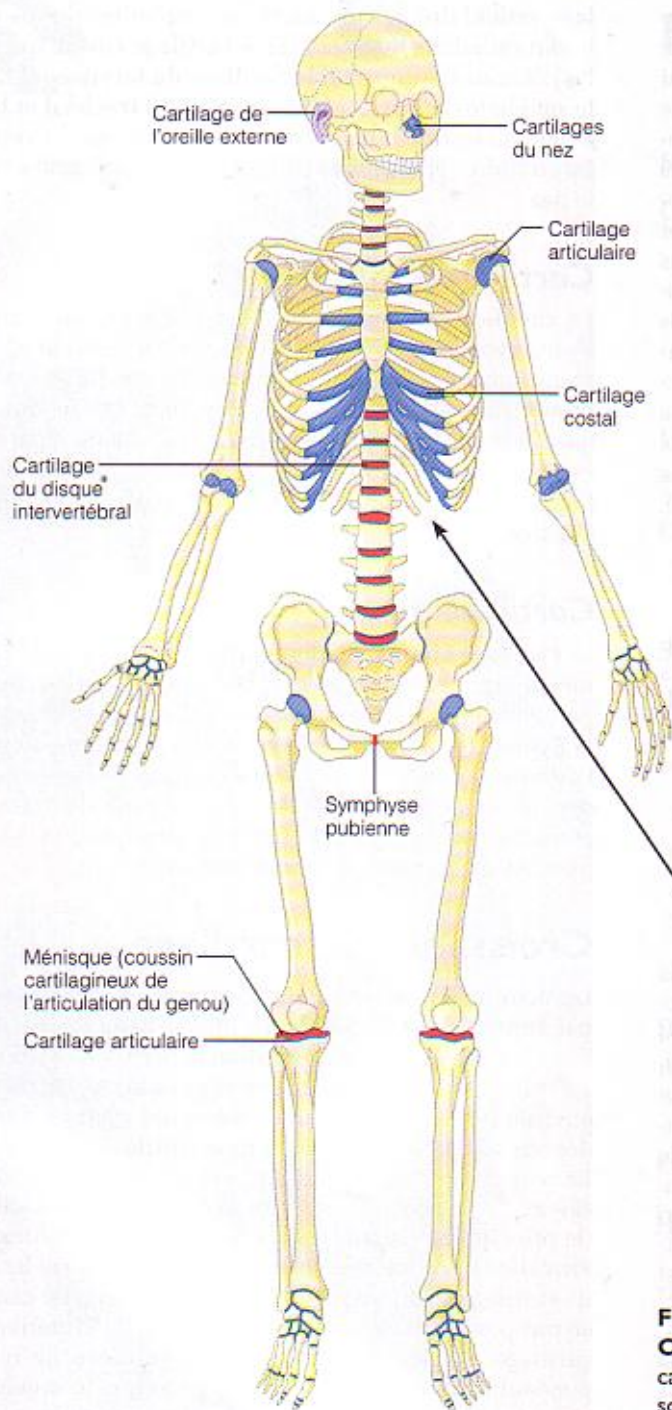
Les deux modes de croissance du cartilage sont la croissance par apposition et la croissance interstitielle (voir p. 126). Dans la **croissance par apposition** (à partir de l'extérieur), les cellules qui produisent le cartilage dans le périchondre environnant sécrètent une nouvelle matrice qui se dépose sur la face externe du tissu cartilagineux existant. Le mot *apposition* signifie «placer à côté», ce qui décrit assez bien le phénomène. Dans la **croissance interstitielle** (le principal processus de croissance pour un cartilage en formation), les chondrocytes enfermés dans les lacunes du cartilage se divisent et sécrètent une nouvelle matrice, ce qui provoque une croissance à partir de l'intérieur du cartilage. Habituellement, le cartilage cesse de croître pendant l'adolescence, en même temps que le squelette.

Dans certaines conditions, des sels de calcium peuvent se déposer dans la matrice du cartilage. Cette calcification survient lors de la *croissance normale des os* (p. 174-176) et accompagne le vieillissement. Il faut toutefois noter que le cartilage calcifié ne constitue pas un tissu osseux; le cartilage et les os sont toujours deux tissus distincts.

FONCTIONS DES OS

En plus de donner à notre corps sa forme extérieure, nos os remplissent plusieurs fonctions importantes:

1. **Soutien.** Les os constituent une structure rigide qui sert de support à notre corps et d'ancrage à tous ses organes mous. Par exemple, les os des membres inférieurs agissent comme des piliers qui portent notre



Légende :

- = Cartilage hyalin
- = Cartilage élastique
- = Cartilage fibreux

FIGURE 6.1

Cartilages dans le squelette et le corps adultes. Les cartilages qui soutiennent les voies respiratoires et le larynx sont montrés séparément à droite.

tronc lorsque nous nous tenons debout, et la cage thoracique soutient les parois du thorax.

2. **Protection.** L'encéphale est étroitement recouvert par les os du crâne. Les vertèbres entourent la moelle épinière et la cage thoracique protège les organes vitaux du thorax.
3. **Mouvement.** Les muscles squelettiques, qui sont reliés aux os par des tendons, agissent sur les os comme des leviers pour déplacer le corps ou ses parties. C'est ainsi que nous pouvons marcher, saisir un objet ou respirer. C'est l'agencement des os et des muscles

squelettiques ainsi que la structure des articulations qui déterminent quels mouvements sont possibles.

4. **Stockage des minéraux.** Les os constituent un réservoir de minéraux, dont les plus importants sont le calcium et le phosphore (sous forme de phosphates). Au besoin, ces minéraux sont libérés dans la circulation sanguine sous forme d'ions, puis distribués aux différentes parties de l'organisme. En fait, des « dépôts » et des « retraits » de minéraux s'effectuent de manière presque continuelle au niveau des os.

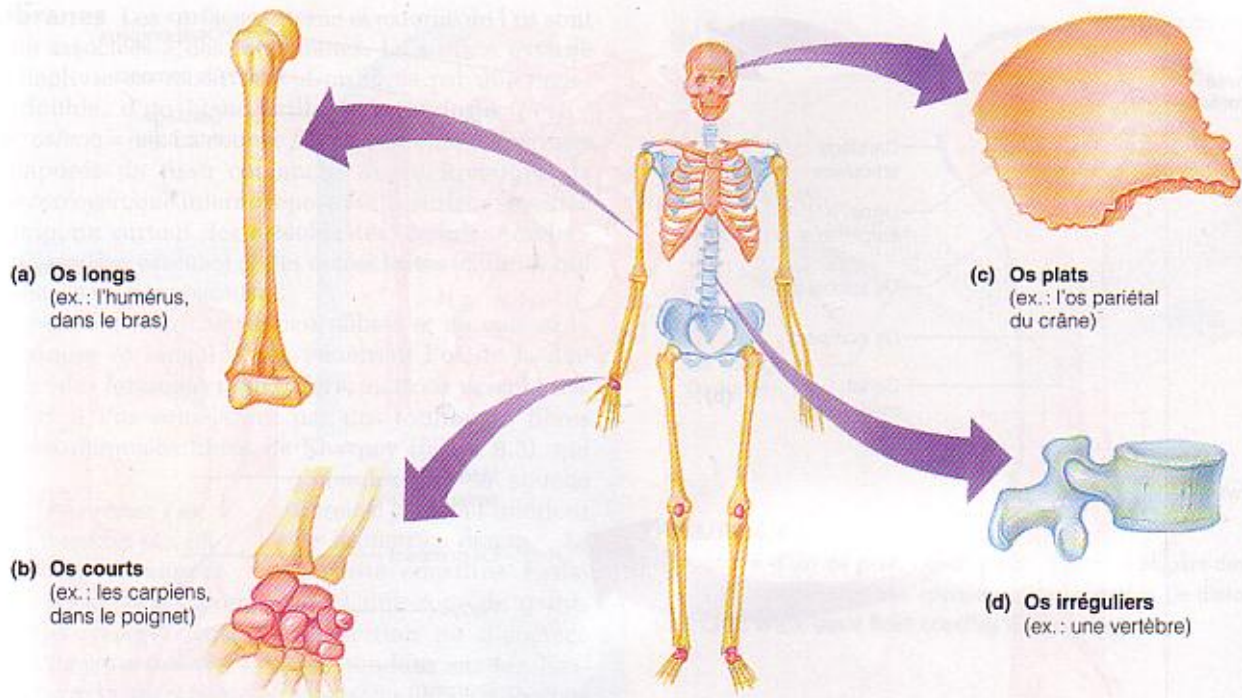


FIGURE 6.2
Classification des os selon leur forme.

5. **Formation des globules sanguins.** Chez l'adulte, la formation des globules sanguins rouges et blancs, ou *hématopoïèse*, se produit dans les cavités médullaires de certains os.

CLASSIFICATION DES OS

Il existe des os de toutes les grosseurs et de toutes les formes. Par exemple, le petit os pisiforme du poignet est de la taille et de la forme d'un petit pois, alors que le fémur (os de la cuisse) peut mesurer près de 60 cm chez certains sujets et possède une grosse tête sphérique. Chaque os présente une forme particulière qui répond à un besoin précis. Le fémur, par exemple, doit pouvoir résister à des pressions importantes, et sa forme de cylindre creux lui assure la plus grande solidité possible pour un poids minimal, selon le principe de relation entre la structure et la fonction que nous avons établi au chapitre 1.

Les os sont classés selon leur forme : c'est ainsi qu'on trouve des os longs, courts, plats et irréguliers (figure 6.2). Chaque os du squelette comporte une couche externe dense qui paraît lisse et solide à l'œil nu, l'**os compact**. À l'intérieur de cette couche se trouve l'**os spongieux**, une structure en nids d'abeilles constituée de petites pièces pointues ou plates appelées *travées* (*trabs* = poutre). Dans l'os vivant, les cavités entre les travées de cette structure contiennent de la moelle osseuse rouge ou jaune. Nous en parlerons plus en détail lorsque nous traiterons de la structure microscopique des os.

1. **Os longs.** Comme leur nom l'indique, les os longs sont beaucoup plus longs que larges. Un os long com-

prend un corps et deux extrémités. Il est surtout formé d'os compact, mais peut comporter à l'intérieur une quantité appréciable de tissu spongieux. Tous les os des membres sont longs, sauf ceux du poignet et de la cheville ainsi que la rotule (voir la figure 6.2). Remarquez bien que cette classification des os reflète leur forme allongée et non leur taille. Les trois os qui forment chacun de vos doigts (deux dans les pouces) sont des os longs, même s'ils sont très petits.

2. **Os courts.** Les os courts sont plus ou moins cubiques. Ils contiennent surtout de l'os spongieux; l'os compact ne forme qu'une fine couche à leur surface. Les os du poignet et de la cheville sont des os courts (voir la figure 6.2).

Les **os sésamoïdes** (*sésamon* = sésame; *eidos* = forme) sont un type particulier d'os courts enchâssés dans un tendon (la rotule, par exemple). Leur nombre et leur taille varient d'un individu à l'autre. On sait que certains d'entre eux modifient la direction de la traction exercée par un tendon, mais on ignore encore la fonction de certains autres.

3. **Os plats.** Les os plats sont minces, aplatis et en général légèrement courbés. Ils présentent deux faces d'os compact plus ou moins parallèles, séparées par une couche d'os spongieux. Le sternum, les côtes et la plupart des os du crâne sont des os plats (voir la figure 6.2).
4. **Os irréguliers.** Les os qui n'appartiennent à aucune des catégories précédentes sont dits irréguliers. Certains os du crâne, les vertèbres et les os iliaques sont des os irréguliers (voir la figure 6.2). Tous ces os

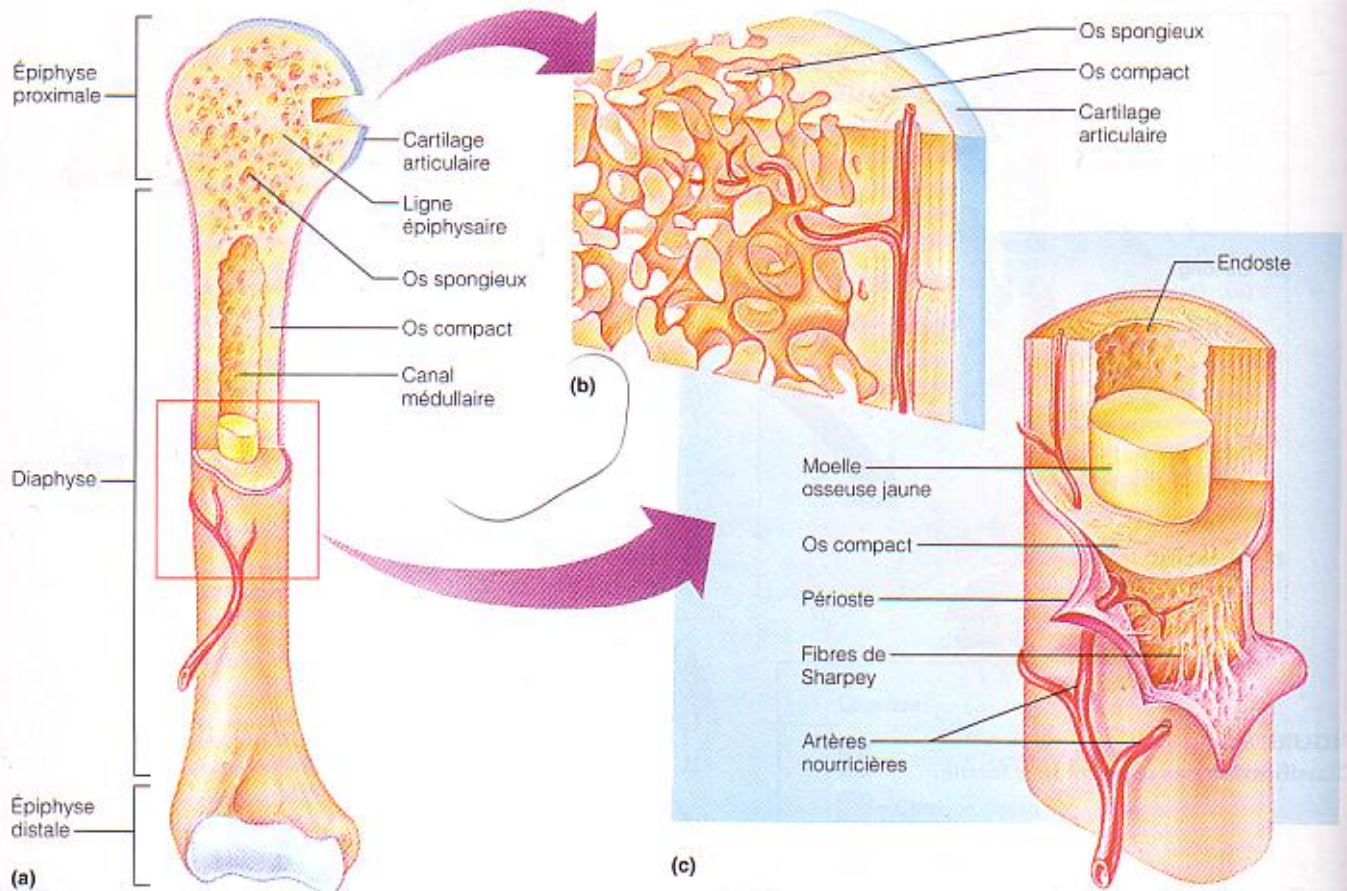


FIGURE 6.3
Structure d'un os long (humérus).
 (a) Vue antérieure avec coupe frontale montrant l'intérieur de l'extrémité proximale. (b) Vue tridimensionnelle

grossie de l'os spongieux et de l'os compact de l'épiphyse de (a). (c) Coupe transversale grossie du corps (diaphyse) de (a). Remarquez que la surface externe de la diaphyse est recouverte de périoste,

mais que la surface articulaire de l'épiphyse est recouverte de cartilage hyalin.

présentent des formes complexes et comportent surtout de l'os spongieux recouvert de fines couches d'os compact.

STRUCTURE DES OS

Les os sont des *organes*. (Rappelez-vous qu'un organe comprend différents tissus.) Même si l'os est constitué principalement de tissu osseux, il contient également du tissu nerveux dans ses nerfs et du tissu cartilagineux dans ses cartilages articulaires; d'autre part, ses cavités sont tapissées de tissu conjonctif et les parois de ses vaisseaux sanguins sont composées de tissu musculaire et de tissu épithélial. Nous allons étudier ici l'anatomie des os du point de vue macroscopique, microscopique et chimique.

Anatomie macroscopique

Structure d'un os long typique

À quelques exceptions près, tous les os longs possèdent la même structure (figure 6.3).

Diaphyse La **diaphyse** (*dia* = à travers; *physis* = nature, formation), ou corps osseux, est de forme tubulaire et constitue l'axe longitudinal de l'os. Elle consiste en un **cylindre** d'os compact relativement épais qui renferme un **canal médullaire** central. Chez les adultes, ce canal contient la moelle jaune, principalement composée de lipides, et est aussi appelé **cavité médullaire**.

Épiphyes Les **épiphyes** sont les extrémités de l'os (*epi* = sur). Elles sont souvent plus épaisses que la diaphyse. L'extérieur des épiphyses est formé d'une fine couche d'os compact; l'intérieur est constitué d'os spongieux. La partie osseuse de l'épiphyse par laquelle les os s'articulent est couverte d'une mince couche de **cartilage articulaire** (hyalin) qui agit comme un coussin sur l'extrémité de l'os et amortit la pression lors des mouvements de l'articulation. À la jonction de la diaphyse et de chaque épiphyse d'un os long adulte se trouve la **ligne épiphysaire**. Cette ligne représente le reliquat du cartilage épiphysaire, une zone discoïde composée de cartilage hyalin où s'effectue la croissance des os pendant l'enfance (p. 174).

Membranes Les surfaces interne et externe de l'os sont chacune associées à des membranes. La surface externe de la diaphyse est recouverte et protégée par une membrane double, d'un blanc brillant, le **périoste** (*peri* = autour; *osteon* = os). La **couche fibreuse** externe du périoste est composée de tissu conjonctif dense irrégulier; la **couche ostéogénique** interne repose sur la surface osseuse; elle comporte surtout des **ostéoblastes** (cellules productrices de matière osseuse) et des **ostéoclastes** (cellules qui détruisent la matière osseuse).

Le périoste est riche en neurofibres et en vaisseaux lymphatiques et sanguins qui pénètrent l'os de la diaphyse par des **foramens nourriciers**, ou trous vasculaires. Il est fixé à l'os sous-jacent par des touffes de fibres collagènes nommées **fibres de Sharpey** (figure 6.3), qui

s'étendent de la couche fibreuse jusqu'à l'intérieur de la matrice osseuse. Le périoste constitue également une zone de points d'insertion ou d'ancrage des tendons et des ligaments; les fibres de Sharpey sont extrêmement denses en ces points.

Les surfaces internes de l'os sont garnies d'une fine membrane de tissu conjonctif nommée **endoste** (*endon* = en dedans). L'endoste (figure 6.3) recouvre les travées de l'os spongieux dans les cavités médullaires, et il tapisse les canaux qui traversent l'os compact. Tout

comme le périoste, l'endoste contient à la fois des ostéoblastes et des ostéoclastes.

Structure des os courts, irréguliers et plats

Les os courts, irréguliers et plats présentent 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 leurs travées), mais aucun canal médullaire.

La figure 6.4 représente un os plat typique du crâne. Dans les os plats, la couche interne d'os spongieux située entre les deux couches d'os compact est appelée **diploé**; le tout ressemble à un sandwich rigide.

Disposition du tissu hématopoïétique dans les os

On nomme **cavités à moelle rouge** les cavités de l'os spongieux des os longs ainsi que le diploé des os plats, cavités où se trouve en général le tissu hématopoïétique, ou **moelle rouge**. Chez les nouveau-nés, la moelle rouge

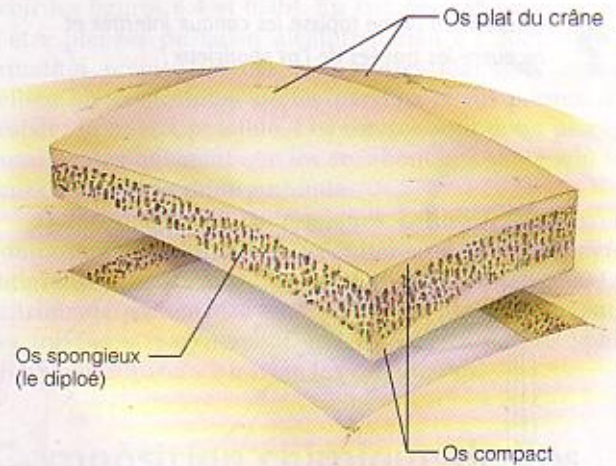


FIGURE 6.4

Structure d'un os plat. Les os plats, comme la plupart des os du crâne, comportent une épaisseur d'os spongieux (le diploé), intercalée entre deux fines couches d'os compact.

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 qui empiète largement sur l'épiphyse, et il subsiste peu de moelle rouge dans les cavités de l'os spongieux. C'est pourquoi, parmi les os longs des adultes, seules les têtes du fémur et de l'humérus (l'os long du bras) produisent des globules sanguins. La moelle rouge située dans le diploé des os plats (comme le sternum) et dans certains os irréguliers (comme le bassin) revêt une bien plus grande importance et présente une plus forte activité hématopoïétique. C'est habituellement à ces endroits que l'on prélève des échantillons de moelle rouge (par ponction de la moelle osseuse) pour diagnostiquer une maladie du tissu hématopoïétique comme la leucémie. La moelle jaune du canal médullaire peut du reste se convertir en moelle rouge en cas d'anémie grave, lorsque l'organisme a besoin d'accroître sa production de globules rouges.

Structure microscopique de l'os

Os compact

À l'œil nu, l'os compact paraît très dense, mais le microscope permet de distinguer une multitude de canaux et de passages contenant des neurofibres, des vaisseaux sanguins et des vaisseaux lymphatiques (figure 6.5). L'unité structurale de l'os compact est appelée **ostéon**, ou **système de Havers**. Chaque ostéon a la forme d'un cylindre allongé et se trouve parallèle à l'axe longitudinal de l'os. Du point de vue fonctionnel, on peut se représenter l'ostéon comme un minuscule pilier qui supporte une masse. Comme on peut le voir à la figure 6.6, l'ostéon est constitué d'un ensemble de cylindres creux (6 à 15 par ostéon) composés de matrice osseuse et placés les uns dans les autres comme les anneaux de croissance d'un tronc d'arbre.



Pour réviser, il est beaucoup plus efficace et amusant de dessiner et de colorier

que de fixer une page! Prenez quelques crayons et coloriez les documents en noir et blanc distribués pendant le cours. Vous pouvez aussi faire vos propres croquis ou calquer des images du manuel pour les colorier. Nul besoin d'être un grand artiste; le but est de porter toute votre attention sur la matière que vous étudiez.

Wendy Storkamp,
étudiante en médecine



Quelle membrane tapisse les canaux internes et recouvre les travées de l'os spongieux ?

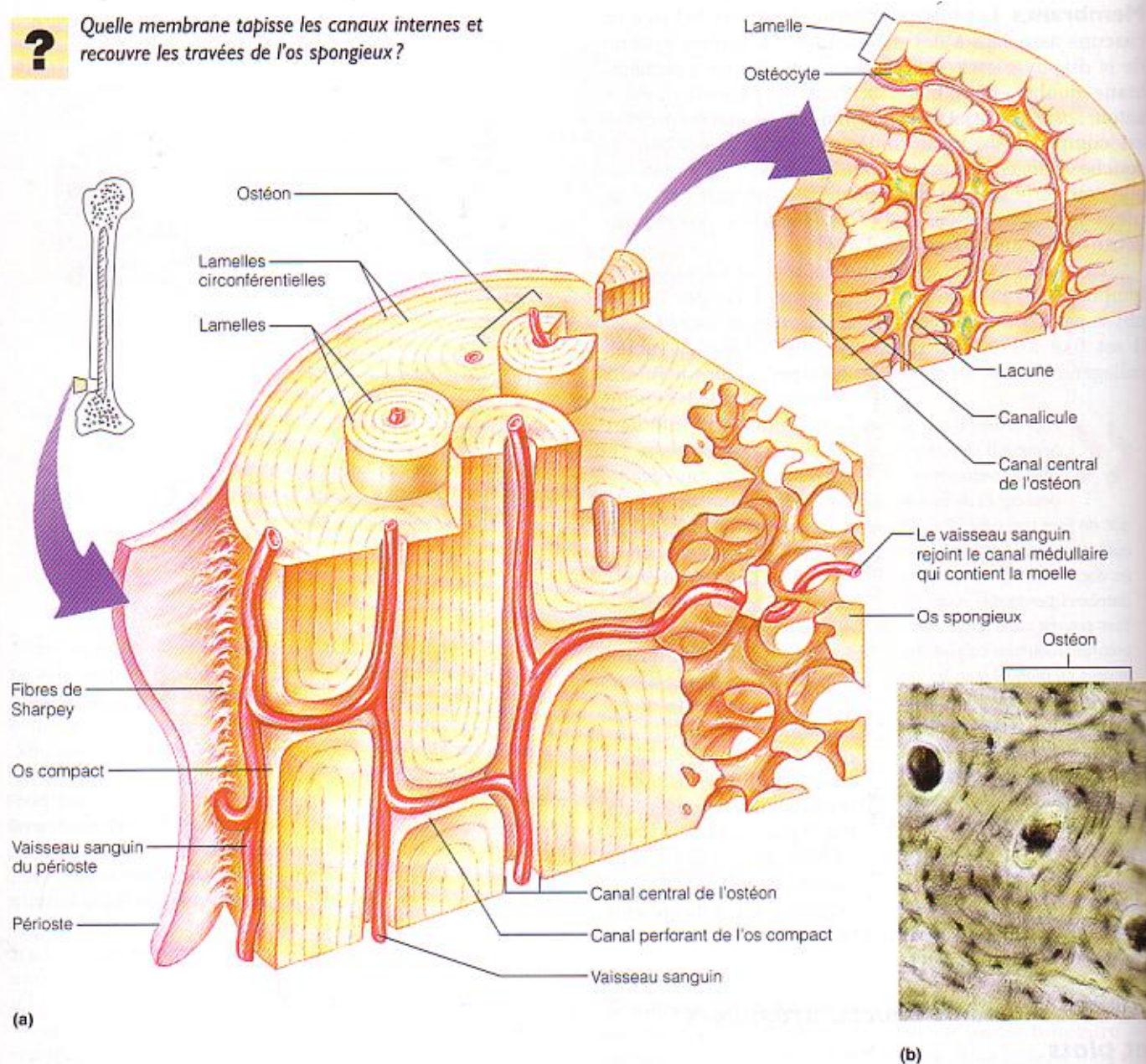


FIGURE 6.5

Structure microscopique de l'os compact.

(a) Schéma en trois dimensions de l'os compact, montrant ses

unités structurales (ostéons). En médaillon, une partie d'un ostéon à plus fort grossissement. Remarquez la situation des ostéocytes dans les lacunes osseuses

(petites cavités de la matrice).

(b) Photomicrographie d'un os présentant un ostéon complet et des parties d'ostéons voisins (144 ×).

Chacun de ces cylindres de matrice est une **lamelle de l'ostéon**, et l'os compact est souvent appelé **os lamellaire**. Bien que les fibres collagènes d'une lamelle donnée soient toutes parallèles, les fibres de deux lamelles adjacentes sont toujours orientées dans des directions différentes. Cette alternance a pour effet de renforcer les lamelles adjacentes et d'offrir une résistance remarquable aux forces de torsion que subissent les os.

Le centre de chaque ostéon forme un **canal central de l'ostéon**, ou **canal de Havers**, où passent de petits vaisseaux sanguins et des neurofibres qui desservent les cellules de

l'ostéon. Des canaux d'un autre type sont orientés perpendiculairement à l'axe de l'ostéon ; ce sont les **canaux perforants de l'os compact**, ou **canaux de Volkmann**, qui permettent les connexions nerveuses et vasculaires entre le périoste, les canaux centraux de l'ostéon et le canal médullaire (voir la figure 6.5a). Comme toutes les cavités internes de l'os, ces deux types de canaux sont tapissés d'endoste.

Les **ostéocytes** sont des cellules osseuses mûres en forme d'araignée ; elles se trouvent dans de petits espaces vides, appelés **lacunes**, situés à la jonction des lamelles. Des canaux très fins, les **canalicules**, relient les lacunes entre elles et avec le canal central de l'ostéon. La formation de ces canalicules présente un certain intérêt. Au cours

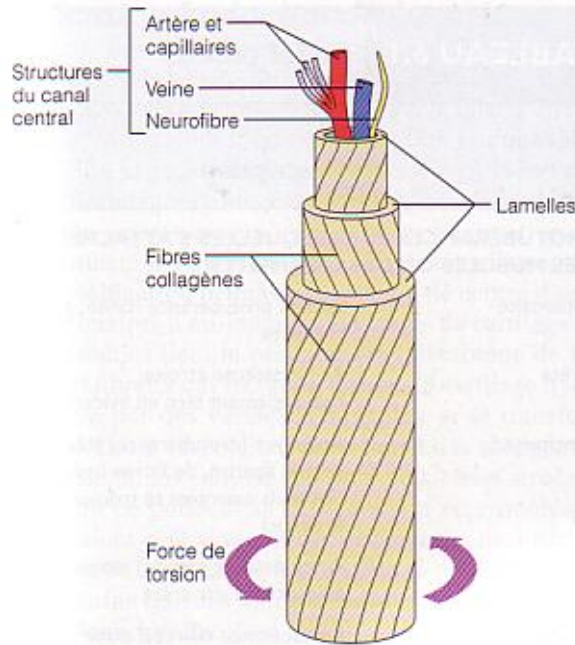


FIGURE 6.6

Schéma d'un ostéon. Dans cette illustration, l'ostéon a été dessiné comme s'il avait été étiré de façon télescopique pour en montrer toutes les lamelles. Les lignes obliques figurant sur chaque lamelle représentent l'orientation des fibres collagènes à l'intérieur de la matrice osseuse.

de la formation de l'os, les ostéoblastes qui sécrètent la matrice osseuse restent en contact les uns avec les autres, grâce à des sortes de tentacules contenant des jonctions ouvertes. Puis, lorsque les cellules mûres se trouvent emprisonnées dans la matrice durcie, il se forme tout un réseau de minuscules canaux (les canalicules) remplis de liquide interstitiel et contenant les excroissances des ostéocytes. Ces canalicules relient entre eux tous les ostéocytes d'un ostéon et permettent ainsi aux nutriments et aux déchets de passer facilement d'un ostéocyte à l'autre. C'est donc grâce à cette fonction de relais assumée par les canalicules et les lacunes que les ostéocytes sont bien « alimentés », même si la matrice osseuse est dure et imperméable aux nutriments. Les ostéocytes ont pour rôle d'entretenir la matrice osseuse. S'ils meurent, la matrice environnante est résorbée.

Entre les ostéons entiers se trouvent des lamelles incomplètes nommées **lamelles interstitielles**. Ces lamelles occupent les intervalles entre les ostéons en formation ; elles peuvent également représenter des fragments d'ostéons qui ont été coupés par le remaniement osseux (dont nous parlerons plus loin). Par ailleurs, des **lamelles circonférentielles** situées juste au-dessous du périoste entourent l'os. Ces lamelles offrent une résistance efficace aux forces de torsion qui s'exercent sur l'ensemble de l'os long.

Os spongieux

Contrairement à l'os compact, l'os spongieux, qui est constitué de travées, semble être un tissu peu structuré

(voir les figures 6.4 et 6.3b). En fait, les travées sont loin d'être placées de façon aléatoire. Bien au contraire, la situation précise de ces minuscules éléments osseux reflète les contraintes subies par l'os et lui permet d'y résister le mieux possible. Les travées sont donc placées aussi stratégiquement que les arcs-boutants soutenant les murs d'une cathédrale gothique.

D'une épaisseur de quelques cellules, les travées comportent des lamelles irrégulières et des ostéocytes interreliés par des canalicules. Il n'y a pas d'ostéons. Les nutriments partent des espaces médullaires situés entre les travées et parviennent aux ostéocytes de l'os spongieux par diffusion à travers les canalicules.

Composition chimique de l'os

L'os contient à la fois des constituants organiques et des constituants inorganiques. Les **constituants organiques** sont les cellules (ostéoblastes, ostéocytes et ostéoclastes) et le **matériau ostéoïde**, qui est la partie organique de la matrice. Le matériau ostéoïde représente environ un tiers de la matrice ; il comprend des protéoglycanes, des glycoprotéines et des fibres collagènes, qui sont tous des substances organiques sécrétées par les ostéoblastes. Ce sont ces substances, le collagène en particulier, qui déterminent la structure de l'os et lui confèrent sa flexibilité ainsi que sa très grande résistance à la pression, à la tension et à la torsion.

Les **constituants inorganiques** de la matrice osseuse (65 % de sa masse) sont des **hydroxyapatites**, ou **sels minéraux**, composés en grande partie de phosphates de calcium. Les sels de calcium se présentent sous la forme de minuscules cristaux situés à l'intérieur et autour des fibres collagènes de la matrice extracellulaire. Leur présence explique la caractéristique la plus évidente de l'os, c'est-à-dire sa dureté exceptionnelle qui lui permet de résister à la compression. Par ailleurs, c'est la combinaison adéquate d'éléments organiques et inorganiques dans la matrice qui permet à l'os d'être extrêmement durable et résistant sans devenir cassant. Étonnamment, lorsqu'on le compare à l'acier, l'os sain est moitié moins résistant à la pression, mais il résiste tout aussi bien à la tension.

C'est grâce aux sels minéraux que les os subsistent longtemps après la mort, représentant ainsi une sorte de relique durable. Après de nombreux siècles, des restes de squelettes nous ont permis d'apprendre la forme, la taille, la race et le sexe de représentants de peuples anciens, de savoir quelle sorte de travaux ils effectuaient et de quels types de maladies ils souffraient (l'arthrite par exemple).

Relief osseux

Les surfaces externes des os sont rarement lisses et uniformes : on peut y observer des bosses, des dépressions et des trous, qui constituent des points d'attache de muscles, de ligaments et de tendons, des points d'articulation ou encore des passages de vaisseaux sanguins et de nerfs. Ces éléments du **relief osseux** portent différents noms. Les protubérances qui dépassent de la surface osseuse sont les têtes, trochanters, épines, etc., et chacune d'elles possède des fonctions et des caractéristiques qui lui sont propres. Les dépressions et les ouvertures incluent les fossettes,

les sinus, les foramens et les gouttières. Le tableau 6.1 présente une description des principaux éléments du relief osseux. Il vous sera utile d'apprendre ces termes parce que vous les reverrez en tant que repères pour l'identification de certains os, décrits au chapitre 7 et étudiés en travaux pratiques.

DÉVELOPPEMENT DES OS (OSTÉOGENÈSE)

L'ostéogenèse et l'ossification sont des termes synonymes qui désignent le processus de formation des os (*osteon* = os; *genesis* = génération). Chez l'embryon, ce processus mène à la formation du squelette osseux. La croissance osseuse, une autre forme d'ossification, se poursuit jusqu'à l'âge adulte, tant que le sujet continue de grandir. En fait, les os sont en mesure de croître en épaisseur tout au long de la vie d'un individu (ce qui explique les transformations reliées à l'acromégalie; voir le chapitre 17). Cependant, chez l'adulte, l'ossification sert surtout au remaniement et à la consolidation des os.

Formation du squelette osseux

Jusqu'à la sixième semaine de gestation, le squelette de l'embryon humain est entièrement composé de membranes fibreuses et de cartilage hyalin. Puis le tissu osseux commence à se former et finit par remplacer la plus grande partie des structures fibreuses ou cartilagineuses. L'ossification intramembraneuse désigne le processus de formation d'un os à partir d'une membrane fibreuse; l'os ainsi constitué est appelé **os intramembraneux**. Si l'ossification se produit à partir du cartilage hyalin, on parle d'ossification endochondrale (*endon* = en dedans; *khondros* = cartilage) et l'os qui en résulte est nommé **os endochondral** (ou **os cartilagineux**).

Ossification intramembraneuse

La plupart des os du crâne ainsi que les clavicules se forment par **ossification intramembraneuse**. Remarquez bien que tous les os ainsi produits sont plats. Les membranes de tissu conjonctif fibreux composées de *cellules mésenchymateuses* constituent une première structure sur laquelle l'ossification peut débiter, aux environs de la huitième semaine de gestation. Le processus passe essentiellement par les stades suivants, qui sont décrits plus en détail à la figure 6.7. Le résultat final est un os plat, comme nous l'avons déjà vu à la figure 6.4 (p. 169).

1. Formation d'un **point d'ossification** dans la membrane fibreuse
2. Formation d'une matrice osseuse à l'intérieur de la membrane fibreuse
3. Formation de l'os fibreux et du périoste
4. Formation des plaques d'os compact et de la moelle rouge

TABEAU 6.1 Relief osseux

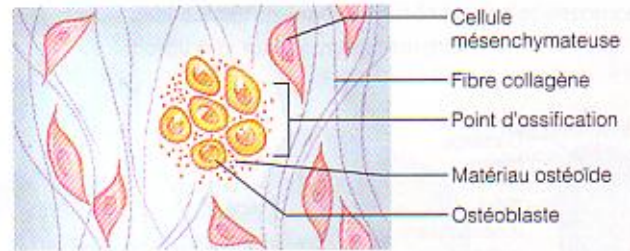
Élément du relief	Description
PROTUBÉRANCES SUR LESQUELLES S'ATTACHENT DES MUSCLES OU DES LIGAMENTS	
Tubérosité	Grosse protubérance ronde; parfois rugueuse
Crête	Arête osseuse étroite; habituellement bien en évidence
Trochanter	Apophyse (protubérance) très grosse, épaisse, de forme irrégulière (les seuls exemples se trouvent sur le fémur)
Ligne	Arête osseuse étroite; moins en évidence qu'une crête
Tubercule	Protubérance ou relief arrondi et de petite taille
Épicondyle	Partie renflée sur un condyle ou au-dessus
Épine	Relief fin, étroit, souvent pointu
PROTUBÉRANCES QUI PARTICIPENT À LA FORMATION DES ARTICULATIONS	
Tête	Renflement osseux porté sur un col étroit
Facette	Surface articulaire lisse, presque plate
Condyle	Protubérance articulaire arrondie
Branche	Bras formé par un os
DÉPRESSIONS ET OUVERTURES SERVANT DE PASSAGE AUX VAISSEAUX SANGUINS ET AUX NERFS	
Méat	Passage en forme de canal
Sinus	Espace creux à l'intérieur d'un os; plein d'air et tapissé d'une muqueuse
Fossette	Dépression peu profonde et concave d'un os, servant souvent de surface articulaire
Gouttière	Sillon profond
Scissure	Ouverture étroite en forme de fente
Foramen	Ouverture arrondie ou ovale dans un os
Sillon	Dépression linéaire

Ossification endochondrale

La majorité des os du squelette se forment par **ossification endochondrale**. À la fin du deuxième mois de développement, ce processus débute à partir de modèles d'« os » en cartilage hyalin déjà formés. Il est plus complexe que l'ossification intramembraneuse parce que le cartilage hyalin doit être désintégré au fur et à mesure de l'ossification. Nous utiliserons comme exemple un os long en formation.

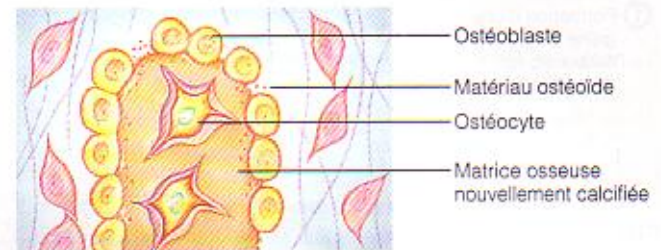
La formation d'un os long s'amorce habituellement à un **point d'ossification primaire** (auss appelé centre d'ossification primaire), à mi-longueur de la tige de cartilage hyalin. En premier lieu, le périchondre (membrane de tissu conjonctif fibreux qui recouvre l'« os » de cartilage hyalin) est pénétré par des vaisseaux sanguins et se transforme ainsi en périoste vascularisé. Sous l'effet des changements en nutriments, les cellules mésenchymateuses situées en dessous de ce périoste se différencient en ostéoblastes. Tout est alors prêt pour le déclenchement de l'ossification, illustrée à la figure 6.8 et décrite ci-dessous.

1. **Une gaine osseuse se forme autour de la diaphyse de cartilage hyalin.** Les ostéoblastes du périoste qui viennent de se former sécrètent le matériau ostéoïde de la matrice osseuse sur la face externe de la diaphyse de cartilage hyalin, l'enfermant ainsi dans une sorte de cylindre appelé gaine osseuse, ou virole périchondrale.
2. **Le cartilage au centre de la diaphyse se calcifie.** Pendant que la gaine osseuse se constitue sur la surface externe, les chondrocytes situés à l'intérieur s'hypertrophient et déclenchent la calcification de la matrice cartilagineuse qui les entoure. Comme la matrice de cartilage calcifié est imperméable à la diffusion des nutriments, les chondrocytes meurent et la matrice qu'ils entretenaient commence à se désintégrer. Bien que ce phénomène fasse apparaître des cavités et affaiblisse le cartilage hyalin, l'extérieur de la tige se trouve renforcé par la gaine osseuse. Partout ailleurs, le cartilage demeure sain et continue à croître intensément, causant ainsi l'allongement de tout le modèle de cartilage.
3. **Le bourgeon conjonctivo-vasculaire envahit les cavités internes et l'os spongieux se forme.** Au troisième mois de développement, les cavités en cours de formation sont envahies par un **bourgeon conjonctivo-vasculaire** qui va être à l'origine du point d'ossification primaire. Ce bourgeon contient une artère et une veine nourricières, des vaisseaux lymphatiques, des neurofibres, des éléments de moelle rouge, des ostéoblastes et des ostéoclastes. Les ostéoblastes nouvellement arrivés sécrètent la matrice ostéoïde autour des derniers fragments de cartilage hyalin, formant ainsi des travées de cartilage recouvertes d'os : c'est la première forme d'os spongieux dans un os long en cours de développement.
4. **Le canal médullaire se forme.** Pendant que le point d'ossification primaire s'agrandit et s'étend du côté



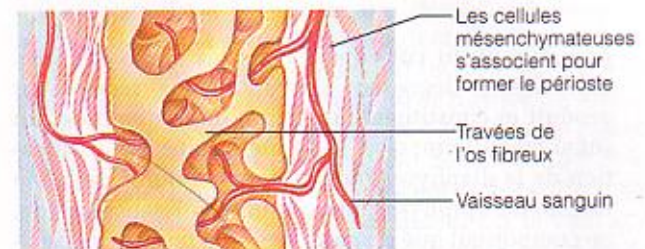
- ① **Un point d'ossification apparaît à l'intérieur de la membrane de tissu conjonctif fibreux.**

- Certaines cellules mésenchymateuses situées au centre s'amalgament puis se différencient en ostéoblastes pour former un point d'ossification.



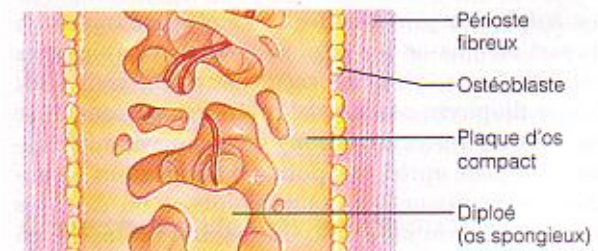
- ② **Une matrice osseuse est sécrétée dans la membrane.**

- Les ostéoblastes commencent à sécréter le matériau ostéoïde ; au bout de quelques jours, celui-ci est minéralisé.
- Les ostéoblastes enfermés deviennent des ostéocytes.



- ③ **L'os fibreux et le périoste se forment.**

- Les dépôts de matériau ostéoïde forment un réseau (plutôt que des lamelles) de travées (os fibreux) qui emprisonne les vaisseaux sanguins.
- Les cellules du mésenchyme vascularisé s'associent à la surface externe de l'os fibreux et se différencient en périoste.



- ④ **La gaine osseuse de l'os compact se forme.**

- Les travées situées sous le périoste s'épaississent et forment une gaine osseuse d'os fibreux qui sera plus tard remplacée par de l'os compact lamellaire définitif.
- L'os spongieux (diploé) reste présent à l'intérieur ; son tissu vasculaire se différencie en moelle rouge.

FIGURE 6.7

Stades de l'ossification intramembraneuse. Les schémas 3 et 4 représentent un grossissement moins fort que les deux premiers schémas.

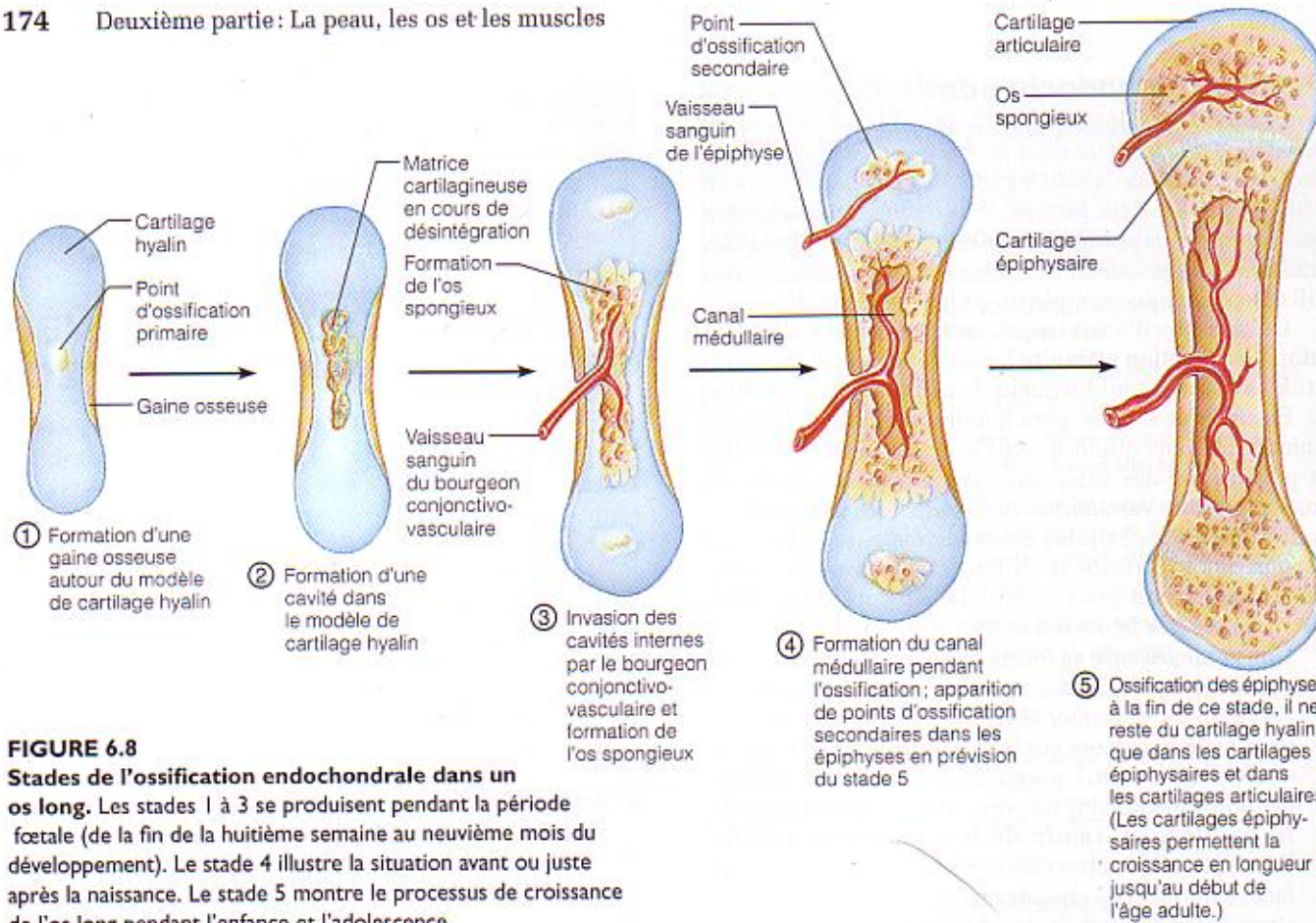


FIGURE 6.8

Stades de l'ossification endochondrale dans un os long. Les stades 1 à 3 se produisent pendant la période fœtale (de la fin de la huitième semaine au neuvième mois du développement). Le stade 4 illustre la situation avant ou juste après la naissance. Le stade 5 montre le processus de croissance de l'os long pendant l'enfance et l'adolescence.

proximal et du côté distal (vers les épiphyses), les ostéoclastes dégradent l'os spongieux récemment produit et constituent, au centre de la diaphyse, un canal médullaire; c'est la dernière étape de l'ossification de la diaphyse. Pendant toute la durée de la vie fœtale, les épiphyses, qui ont une croissance rapide, ne comportent que du cartilage, et le modèle de cartilage hyalin continue de s'allonger par division des cellules cartilagineuses viables des épiphyses. Puisque le cartilage se calcifie, se désintègre et est remplacé par des spicules osseux sur les surfaces de l'épiphyse faisant face au canal médullaire, l'ossification repousse en quelque sorte la formation de cartilage vers les extrémités de la diaphyse.

5. **Les épiphyses sont ossifiées.** À notre naissance, la plupart de nos os longs possèdent deux épiphyses cartilagineuses, un canal médullaire croissant ainsi qu'une diaphyse osseuse à l'intérieur de laquelle se trouvent des restes d'os spongieux. Peu avant la naissance ou juste après, des **points d'ossification secondaires** apparaissent dans une épiphyse ou dans les deux, et du tissu osseux s'y forme. Le cartilage situé au centre des épiphyses se calcifie et se désintègre, ouvrant ainsi des cavités qui permettent l'entrée d'un bourgeon conjonctivo-vasculaire. Puis les ostéoblastes nouvellement arrivés sécrètent une matrice osseuse autour des derniers fragments du cartilage. (On ne trouve qu'un point d'ossification primaire dans les os courts, tandis que la plupart des os irréguliers se développent à partir de plusieurs points d'ossification distincts.)

L'ossification des épiphyses suit presque exactement les étapes de l'ossification diaphysaire, à ceci près qu'il ne se forme pas de gaine osseuse sur leur face externe et que l'os spongieux reste en place; il n'apparaît pas de canal médullaire dans les épiphyses. À la fin de cette ossification, on ne trouve du cartilage hyalin qu'à deux endroits : (1) sur les surfaces de l'épiphyse, où il porte le nom de **cartilage articulaire**, et (2) à la jonction de la diaphyse et de l'épiphyse, où il est appelé **cartilage épiphysaire**, cartilage de conjugaison.

Croissance des os après la naissance

Au cours de l'enfance et de l'adolescence, les os longs s'allongent uniquement sous l'effet de la croissance interstitielle des cartilages épiphysaires, et tous les os s'épaississent sous l'effet de l'activité du périoste selon le processus de croissance par apposition. La plupart des os cessent de croître pendant l'adolescence ou au début de l'âge adulte. Cependant, certains os de la face comme ceux du nez et de la mâchoire continuent leur croissance d'une manière imperceptible pendant toute la vie.

Croissance en longueur des os longs

Le processus de croissance en longueur des os s'articule autour de plusieurs événements qui se produisent au cours de l'ossification endochondrale. La structure du cartilage épiphysaire qui s'appuie sur la diaphyse est telle qu'elle permet une croissance rapide et efficace (figure 6.9). Les chondrocytes forment de grandes colonnes, comme

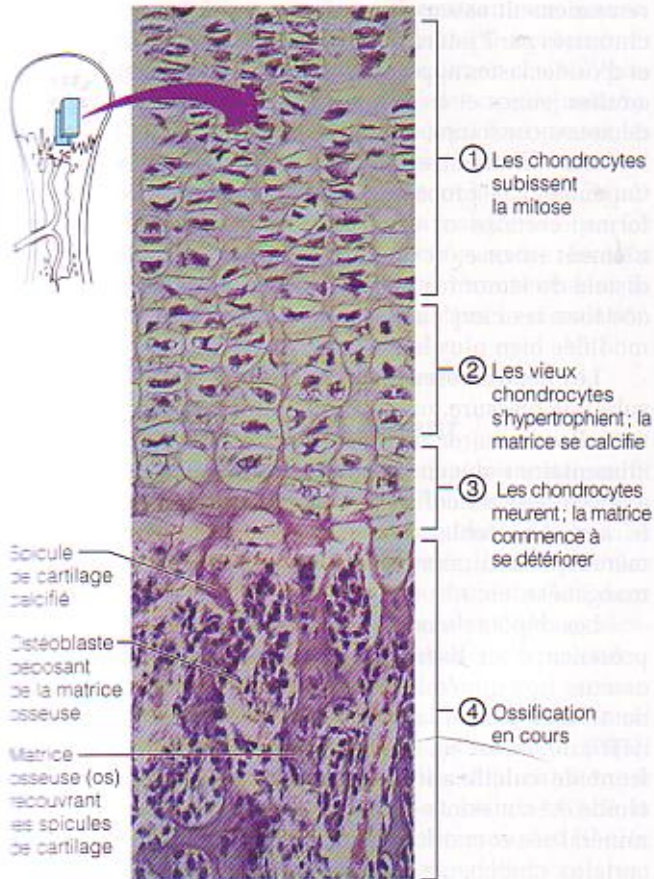


FIGURE 6.9

Croissance en longueur d'un os long. La région du cartilage épiphysaire la plus proche de l'épiphyse (face distale) comprend des chondrocytes au repos. Comme le montre cette photomicrographie (250 X), les cellules du cartilage épiphysaire, situées du côté proximal du cartilage au repos, sont disposées en quatre couches qui diffèrent par leurs fonctions. (1) Empilements de chondrocytes en mitose. (2) Chondrocytes subissant une hypertrophie suivie de calcification de la matrice. (3) Région occupée par des chondrocytes morts; la matrice commence à se désintégrer. (4) L'ossification est en cours sur la partie du cartilage épiphysaire qui fait face au canal médullaire: les ostéoblastes déposent la matrice osseuse autour des restes de cartilage, formant ainsi des travées osseuses.

empilement de pièces de monnaie. Les cellules placées au « sommet » (près de l'épiphyse) de la pile (zone 1) se divisent rapidement, éloignant ainsi l'épiphyse de la diaphyse et causant un allongement de l'os dans son ensemble (côté gauche de la figure 6.10). Dans le même temps, les chondrocytes plus âgés qui se trouvent plus près de la diaphyse (zone 2, figure 6.9) grossissent, et la matrice de cartilage qui les entoure se calcifie. Par la suite, ces chondrocytes meurent et leur matrice se désintègre (zone 3). Il reste à la jonction de l'épiphyse et de la diaphyse (zone 4) de longs spicules de cartilage calcifié comparables aux stalactites qui pendent du plafond d'une caverne. Ces spicules sont rapidement recouverts de matrice osseuse par les ostéoblastes, produisant ainsi de l'os spongieux qui finit par être digéré par les ostéoclastes. Le canal médullaire croît donc en longueur en même temps que l'os long.

La croissance en longueur s'accompagne d'un remaniement presque continu des extrémités épiphysaires, ce

? De quoi aurait l'air un os long à la fin de l'adolescence s'il n'avait pas subi de remaniement?

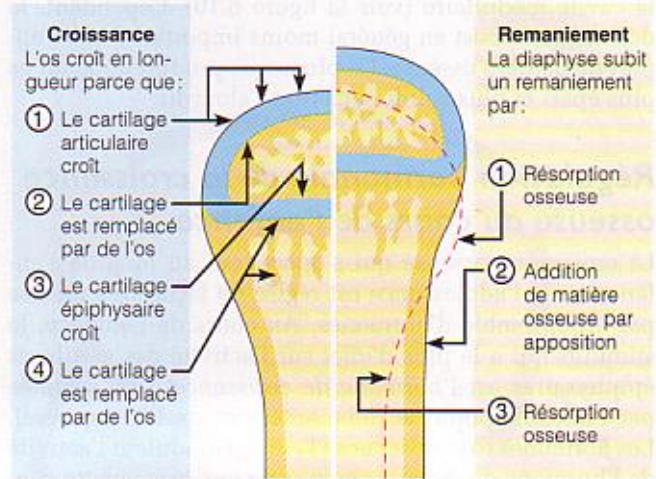


FIGURE 6.10

Croissance et remaniement d'un os long au cours de l'enfance. Les phénomènes indiqués à gauche constituent l'ossification endochondrale, qui se produit au niveau des cartilages articulaires et des cartilages épiphysaires pendant la croissance en longueur. Les phénomènes indiqués à droite sont ceux du remaniement osseux qui a lieu pendant la croissance de l'os long et qui lui permet de conserver ses proportions.

qui a pour effet de conserver des proportions adéquates entre la diaphyse et les épiphyses (côté droit de la figure 6.10). Le remaniement osseux, qui inclut à la fois la formation et la résorption (destruction) de matière osseuse, est décrit plus en détail aux pages 176-178, où nous traitons des modifications qui se produisent dans les os adultes.

Pendant l'enfance et l'adolescence, le cartilage épiphysaire conserve une même épaisseur car la vitesse de croissance du cartilage du côté de l'épiphyse est compensée par le remplacement du cartilage par du tissu osseux du côté de la diaphyse. Vers la fin de l'adolescence, les chondrocytes des cartilages épiphysaires se divisent de moins en moins souvent et les cartilages s'amincissent au point d'être entièrement remplacés par du tissu osseux. La croissance en longueur se termine avec la fusion de la matière osseuse de la diaphyse avec celle des épiphyses. Cette fusion, appelée *soudure des cartilages épiphysaires*, survient vers l'âge de 18 ans chez la femme et vers 21 ans chez l'homme. Cependant, le périoste peut faire croître les os en diamètre ou en épaisseur si l'activité musculaire ou le poids corporel engendrent de fortes contraintes.

Croissance des os en épaisseur ou en diamètre

Les os en croissance doivent épaissir à mesure qu'ils allongent. Comme les cartilages, les os gagnent en épaisseur ou, dans le cas des os longs, en diamètre, par le processus de croissance par apposition. Les ostéoblastes qui se

La diaphyse aurait conservé sa longueur initiale et les deux extrémités (épiphyses) seraient très allongées et dilatées.

trouvent sous le périoste sécrètent une matrice osseuse sur la surface externe de l'os tandis que les ostéoclastes situés sur l'endoste de la diaphyse détruisent l'os avoisinant la cavité médullaire (voir la figure 6.10). Cependant, la désintégration est en général moins importante que l'apport de matière osseuse. Ce processus produit donc un os plus épais et plus solide sans trop l'alourdir.

Régulation hormonale de la croissance osseuse au cours de l'enfance

La croissance osseuse qui s'opère tout au long de l'enfance et de l'adolescence est réglée de façon très précise par un ensemble d'hormones. Au cours de l'enfance, le stimulus qui a le plus d'effet sur l'activité des cartilages épiphysaires est l'hormone de croissance (GH) sécrétée par l'adénohypophyse (lobe antérieur de l'hypophyse). Les hormones thyroïdiennes (T_3 et T_4) modulent l'activité de l'hormone de croissance de sorte que le squelette conserve des proportions convenables pendant sa croissance. À la puberté, une quantité accrue d'hormones sexuelles mâles et femelles (testostérone et œstrogènes) se trouve libérée. Ces hormones sexuelles provoquent dans un premier temps la poussée de croissance typique de l'adolescence, de même que la masculinisation ou la féminisation de certaines parties du squelette. Puis elles entraînent la soudure des cartilages épiphysaires, mettant ainsi fin à la croissance en longueur des os.

Tout excès ou insuffisance d'une de ces hormones peut causer des déformations évidentes du squelette. Par exemple, une hypersécrétion de l'hormone de croissance chez l'enfant peut provoquer une taille anormale (gigantisme), tandis qu'une insuffisance de l'hormone de croissance ou des hormones thyroïdiennes entraîne des types particuliers de nanisme. Le chapitre 17 traite plus en détail des effets de la régulation hormonale de la croissance.

HOMÉOSTASIE OSSEUSE: REMANIEMENT ET CONSOLIDATION

Les os semblent être les organes les plus inertes de tout l'organisme, et nous font souvent penser à la mort. Mais comme vous venez de l'apprendre, les apparences sont trompeuses. Le tissu osseux est très actif et dynamique. D'importantes quantités de matière osseuse sont déplacées, l'architecture de l'os est modifiée de façon continue. Chaque semaine, nous recyclons de 5 à 7 % de notre masse osseuse, et il peut entrer ou sortir d'un squelette adulte jusqu'à 500 mg de calcium par jour! Lorsqu'il survient une fracture (qui est le trouble de l'homéostasie osseuse le plus répandu), l'os passe par un remarquable processus d'autoguérison que nous allons décrire plus loin.

Remaniement osseux

Chez l'adulte, le dépôt et la résorption (retrait) de matière osseuse se produisent à un moment ou à un autre sur toutes les surfaces couvertes de périoste ou d'endoste. C'est l'ensemble des deux processus qui constitue le

remaniement osseux; ces processus sont couplés et synchronisés par l'intermédiaire de « paquets » d'ostéoblastes et d'ostéoclastes appelés **unités de remaniement**. Chez les adultes jeunes et en bonne santé, la masse osseuse totale demeure constante, ce qui indique que dans l'ensemble les taux de dépôt et de résorption osseuse sont égaux. Cependant, le processus de remaniement n'est pas uniforme: certains os ou parties d'os subissent un remaniement intense, et d'autres non. Par exemple, la partie distale du fémur (os de la cuisse) est entièrement remplacée tous les cinq ou six mois, alors que la diaphyse est modifiée bien plus lentement.

Les **dépôts osseux** se produisent à l'endroit où l'os a subi une blessure, ou encore là où il doit être plus résistant. Pour assurer un dépôt optimal, il faut un régime alimentaire riche en protéines, en vitamine C (nécessaire à la synthèse du collagène), en vitamine A (qui influe sur le rapport ostéoblastes/ostéoclastes) et en vitamine B_{12} de même qu'en minéraux (calcium, phosphore, magnésium, manganèse, etc.).

Les dépôts de nouvelle matrice se reconnaissent à la présence d'un **liséré ostéoïde**, une bande de matrice osseuse non minéralisée semblable à de la gaze mesurant de 10 à 12 μm de largeur. Entre le liséré ostéoïde et l'os déjà minéralisé, on remarque une bordure nette appelée **front de calcification**. Comme la largeur du liséré ostéoïde est constante et que la transition entre matrice non minéralisée et matrice minéralisée se fait de façon brutale, certains chercheurs ont émis l'hypothèse que le dépôt ostéoïde doit être mûr avant de pouvoir être calcifié. Cette maturation est soumise à l'influence des ostéoblastes qui sécrètent le matériau ostéoïde et semble résulter de plusieurs modifications biochimiques qui se déroulent sur une période de 10 à 12 jours. La nature exacte du facteur qui déclenche la calcification est l'objet de controverses. On peut dire cependant que le produit des concentrations locales d'ions calcium et phosphate ($\text{Ca}^{2+} \times \text{P}_i$) constitue l'un des facteurs critiques de la précipitation de sels de calcium. Lorsque ce produit atteint une certaine valeur, de minuscules cristaux d'hydroxyapatite se forment spontanément. Ces **noyaux de cristallisation** croissent rapidement, puis servent à catalyser la cristallisation d'autres sels de calcium à cet endroit. D'autres facteurs jouent probablement un certain rôle dans la calcification, entre autres des protéines matricielles qui se lient au calcium et le concentrent, ainsi qu'une bonne réserve d'une enzyme appelée **phosphatase alcaline**. La présence de cette enzyme est indispensable à la minéralisation. Dans les ostéoblastes (ainsi que dans les chondroblastes) des os en croissance rapide, on remarque des **vésicules de calcification**, minuscules protubérances des membranes plasmiques contenant de la phosphatase alcaline, qui finissent par se détacher de la cellule pour rejoindre la matrice. Lorsque les conditions appropriées sont réunies, le dépôt des sels de calcium s'accomplit d'un seul coup et avec une grande précision dans l'ensemble de la matrice « mûre »; les cristaux de sels de calcium s'agglutinent de telle manière que le risque de craquement est moindre lorsque l'os subit une contrainte.

Ce sont de grosses cellules multinucléées, les ostéoclastes, qui assurent la **résorption osseuse**; on pense que ces cellules sont issues de **cellules hématopoïétiques immatures**

(peut-être les mêmes qui se différencient en macrophagocytes). Les ostéoclastes sécrètent (1) les *enzymes lysosomiales* et peut-être d'autres enzymes cataboliques qui digèrent la matrice osseuse et (2) des *acides métaboliques* (carbonique, lactique et autres) qui font passer les sels de calcium sous une forme soluble. Par ailleurs, il est possible que les ostéoclastes phagocytent la matrice déminéralisée. Pendant la dégradation de la matrice osseuse, les sels minéraux se dissolvent sous l'effet des acides; les ions calcium et phosphate ainsi libérés se retrouvent dans le liquide interstitiel et passent ensuite dans la circulation sanguine.

Régulation du remaniement

Le remaniement à grande échelle qui s'opère constamment dans notre squelette est soumis à l'influence de deux boucles de régulation qui servent « deux maîtres » à la fois. La première est un processus de régulation hormonale par rétro-inhibition qui maintient l'homéostasie du Ca^{2+} dans le sang. La seconde dépend des réactions aux forces mécaniques et gravitationnelles qui agissent sur le squelette.

Régulation hormonale Le mécanisme hormonal résulte de l'interaction entre la **parathormone (PTH)** sécrétée par les glandes parathyroïdes et la **calcitonine** issue des cellules parafolliculaires (ou cellules C) de la glande thyroïde (figure 6.11). La parathormone est libérée en cas de diminution de la concentration d'ions calcium dans le sang. Elle stimule l'activité des ostéoclastes et la résorption osseuse, avec pour conséquence la libération de calcium dans le sang. Les ostéoclastes ne tiennent pas compte de l'âge de la matrice. Lorsqu'ils sont activés, ils dégradent à la fois de la matrice ancienne et de la matrice récente. Seul le matériau ostéoïde, qui ne contient pas de sels de calcium, échappe à la digestion. Quand la concentration de calcium sanguin augmente, le stimulus à l'origine de la libération de PTH prend fin.

Dans le cas d'une augmentation de la concentration du calcium sanguin, il y a sécrétion de calcitonine: cette hormone inhibe la résorption osseuse par les ostéoclastes et provoque un dépôt de sels de calcium dans la matrice osseuse, ce qui fait baisser la concentration de calcium dans le sang. Lorsque la concentration de calcium sanguin est réduite, la libération de calcitonine se trouve ralentie.

La régulation hormonale tend à conserver l'équilibre homéostatique en maintenant la concentration du calcium sanguin, plutôt qu'à préserver un squelette résistant ou en bon état. En effet, si la concentration de calcium sanguin reste trop basse pendant une longue période, les os peuvent se déminéraliser au point de laisser paraître de grands espaces vides. Les os fonctionnent donc comme un réservoir d'où l'organisme tire le calcium ionique dont il a besoin.

Les ions calcium (Ca^{2+}) sont nécessaires à un nombre étonnant de processus physiologiques, entre autres la transmission de l'influx nerveux, la contraction musculaire, la coagulation sanguine, la sécrétion par les cellules des glandes et par les neurones ainsi que la division cellulaire. Le corps humain contient de 1200 à 1400 g de calcium, dont plus de 99 % se trouvent sous forme minéralisée dans les os. La plus grande partie du reste se trouve à l'intérieur des cellules de l'organisme. Le sang ne contient



Quel est le résultat de la rétro-inhibition produite par la calcitonine ?

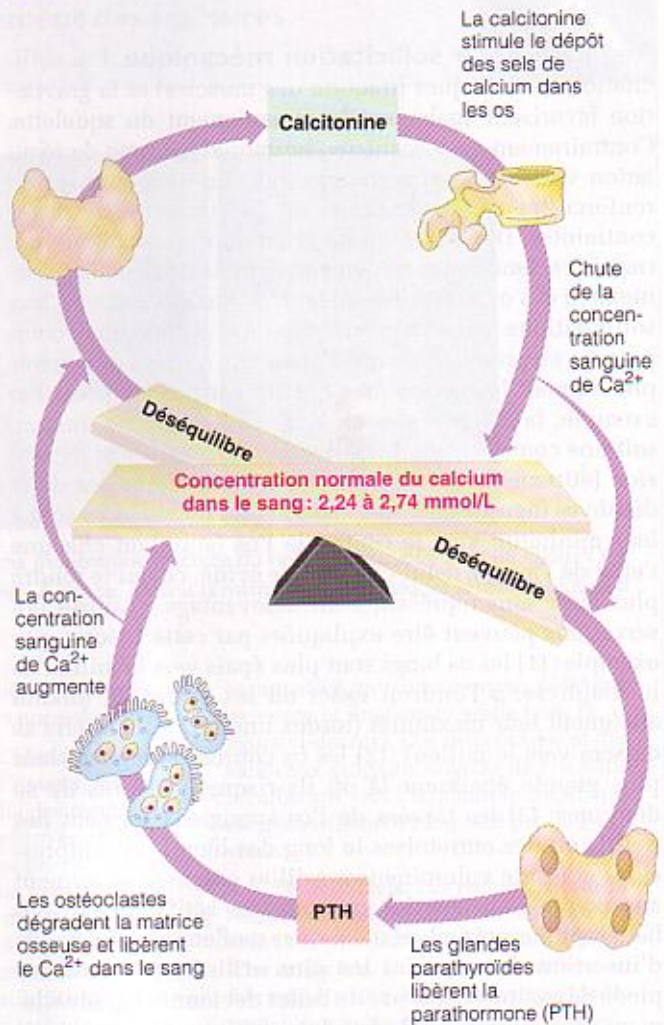


FIGURE 6.11

Régulation hormonale de la concentration d'ions calcium dans le sang. La parathormone (PTH) et la calcitonine ont des effets antagonistes sur la régulation de la calcémie.

que 1,5 g de calcium, et la boucle de régulation hormonale maintient normalement la concentration de calcium ionique sanguin dans un intervalle très étroit situé entre 2,24 et 2,74 mmol/L. Le calcium est absorbé à partir de l'intestin sous l'effet des métabolites de la vitamine D. L'apport de calcium quotidien recommandé est de 400 à 800 mg de la naissance jusqu'à l'âge de 10 ans, et de 1200 à 1500 mg de 11 à 24 ans.



De minuscules déviations de l'équilibre homéostatique du calcium sanguin peuvent entraîner des troubles neuromusculaires graves allant de l'hyperexcitabilité à l'arrêt fonctionnel. D'autre part, une *hypercalcémie* (forte concentration de calcium sanguin) prolongée peut avoir pour conséquence un dépôt indésirable de sels de calcium dans les vaisseaux sanguins, les

Des sels de calcium se déposent dans les os et la concentration sanguine de calcium diminue.

reins et les autres organes mous, ce qui peut entraver leur physiologie normale. (Il en sera plus longuement question à propos de l'hyperparathyroïdie; voir le chapitre 17.) ■

Régulation par sollicitation mécanique Les sollicitations mécaniques (traction des muscles) et la gravitation favorisent également le remaniement du squelette. Contrairement au mécanisme hormonal, ce type de régulation vise les besoins du squelette lui-même, puisqu'il renforce les os aux endroits où ils subissent de fortes contraintes. D'après la *loi de Wolff*, qui est reconnue par certains scientifiques seulement, la croissance ou le remaniement des os se produisent en réaction aux forces et aux sollicitations qui s'exercent sur eux. Il faut bien comprendre en premier lieu que l'anatomie d'un os reflète très précisément les contraintes qui lui sont appliquées. Par exemple, la majorité des os longs subissent une torsion, soit une combinaison de forces de *compression* et de *tension* (étirement) qui agissent sur les côtés opposés de la diaphyse (figure 6.12). Mais comme les deux forces sont à leur minimum vers le centre de l'os (annulant chacune l'effet de l'autre), celui-ci peut être évidé, ce qui le rendra plus léger sans représenter un désavantage. D'autres observations peuvent être expliquées par cette théorie, par exemple: (1) les os longs sont plus épais vers le milieu de la diaphyse, à l'endroit exact où les forces de torsion atteignent leur maximum (tordez une brindille et elle se cassera vers le milieu); (2) les os courbes atteignent leur plus grande épaisseur là où ils risquent le plus de se déformer; (3) les travées de l'os spongieux forment des treillis ou des entretoises le long des lignes de compression; et (4) de volumineuses saillies osseuses se forment aux points d'attache des gros muscles actifs. (Les os des haltérophiles présentent d'énormes renflements aux points d'insertion des muscles les plus utilisés, et les os des pieds des jeunes danseurs de ballet deviennent graduellement plus massifs car le fait de se tenir constamment sur la pointe des pieds exerce une pression intense.) La loi de Wolff explique aussi l'absence de relief des os du fœtus et l'atrophie des os des personnes immobilisées au lit, puisque dans ces cas les os ne subissent aucune contrainte.

Comment les forces mécaniques agissent-elles sur les cellules chargées du remaniement osseux? On sait que si l'on déforme un os, il se produira un courant électrique. Puisque les régions comprimées et étirées ont des charges opposées, on croit que ce sont des signaux électriques qui régissent le processus de remaniement. L'encadré de la page 179 présente une discussion de ce principe et quelques-uns des dispositifs auxquels on a recours actuellement pour accélérer la guérison des os et la consolidation des fractures. En fin de compte, les mécanismes de réponse des os aux stimulus mécaniques ne sont pas encore connus avec certitude. On a pu observer par contre que, à la suite d'une utilisation intense, les os (ou parties d'os) s'alourdissent, et qu'ils s'affaiblissent s'ils ne travaillent pas.

Le squelette subit en permanence l'effet des hormones et des forces mécaniques. Au risque d'échafauder des hypothèses hardies, on peut supposer d'une part que la boucle de régulation hormonale est le principal facteur qui détermine si un changement de concentration donné du calcium sanguin doit entraîner un remaniement, et à quel moment, tandis que l'endroit où ce remaniement

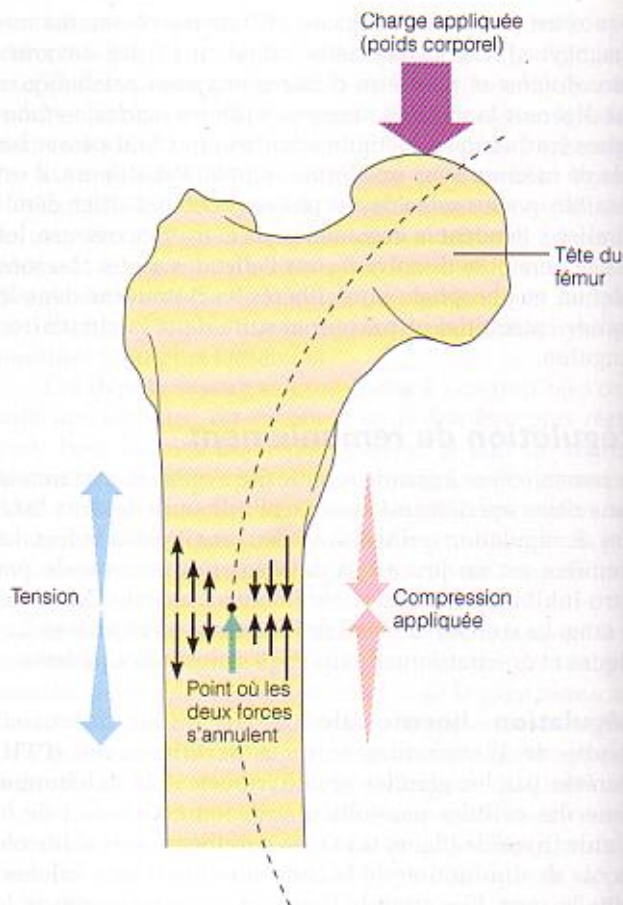


FIGURE 6.12

Effet d'une contrainte sur l'anatomie de l'os. Puisque la charge placée sur la plupart des os est décentrée, les os sont contraints de plier. Dans notre exemple, représentant un fémur, on constate que le poids corporel transmis à la tête du fémur risque de faire fléchir cet os le long de l'arc illustré en pointillé. Cette flexion comprime l'os d'un côté (flèches convergentes) et l'étire de l'autre, ce qui provoque une tension (flèches divergentes). Ces deux forces s'annulent en un point, au centre, de sorte que l'intérieur de l'os a besoin de moins de matière osseuse que sa face externe.

doit se produire dépend des forces mécaniques et gravitationnelles. Par exemple, si la matière osseuse doit être désintégrée pour faire augmenter la concentration de calcium sanguin, il y aura libération de PTH, qui agira sur les ostéoclastes. Cependant, ce sont les forces mécaniques qui déterminent *quels* ostéoclastes seront les plus sensibles à la stimulation de la parathormone; ainsi, c'est la matière osseuse des zones où il y a le moins de contraintes (et dont on peut se passer provisoirement) qui sera dégradée.

Consolidation des fractures

En dépit de leur résistance remarquable, les os peuvent être **fracturés**, ou cassés, à n'importe quel moment de la vie. Au cours de l'enfance, la plupart des fractures sont dues à un traumatisme exceptionnel lors duquel l'os a été tordu ou fracassé (par exemple, accidents de sport ou d'automobile et chutes). Chez les personnes âgées, les os

GROS PLAN

Ces os remarquables : progrès cliniques dans le traitement des fractures



Bien que les os possèdent le remarquable pouvoir de se régénérer eux-mêmes, il est des circonstances dans lesquelles leurs efforts les plus acharnés restent vains. Des fractures importantes subies dans les accidents de la route, une mauvaise circulation sanguine dans des os âgés et certaines anomalies congénitales en constituent d'excellents exemples. Cependant, les progrès récents de la médecine apportent à la profession médicale la réponse à certains problèmes que les os ne peuvent résoudre seuls. Regardons ces solutions de plus près.



La radiographie de gauche montre une fracture du radius consolidée avec un implant de corail (région plus blanche). À droite, on voit la même fracture quelques semaines plus tard.

1. **La stimulation électrique des sites de fracture** a fortement contribué à accélérer la guérison et à améliorer le pronostic dans les cas de grosses fractures ou de fractures qui guérissent très lentement. Depuis plusieurs années on sait que le tissu osseux se dépose dans les régions de charge négative et est résorbé dans les zones chargées positivement, mais on ignorait jusqu'à une date récente comment l'électricité pouvait favoriser la guérison. On pense actuellement que les champs électriques empêchent la parathormone (PTH) de stimuler les ostéoclastes qui résorbent l'os au site de la fracture, ce qui accélère l'accumulation de tissu osseux.

2. **Traitement par ultrasons.** Les ultrasons, utilisés dans une des techniques d'imagerie décrites au chapitre 1, accélèrent également la consolidation des os humains. Un traitement quotidien réduit le temps de guérison des os des bras et des tibias fracturés de 25 à 35 %.

3. **La greffe vasculaire libre de la fibula** consiste à remplacer un os manquant ou très endommagé par des morceaux de fibula (ou péroné, l'os fin de la jambe qui ressemble à une tige). La fibula n'est pas un os essentiel, car il ne porte pas le poids du corps chez l'être humain ; il joue un rôle dans la stabilisation de la cheville. Autrefois, les grosses greffes osseuses se soldaient en général par un échec parce que l'intérieur du greffon ne recevait pas un apport sanguin suffisant, ce qui menait finalement à l'amputation. Grâce à cette nouvelle technique, on peut transplanter des vaisseaux sanguins normaux en même temps que de l'os ; cette technique a déjà permis de reconstituer le radius (os de l'avant-bras) chez un enfant qui en était dépourvu à la naissance, et de remplacer des os longs détruits par l'ostéomalacie ou dans un accident. Le remaniement

osseux qui s'ensuit produit une réplique presque parfaite de l'os normal.

4. **Substituts osseux.** Manquant désespérément de substituts osseux, les chirurgiens utilisaient jadis des matériaux synthétiques ou des os broyés prélevés sur des cadavres. Les os broyés induisent la formation de nouvelle matière osseuse ; on mélange la poudre d'os à de l'eau pour obtenir une pâte à laquelle on peut donner la forme voulue ou qu'on peut faire entrer dans des endroits exigus et difficiles d'accès. Cette technique évite de recourir au processus long et souvent douloureux de la transplantation ou de la greffe osseuse. Il en va de même pour la plupart des substituts osseux synthétiques, quoique les deux approches aient leurs inconvénients. Les os prélevés sur des cadavres présentent un risque faible, mais réel, de transmission du virus de l'hépatite ou du VIH. De plus, le système immunitaire peut rejeter ces tissus étrangers. Quant aux substituts synthétiques, ils provoquent parfois une inflammation qui nuit à la guérison et favorise l'infection.

On effectue actuellement des essais cliniques sur un substitut osseux particulièrement prometteur, appelé **implant de corail**, qui pourrait éviter les deux complications décrites précédemment. Lorsque le corail est chauffé, ses cellules vivantes meurent et sa structure minérale (carbonate de calcium) est convertie en hydroxyapatite, le sel présent dans les os humains. Le fragile implant de corail est ensuite moulé dans la forme voulue, enduit de protéines d'origine naturelle qui stimulent la croissance des

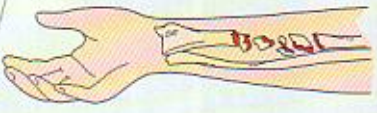
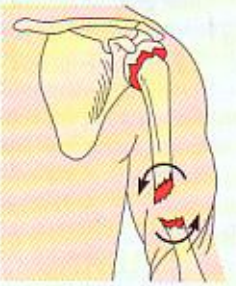
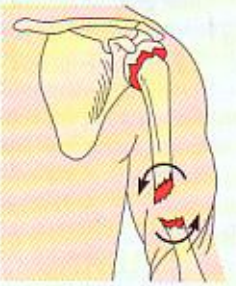
os, appelées *protéines morphogénétiques osseuses*, et finalement greffé (voir la figure ci-dessus). Des ostéoblastes et des vaisseaux sanguins migrent de l'os naturel adjacent vers l'implant de corail, qui est graduellement remplacé par de l'os vivant.

5. **Os artificiels.** Les recherches sur le remplacement des os ont mené également à la production de certains types d'**os artificiels**. L'un par exemple est fabriqué à partir d'une céramique biodégradable appelée phosphate tricalcique. Cette substance est assez malléable pour qu'on puisse lui donner la forme voulue, mais elle n'est pas très solide. On l'a surtout utilisée dans le remplacement d'os non porteurs tels que ceux du crâne.

Contrairement aux substituts osseux que nous venons de décrire, le Norian SRS, un nouvel implant fait de phosphate de calcium, procure un soutien structural immédiat aux os fracturés ou ostéoporotiques et permet aux patients de reprendre plus rapidement une vie normale. Préparé au moment de la chirurgie, le ciment est injecté dans les régions où les os sont endommagés et forme un « plâtre interne » entièrement biocompatible. La pâte durcit en quelques minutes et le produit final offre plus de résistance à la compression que l'os spongieux. La structure cristalline du Norian SRS étant de même type que celle de l'os naturel, il est graduellement envahi par des ostéoblastes qui y déposent de la matrice osseuse. Dans la plupart des cas, l'implant est complètement dégradé et remplacé par de l'os naturel en moins de deux ans.

TABLEAU 6.2

Types de fractures les plus courants

Type de fracture	Illustration	Description	Commentaires
Fermée		L'os présente une cassure nette, mais ne pénètre pas la peau	La majorité des fractures sont de ce type
Ouverte		Les bouts d'os cassés percent les tissus mous et la peau	Plus grave qu'une fracture fermée; il peut s'ensuivre une grave infection de l'os (ostéomyélite) qui nécessite des doses massives d'antibiotiques
Plurifragmentaire		Os brisé en de nombreux fragments	Courante chez les personnes âgées en particulier, dont les os sont plus cassants
Fracture par tassement		Os écrasé	Courante dans les os poreux (ostéoporotiques)
Enfoncement localisé		La partie fracturée de l'os est poussée vers l'intérieur	Exemple typique de fracture du crâne
Engrenée		Les extrémités de l'os fracturé sont poussées l'une vers l'autre	Se produit souvent lorsqu'on tente d'amortir une chute avec les bras tendus; fracture courante de la hanche
En spirale		Cassure irrégulière, se produit lorsqu'une trop grande force tend à faire tourner l'os sur lui-même	Fracture courante chez les sportifs
En bois vert		Os fracturé de façon incomplète, à la façon d'une brindille de bois vert	Courante chez les enfants dont les os possèdent relativement plus de matrice organique et sont plus flexibles que ceux des adultes

s'amincissent et perdent de leur solidité, et les fractures sont de plus en plus fréquentes. Les types de fractures les plus courants sont décrits au tableau 6.2.

On traite une fracture par *réduction*, qui consiste à réaligner les parties fracturées. Dans la **réduction à peau fermée**, on replace les deux extrémités de l'os dans leur position normale de façon manuelle. Lors d'une **réduction chirurgicale**, on relie les deux extrémités fracturées au moyen de tiges ou de fils métalliques. Après réduction, l'os est immobilisé dans un plâtre ou par traction pour permettre le début de la consolidation. Les fractures simples sont consolidées au bout de 8 à 12 semaines, mais la consolidation peut requérir beaucoup plus de temps dans

le cas de gros os porteurs ou chez les personnes âgées (parce que leur circulation se fait moins bien).

La consolidation d'une fracture simple passe par quatre phases principales qui sont illustrées à la figure 6.13 et que nous allons décrire ci-dessous.

1. **Formation d'un hématome.** Lors d'une fracture, les vaisseaux sanguins présents à l'intérieur de l'os et du périoste, et peut-être aussi dans les tissus voisins, se rompent, ce qui provoque une hémorragie. Il s'ensuit la formation d'un **hématome** (masse de sang coagulé) à l'endroit de la fracture. Peu après, les cellules osseuses qui ne sont plus alimentées commencent à

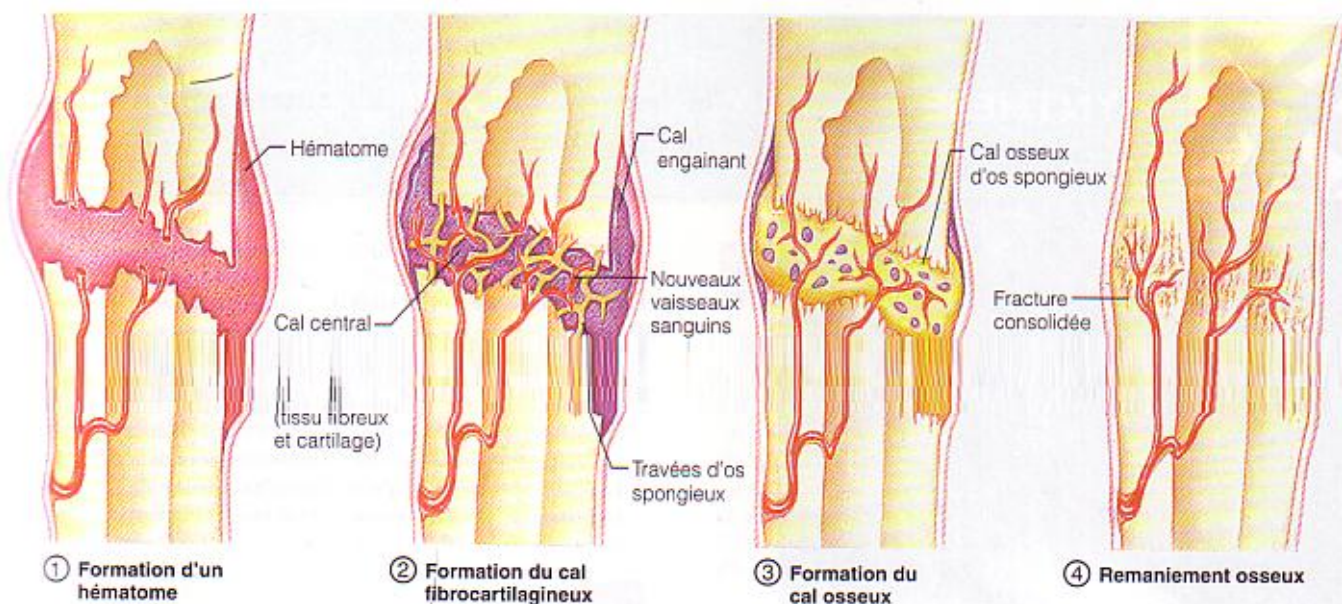


FIGURE 6.13
Phases de la consolidation d'une fracture.

mourir et le tissu du site de la fracture enflé, devient douloureux et présente une inflammation évidente.

2. **Formation du cal fibrocartilagineux.** L'étape suivante est la formation d'un *tissu de granulation* mou. Plusieurs phénomènes contribuent à la formation du tissu de granulation : des capillaires s'infiltrent dans l'hématome, des macrophagocytes envahissent la région et se mettent à évacuer les débris. Pendant ce temps, des fibroblastes et des ostéoblastes du périoste et de l'endoste voisins migrent vers le site de la fracture, puis amorcent la reconstruction de l'os. Les fibroblastes produisent des fibres collagènes qui s'étendent d'un bord à l'autre de la cassure, reliant ainsi les deux bouts de l'os fracturé ; certains fibroblastes se différencient en chondroblastes qui sécrètent une matrice cartilagineuse. À l'intérieur de cette masse de tissu reconstitué, les ostéoblastes commencent à former de l'os spongieux, mais ceux qui sont les plus éloignés des capillaires nourriciers sécrètent une matrice de type cartilagineux qui fait saillie vers l'extérieur et qui finit par se calcifier. Cet ensemble de tissu reconstitué, qu'on appelle **cal fibrocartilagineux**, forme une éclisse pour l'os fracturé.
3. **Formation du cal osseux.** Les ostéoblastes et les ostéoclastes continuent de migrer vers l'intérieur et de se multiplier rapidement dans le cal fibrocartilagineux, qu'ils convertissent graduellement en un **cal osseux** constitué d'os spongieux. La formation du cal osseux commence vers la troisième ou la quatrième semaine et se poursuit jusqu'à ce que l'os soit fermement soudé, environ deux ou trois mois après l'accident.
4. **Remaniement osseux.** Dès le début de sa formation et pendant plusieurs mois par la suite, le cal osseux subit un remaniement. Les matériaux en excès à l'extérieur de la diaphyse et à l'intérieur du canal médullaire sont éliminés, et le corps de l'os est reconstruit par un dépôt d'os compact. Après le remaniement, on constate que la structure de la région remodelée est semblable à celle d'un os normal non fracturé car elle

DÉSÉQUILIBRES HOMÉOSTATIQUES DES OS



Les déséquilibres qui peuvent survenir entre l'ossification et la résorption osseuse sont à l'origine de presque toutes les maladies qui touchent le squelette adulte.

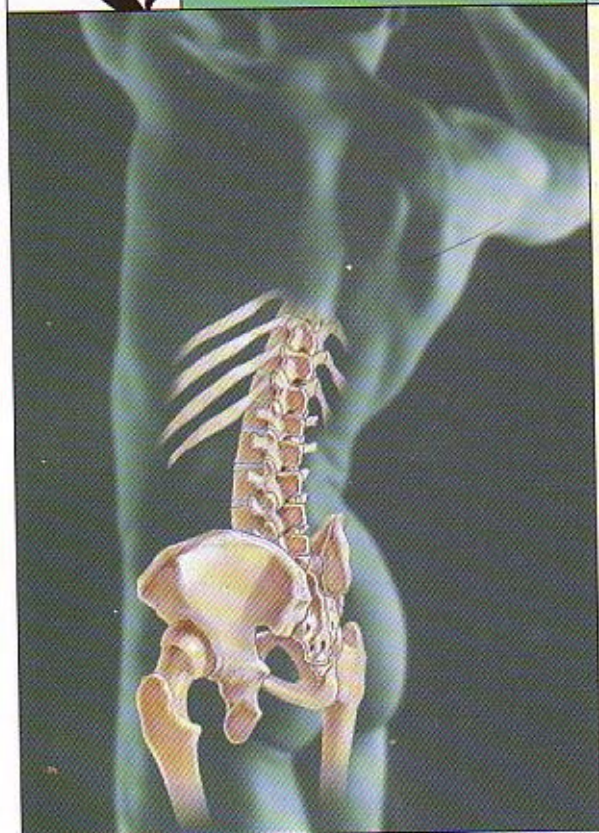
Ostéoporose

Pour la plupart d'entre nous, les « problèmes de vieux os » évoquent le stéréotype de la victime d'ostéoporose, une vieille femme recourbée avançant à grand-peine derrière son déambulateur. L'**ostéoporose** désigne un groupe de maladies dans lesquelles la résorption se fait plus rapidement que le dépôt de matière osseuse. La composition de la matrice reste normale, mais la masse osseuse se trouve réduite et les os deviennent plus poreux et plus légers. Bien que le processus de l'ostéoporose touche l'ensemble du squelette, l'os spongieux de la colonne vertébrale est le plus vulnérable, et les fractures par tassement des vertèbres sont courantes. La hanche est aussi de plus en plus exposée aux fractures (*fracture du col du fémur*) chez les personnes atteintes d'ostéoporose.

L'ostéoporose affecte le plus souvent les personnes âgées, en particulier les femmes après la ménopause, mais l'arrêt de la synthèse des hormones sexuelles peut provoquer ce trouble chez les deux sexes. Les œstrogènes et la testostérone contribuent au maintien de la densité des os en limitant l'activité des ostéoclastes et en favorisant le dépôt de nouvelle matière osseuse. Après la ménopause, la production d'œstrogènes diminue, et cette déficience joue un grand rôle chez la femme âgée. D'autres facteurs peuvent favoriser l'ostéoporose chez les personnes âgées : le manque d'exercice musculaire pour faire travailler les os, un régime pauvre en calcium et en protéines, une anomalie des récepteurs de la vitamine D, le tabagisme (qui réduit les taux d'œstrogènes) et des facteurs hormonaux (comme l'usage de corticostéroïdes, l'hyperthyroïdie et le diabète

SYNTHÈSE

Tous pour un, un pour tous: relations entre le système osseux et les autres systèmes de l'organisme

**Système tégumentaire**

- Le système osseux fournit un support aux organes du corps, y compris la peau.
- La peau fournit la vitamine D nécessaire à la bonne absorption et utilisation du calcium.

**Système musculaire**

- Le système osseux fournit des leviers ainsi que des ions calcium pour l'activité musculaire.
- La traction des muscles sur les os accroît leur solidité et leur viabilité; elle contribue à la détermination de la forme des os.

**Système nerveux**

- Le système osseux protège l'encéphale et la moelle épinière; il sert de réservoir aux ions calcium nécessaires au fonctionnement du système nerveux.
- Des nerfs innervent les os et les capsules articulaires et permettent ainsi la sensation de la douleur dans les articulations.

**Système endocrinien**

- Le système osseux fournit une certaine protection osseuse à quelques glandes (hypophyse, entre autres); il emmagasine le calcium nécessaire aux mécanismes des seconds messagers.
- Les hormones règlent l'accumulation du calcium dans les os et sa libération; elles favorisent la croissance et la maturation des os longs.

**Système cardiovasculaire**

- La moelle rouge des os est le siège de la formation des globules rouges, des globules blancs et des plaquettes sanguines; la matrice osseuse emmagasine le calcium nécessaire à l'activité du muscle cardiaque.
- Le système cardiovasculaire achemine les nutriments et l'oxygène aux cellules osseuses; il emporte leurs déchets.

**Système lymphatique et immunitaire**

- Le système osseux fournit une certaine protection aux organes lymphatiques; la moelle osseuse est le siège de la formation des leucocytes participant à la réponse immunitaire.
- Le système lymphatique draine les fluides du liquide interstitiel entourant les cellules osseuses; les cellules immunitaires protègent les différentes composantes du squelette contre les virus et les bactéries pathogènes.

**Système respiratoire**

- Le système osseux protège les poumons en les enfermant (cage thoracique).
- Le système respiratoire fournit de l'oxygène aux cellules osseuses; il évacue le gaz carbonique de ces cellules.

**Système digestif**

- Le système osseux fournit une certaine protection osseuse aux intestins, aux organes pelviens et au foie; il permet la mastication et la déglutition.
- Le système digestif fournit les nutriments nécessaires au maintien et à la croissance des os.

**Système urinaire**

- Le système osseux protège les organes pelviens (vessie, par exemple).
- Le système urinaire active la vitamine D; il évacue les déchets azotés des cellules osseuses.

**Système génital**

- Le système osseux fournit une certaine protection aux organes génitaux internes.
- Les gonades produisent des hormones qui influent sur la forme du squelette et l'ossification des cartilages épiphysaires.

Liens particuliers: relations entre le système osseux et les systèmes musculaire, endocrinien et tégumentaire



Notre squelette nous soutient, protège nos organes (la protection que le crâne procure à l'encéphale est primordiale), nous donne de la stature (étrangement, les personnes grandes inspirent plus le respect), détermine nos formes (les femmes sont différentes des hommes) et nous permet de bouger. Il est évident que le système osseux interagit avec de nombreux autres systèmes de l'organisme, particulièrement avec les systèmes endocrinien et tégumentaire. Cependant, c'est avec le système musculaire que ses liens sont les plus intimes et les plus bénéfiques. Nous commencerons donc par là.



Système musculaire

L'interdépendance des systèmes osseux et musculaire est frappante: quand l'un fonctionne bien, l'autre aussi. Si nous faisons régulièrement des exercices des articulations portantes (course, tennis, danse aérobique), nos muscles gagnent en efficacité et exercent une plus grande pression sur nos os. Par conséquent, nos os restent sains et forts et leur masse augmente afin d'assumer ces contraintes additionnelles.

Étant donné que l'os spongieux et l'os compact atteignent leur densité maximale vers le milieu de notre vie, il est important de pratiquer des exercices des articulations portantes lorsqu'on est jeune; cela est surtout vrai pour les femmes, qui ont une moins grande masse osseuse que les hommes et la perdent plus rapidement.

L'exercice régulier favorise également l'étirement des tissus conjonctifs qui lient les os aux muscles et à d'autres os, et il renforce les articulations. Par le fait même, la flexibilité globale augmente et les risques de blessures diminuent, ce qui nous permet de rester actifs jusqu'à un âge très avancé. (La douleur peut engendrer la paresse.)



Système endocrinien

Bien que certains facteurs mécaniques jouent indéniablement un rôle important dans la formation et le renforcement continu du squelette, les hormones, qu'elles agissent individuellement ou en groupe, régissent la croissance des os durant la jeunesse et augmentent (ou diminuent) la force des os chez les adultes. L'hormone de croissance est essentielle à la croissance normale du squelette et à son entretien tout au long de la vie, tandis que la thyroïde et les hormones sexuelles veillent à ce que le squelette prenne des proportions normales pendant l'enfance et l'adolescence. D'autre part, la parathormone et la calcitonine ne sont pas utiles au squelette, mais plutôt à l'homéostasie du calcium sanguin. Quel que soit l'aspect du système osseux que les hormones régissent, toute interférence avec leur fonctionnement normal devient vite apparente, puisqu'elle se manifeste par une anomalie osseuse ou des os mal proportionnés.



Système tégumentaire

Dans des conditions normales, le système osseux dépend entièrement du système tégumentaire (la peau), qui fournit le calcium nécessaire au maintien d'os durs et forts. La relation entre les deux systèmes est toutefois indirecte. Exposées aux rayons du soleil, les cellules de la peau fabriquent un précurseur de la vitamine D. Celui-ci entre dans la circulation sanguine qui le transporte au foie et aux reins où il devient actif, puis il se joint au complexe qui, au niveau de l'intestin, absorbe le calcium des aliments ingérés. Puisque le calcium remplit de nombreuses fonctions dans l'organisme (voir p. 177) et que le système osseux représente en quelque sorte une « banque de calcium », les os se ramollissent et s'affaiblissent en l'absence de vitamine D car aucun apport quotidien de calcium ne pénètre alors dans la circulation sanguine à partir du tube digestif.

IMPLICATIONS CLINIQUES

Système osseux

Étude de cas: Vous vous rappelez M^{me} Deschênes? Aux dernières nouvelles, elle s'apprêtait à subir d'autres examens. En ce qui concerne son système osseux, les observations suivantes sont notées dans son dossier:

- Fracture de la région supérieure du tibia droit; lacération de la peau; zone nettoyée; réduction chirurgicale des fragments osseux faisant saillie et application d'un plâtre
- Lésion de l'artère nourricière du tibia
- Ménisque interne (disque de cartilage fibreux) de l'articulation du genou droit broyé; articulation du genou enflammée et douloureuse

Relativement à ces observations:

1. De quel type de fracture M^{me} Deschênes souffre-t-elle?

2. Quels sont les problèmes à prévoir avec de telles fractures et comment les traite-t-on?
3. Qu'est-ce qu'une réduction chirurgicale? Pourquoi a-t-on posé un plâtre?
4. En supposant un rétablissement sans complications, combien de temps environ M^{me} Deschênes devra-t-elle patienter avant qu'un cal osseux solide se forme?
5. Quelles sont les complications prévisibles de la lésion de l'artère nourricière?
6. Quelles sont les nouvelles techniques qui permettent d'améliorer la consolidation des fractures lorsque la guérison est retardée ou compromise?
7. Quelles sont les probabilités que le cartilage du genou de M^{me} Deschênes se régénère? Pourquoi? Quelles mesures devra-t-on prendre pour remédier à ce problème?

(Réponses à l'appendice G)

n'importe quel âge à la suite d'une période d'immobilité. Le traitement consiste habituellement à ajouter du calcium et de la vitamine D au régime alimentaire et à faire plus d'exercices des articulations portantes. Cependant, dans bien des cas, l'*hormonothérapie substitutive* offre la meilleure protection contre les fractures des os ostéoporotiques. Malheureusement, ce traitement ne fait que ralentir la perte de matière osseuse et ne parvient pas à la compenser. Les personnes qui ne peuvent pas ou ne veulent pas prendre d'œstrogènes peuvent opter pour *Fosamax*, un médicament utilisé dans le traitement de la maladie osseuse de Paget (décrite ci-dessous) qui freine l'activité des ostéoclastes et peut éventuellement renverser le processus d'ostéoporose dans la colonne vertébrale.

Il est possible d'empêcher l'apparition de l'ostéoporose, ou tout au moins de la retarder. Il s'agit d'abord d'absorber une quantité suffisante de calcium pendant que la densité des os s'accroît encore (les os longs atteignent leur densité maximale entre 35 et 40 ans, ceux qui renferment relativement plus d'os spongieux, entre 25 et 30 ans). D'autre part, il est bon de prendre l'habitude de boire de l'eau fluorée, qui favorise le durcissement des os (et des dents). Enfin, une bonne dose d'exercice des articulations portantes (marche, course à pied, tennis, etc.) pendant le jeune âge et le reste de la vie provoque l'augmentation de la masse osseuse au-delà des valeurs normales et fournit de meilleures réserves pour faire face à la perte de matière osseuse à un âge plus avancé.

Ostéomalacie et rachitisme

L'**ostéomalacie** (*osteon* = os ; *malakia* = mollesse) englobe un certain nombre de perturbations qui se traduisent par une minéralisation insuffisante des os. Il y a production de matériau ostéoïde, mais comme les sels de calcium ne se déposent pas, les os deviennent mous et fragiles. Par conséquent, les os porteurs, en particulier ceux des jambes et du bassin, peuvent se fracturer, se tordre ou se déformer. Le principal symptôme de cette maladie est l'apparition d'une douleur lorsqu'un poids est placé sur ces os.

Bon nombre de ces symptômes et de ces signes (jambes tordues, bassin, crâne et cage thoracique déformés) se retrouvent également dans le **rachitisme**, qui est l'équivalent de l'ostéomalacie chez les enfants. Cependant, comme les os sont encore en croissance rapide, la maladie est bien plus grave. Les cartilages épiphysaires, qui ne peuvent se calcifier, continuent de croître et les extrémités des os longs grossissent nettement.

L'ostéomalacie et le rachitisme sont causés en général par un manque de calcium dans le régime alimentaire ou une déficience en vitamine D. Il suffit habituellement au patient de boire du lait enrichi de vitamine D et d'exposer sa peau aux rayons du soleil pour guérir ces affections.

Maladie osseuse de Paget

La **maladie osseuse de Paget**, souvent dépistée par hasard lors d'une radiographie prise pour un autre motif, se caractérise par une résorption osseuse exagérée (face interne de l'os) et une ossification anormale (face externe de l'os). L'os nouvellement formé, appelé *os pagétique*, se constitue rapidement et possède une masse anormalement élevée

d'os fibreux par rapport à celle de l'os compact. Ce phénomène, accompagné d'une réduction de la minéralisation osseuse, provoque un ramollissement des os par endroits. Dans les stades avancés de la maladie, l'activité des ostéoclastes diminue, mais les ostéoblastes poursuivent leur travail, faisant souvent apparaître sur l'os des renflements irréguliers ou remplissant le canal médullaire d'os pagétique.

La maladie osseuse de Paget peut affecter n'importe quelle partie du squelette, mais elle reste habituellement localisée. Un seul et même os peut être touché, pendant plusieurs années. La colonne vertébrale, le bassin, le fémur et le crâne sont le plus souvent atteints ; la déformation et la douleur qui l'accompagne sont progressives. Cette maladie survient rarement avant l'âge de 40 ans. On en ignore la cause, mais elle pourrait bien être d'origine virale. Les thérapies font appel à des médicaments comme l'etidronate, administré sur des périodes de 3 à 6 mois à la fois, la calcitonine (maintenant administrée par inhalation) et le tout nouveau Fosamax, qui prévient efficacement la désintégration des os. ■

DÉVELOPPEMENT ET VIEILLISSEMENT DES OS : CHRONOLOGIE

Les os suivent un programme précis entre le moment de leur formation et celui de leur mort. Chez l'embryon, le mésoderme produit les cellules mésenchymateuses ; celles-ci donnent naissance aux membranes fibreuses et aux cartilages qui forment le squelette de l'embryon. Puis ces structures s'ossifient selon une chronologie d'une étonnante précision qui permet de déterminer facilement l'âge d'un fœtus au moyen d'une radiographie ou d'un sonogramme. Bien que chaque os suive sa propre chronologie, l'ossification des os longs commence habituellement vers la huitième semaine, et à la douzième semaine, les points d'ossification primaire apparaissent (figure 6.14). Auparavant, les globules sanguins de l'embryon étaient formés dans son foie et sa rate. Mais dès le début de l'ossification, c'est la moelle rouge à l'intérieur des os en formation qui se charge de l'hématopoïèse.

À la naissance, la plupart des os longs du squelette sont bien ossifiés, à l'exception de leurs épiphyses. Après la naissance, les points d'ossification secondaire apparaissent dans les épiphyses, selon une séquence prévisible entre la première année et l'âge préscolaire. Les cartilages épiphysaires assurent la croissance des os longs pendant l'enfance (processus sous la régulation de l'hormone de croissance) et lors de la poussée de croissance provoquée par les hormones sexuelles à l'adolescence. À la naissance, tous les os sont relativement peu différenciés, mais au fur et à mesure que l'enfant se sert de ses muscles, le relief osseux se développe et devient de plus en plus évident. Vers l'âge de 25 ans, presque tous les os sont complètement ossifiés et la croissance du squelette s'arrête.

Chez les enfants et les adolescents, le taux de formation des os est supérieur au taux de résorption ; chez les jeunes adultes, ces deux processus sont en équilibre ; au cours de la vieillesse, la résorption prédomine. Même si les facteurs de l'environnement énumérés ci-dessus influent sur

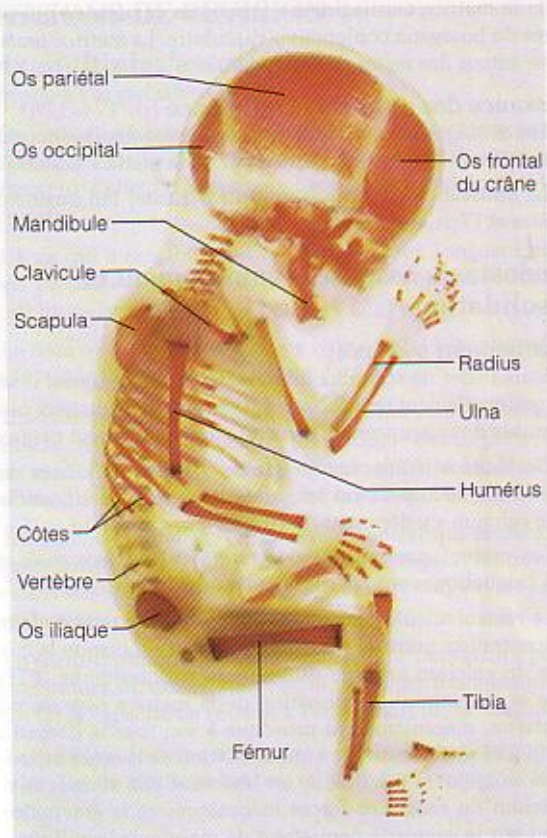


FIGURE 6.14

Les points d'ossification primaires dans le squelette de ce fœtus de 12 semaines correspondent aux régions plus foncées.

TERMES MÉDICAUX

Achondroplasie (*akhondros* = sans cartilage; *plassein* = former) Affection congénitale due à un défaut de croissance du cartilage et de l'os endochondral, se manifestant par des membres trop courts et une tête trop grosse; une forme de nanisme.

Bavure osseuse Projection osseuse anormale due à un excès de croissance de l'os; courante sur les os des sujets âgés.

Élongation Le fait de soumettre une région du corps à une tension constante pour maintenir l'alignement des parties d'un os fracturé et prévenir les spasmes des muscles squelettiques qui pourraient séparer les extrémités de l'os fracturé ou écraser la moelle épinière (dans le cas de fractures de la colonne vertébrale).

Fracture pathologique Fracture d'un os malade survenant lors d'un traumatisme léger (comme tousser ou se retourner brusquement) ou en l'absence de traumatisme.

Ostéite Inflammation du tissu osseux.

Ostéomyélite Inflammation de l'os provoquée par des bactéries pyogènes (productrices de pus) qui pénètrent dans l'organisme par une blessure (fracture ouverte par exemple), ou qui atteignent l'os au voisinage d'un site d'infection; affecte le plus souvent les os longs, provoquant une douleur aiguë et de la fièvre; peut entraîner une raideur des articulations, la destruction de la matière osseuse et le raccourcissement d'un membre; le traitement inclut le recours aux antibiotiques, le drainage des abcès (accumulations de pus) éventuels et l'extraction des fragments d'os mort (dont la présence empêche la guérison).

Sarcome ostéogène Cancer des os touchant essentiellement l'os long d'un membre, le plus souvent entre l'âge de 10 et 25 ans; de croissance fulgurante, il provoque une érosion douloureuse de

la densité des os, ce sont les facteurs génétiques qui déterminent dans une large mesure la densité osseuse chez un individu (ou la quantité relative de perte osseuse qu'il subira). Le gène qui code pour le point d'ancrage cellulaire de la vitamine D permet de déterminer à la fois la capacité d'accumulation de la masse osseuse dans les premières années de vie et les risques d'apparition de l'ostéoporose à un âge plus avancé. À partir de la quatrième décennie de vie, la masse d'os compact et spongieux commence à diminuer, sauf dans les os du crâne, semble-t-il. Chez les jeunes adultes, la masse osseuse des hommes dépasse généralement celle des femmes, et celle des Noirs est plus importante que celle des Blancs. Au cours du vieillissement, la perte de matière osseuse est plus rapide chez les Blancs que chez les Noirs (dont les os étaient déjà plus denses au départ), et chez les femmes que chez les hommes. Des modifications qualitatives surviennent également. Un nombre croissant d'ostéons n'achèvent plus leur formation et la minéralisation est moins complète. On remarque de plus en plus d'os non viable, ce qui reflète une diminution de l'irrigation sanguine au cours des années.

* * *

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les cartilages et les os, leur architecture, leur composition et leur dynamique. Nous avons aussi parlé de leur rôle dans le maintien de l'homéostasie globale de l'organisme (l'encadré intitulé *Synthèse* en présente un résumé). Nous allons pouvoir étudier dans le chapitre suivant la façon dont les os sont assemblés dans le squelette et la manière dont ils contribuent, individuellement et collectivement, à son fonctionnement.

l'os; les métastases migrent habituellement vers les poumons, où des tumeurs secondaires apparaissent; le traitement habituel consiste à amputer l'os ou le membre atteint puis à instaurer une chimiothérapie; le taux de survie est d'environ 50 % si la tumeur est découverte assez tôt.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE

Cartilages (p. 165)

Structure, types et localisation des cartilages (p. 165)

1. Le cartilage présente des chondrocytes logeant dans les lacunes (cavités) de la matrice extracellulaire (substance fondamentale et fibres). Sa haute teneur en eau lui confère son élasticité. Il est dépourvu de neurofibres, avasculaire et entouré d'un périchondre fibreux qui réprime son expansion.
2. Le cartilage hyalin ressemble à du verre givré; il ne possède que des fibres collagènes. Support à la fois flexible et élastique, il est le cartilage le plus répandu; on distingue le cartilage articulaire, le cartilage costal, le cartilage du larynx, les cartilages trachéal et bronchial et les cartilages du nez.
3. Le cartilage élastique est riche en fibres élastiques et donc plus flexible que le cartilage hyalin. Il soutient l'oreille externe et forme l'épiglotte, entre autres.
4. Le cartilage fibreux est le plus compressible des cartilages et il résiste à l'étirement. Il forme les disques intervertébraux et les coussins cartilagineux du genou (ménisques).

Croissance du cartilage (p. 165)

5. Les deux modes de croissance du cartilage sont la croissance interstitielle (de l'intérieur) et la croissance par apposition (addition de nouveau tissu cartilagineux en périphérie).

Fonctions des os (p. 165-167)

1. Les os protègent et soutiennent les organes du corps; ils servent de leviers aux muscles; ils emmagasinent du calcium et d'autres minéraux; ils sont le siège de la production des globules sanguins.

Classification des os (p. 167-168)

1. On distingue les os longs, courts, plats et irréguliers, suivant leur forme et leur proportion d'os compact et spongieux.

Structure des os (p. 168-172)**Anatomie macroscopique (p. 168-169)**

1. Un os long comprend une diaphyse et deux épiphyses. Le canal médullaire de la diaphyse contient de la moelle jaune; les épiphyses comportent de l'os spongieux. La ligne épiphysaire représente le reliquat du cartilage épiphysaire. La diaphyse est recouverte de périoste; le canal médullaire des os longs et les espaces médullaires de l'os spongieux sont tapissés d'endoste. Les surfaces articulaires sont recouvertes de cartilage hyalin.

2. Les os plats sont formés de deux fines couches d'os compact entre lesquelles se trouve le diploé (couche d'os spongieux). Les os courts et irréguliers présentent une structure semblable à celle des os plats.

3. Chez les adultes, le tissu hématopoïétique se trouve à l'intérieur du diploé des os plats et parfois dans les épiphyses des os longs. Chez les nouveau-nés, le canal médullaire contient aussi de la moelle rouge.

Structure microscopique de l'os (p. 169-171)

4. L'unité structurale de l'os compact se nomme ostéon; il s'agit d'un ensemble de lamelles de matrice osseuse concentriques formant en leur centre le canal central de l'ostéon. Les ostéocytes, enfermés dans les lacunes, sont reliés au canal central et entre eux par des canalicules.

5. L'os spongieux est constitué de fines travées qui comportent des lamelles disposées de façon irrégulière et forment des cavités remplies de moelle. (Dans les os plats et certaines épiphyses d'os longs, il s'agit de moelle rouge.)

Composition chimique de l'os (p. 171)

6. L'os contient des cellules vivantes (ostéoblastes, ostéocytes et ostéoclastes) et de la matrice. La matrice comprend des substances organiques qui sont sécrétées par les ostéoblastes et qui procurent à l'os sa résistance à la tension. Ses constituants inorganiques sont les hydroxyapatites (sels de calcium) qui confèrent à l'os sa dureté.

Relief osseux (p. 171-172)

7. Les éléments du relief osseux constituent d'importants repères anatomiques qui représentent les points d'attache de muscles, les points d'articulation ainsi que le passage de vaisseaux sanguins et de nerfs à l'intérieur de l'os.

Développement des os (ostéogenèse) (p. 172-176)**Formation du squelette osseux (p. 172-174)**

1. Les clavicules et la plupart des os du crâne se forment par ossification intramembraneuse. La substance fondamentale de la matrice osseuse se dépose entre les fibres collagènes, à l'intérieur de la membrane fibreuse, pour constituer l'os spongieux. Les plaques d'os compact finissent par enfermer le diploé.

2. La plupart des os se forment par ossification endochondrale à partir d'un modèle de cartilage hyalin. Les ostéoblastes qui se trouvent sous le périoste sécrètent une matrice osseuse sur le modèle du cartilage, constituant ainsi une gaine osseuse. La détériora-

tion de la matrice cartilagineuse forme des cavités, ce qui permet l'entrée du bourgeon conjonctivo-vasculaire. La matrice osseuse se dépose autour des restes de cartilage.

Croissance des os après la naissance (p. 174-176)

3. Les os longs s'allongent par croissance interstitielle des cartilages épiphysaires et leur remplacement par de la matière osseuse.

4. La croissance par apposition (du périoste) fait augmenter le diamètre et l'épaisseur de l'os.

Homéostasie osseuse: remaniement et consolidation (p. 176-181)**Remaniement osseux (p. 176-178)**

1. Sous l'effet de stimulus hormonaux et mécaniques, il se produit continuellement un dépôt et une résorption de matière osseuse. L'ensemble de ces processus constitue le remaniement osseux.

2. Un liséré ostéοide, bande étroite et non minéralisée de matrice osseuse, se forme dans les zones de nouvelle ossification; des sels de calcium s'y déposent de 10 à 12 jours plus tard.

3. Les ostéoclastes multinucléés sécrètent des enzymes et des acides cataboliques sur les surfaces osseuses à résorber.

4. Le remaniement osseux par voie hormonale tend à maintenir la concentration normale du calcium sanguin. Lorsque la concentration du calcium sanguin diminue, la parathormone (PTH) est libérée et elle stimule la digestion de la matrice osseuse par les ostéoclastes, mécanisme qui provoque à son tour la libération de calcium ionique. Lorsqu'il y a augmentation de la concentration du calcium sanguin, la calcitonine est libérée et elle stimule le retrait du calcium du sang. Les forces mécaniques et la gravitation qui agissent sur le squelette permettent de maintenir la solidité de ce dernier. Les os s'épaississent, il s'y forme de plus grosses saillies, ou bien de nouvelles travées apparaissent dans les sites qui subissent les sollicitations.

Consolidation des fractures (p. 178-181)

5. Le traitement des fractures consiste en une réduction à peau fermée ou par voie chirurgicale. Les étapes du processus de consolidation incluent l'apparition d'un hématome, la formation d'un cal fibrocartilagineux, puis d'un cal osseux, et enfin le remaniement osseux.

Déséquilibres homéostatiques des os (p. 181, 184)

1. Toutes les anomalies du squelette sont reliées à un déséquilibre entre la formation et la résorption osseuse.

2. On nomme **ostéoporose** toute affection dans laquelle la désagrégation des os se fait plus vite que leur formation, ce qui rend les os poreux et moins solides. Les femmes y sont particulièrement prédisposées après la ménopause.

3. L'**ostéomalacie** et le **rachitisme** se manifestent en cas de minéralisation insuffisante des os. Les os deviennent mous et se déforment. Le manque de vitamine D est la cause la plus fréquente d'ostéomalacie.

4. La **maladie osseuse de Paget** se caractérise par un remaniement osseux excessif et anormal.

Développement et vieillissement des os: chronologie (p. 184-185)

1. L'ostéogenèse suit un cheminement prévisible qui est programmé avec précision.

2. La croissance des os longs se poursuit jusqu'à la fin de l'adolescence. La masse osseuse s'accroît fortement pendant la puberté et l'adolescence, alors que la formation de matière osseuse excède la résorption.

3. La masse osseuse reste relativement constante chez les jeunes adultes, mais à partir de la quarantaine, la résorption est plus rapide que la formation osseuse.

QUESTIONS DE RÉVISION

Choix multiples/associations

(Réponses à l'appendice G)

- Qu'est-ce qui constitue une fonction du système osseux ? (a) Le soutien ; (b) le siège de l'hématopoïèse ; (c) le stockage de minéraux ; (d) l'effet de levier pour l'activité musculaire ; (e) toutes ces réponses.
- Un os qui a sensiblement la même largeur, longueur et hauteur est probablement : (a) un os long ; (b) un os court ; (c) un os plat ; (d) un os irrégulier.
- Le nom exact du corps d'un os long est : (a) l'épiphyse ; (b) le périoste ; (c) la diaphyse ; (d) l'os compact.
- L'hématopoïèse se fait dans tous ces sites, sauf : (a) les cavités à moelle rouge de l'os spongieux ; (b) le diploé des os plats ; (c) les canaux médullaires des os chez les jeunes enfants ; (d) les canaux médullaires des os chez les adultes en bonne santé.
- Un ostéon comporte : (a) un canal central qui renferme des vaisseaux sanguins ; (b) des lamelles concentriques ; (c) des ostéocytes dans des lacunes ; (d) des canalicules qui relient les lacunes au canal central ; (e) toutes ces réponses.
- La partie organique de la matrice revêt une importance pour les caractéristiques suivantes, *sauf* : (a) la résistance à la tension ; (b) la dureté ; (c) la capacité de résister à l'étirement ; (d) la flexibilité.
- Les os plats du crâne se forment à partir : (a) de tissu conjonctif aréolaire ; (b) de cartilage hyalin ; (c) de tissu conjonctif ; (d) d'os compact.
- Le remaniement osseux est assuré par lesquelles de ces cellules ? (a) Les chondrocytes et les ostéocytes ; (b) les ostéoblastes et les ostéoclastes ; (c) les chondrocytes et les ostéoblastes ; (d) les ostéoblastes et les ostéocytes.
- La croissance osseuse chez les enfants et les adultes est régie et dirigée par : (a) l'hormone de croissance ; (b) la thyroxine ; (c) les hormones sexuelles ; (d) les forces mécaniques ; (e) toutes ces réponses.
- À l'intérieur du cartilage épiphysaire, où trouve-t-on les cellules cartilagineuses en cours de *division* ? (a) Tout près de la diaphyse ; (b) dans le canal médullaire ; (c) du côté opposé à la diaphyse ; (d) dans le point d'ossification primaire.
- La loi de Wolff concerne : (a) la concentration du calcium sanguin ; (b) l'épaisseur et la forme d'un os, qui sont déterminées par les forces mécaniques et gravitationnelles qu'il subit ; (c) la charge électrique des surfaces osseuses.
- Lors de la consolidation d'une fracture, la formation du cal osseux est suivie de : (a) la formation d'un hématome ; (b) la formation du cal fibrocartilagineux ; (c) le remaniement osseux qui convertit l'os fibreux en os compact ; (d) la formation du tissu de granulation.
- Une fracture dans laquelle les bouts d'os ne sont pas complètement séparés est appelée une fracture : (a) en bois vert ; (b) ouverte ; (c) fermée ; (d) plurifragmentaire ; (e) par tassement.
- La maladie dans laquelle des os sont poreux et minces, mais d'une composition normale est : (a) l'ostéomalacie ; (b) l'ostéoporose ; (c) la maladie osseuse de Paget.

16. Décrivez dans le bon ordre les événements du processus d'ossification endochondrale.

17. Comparez l'apparence macroscopique, la structure microscopique et la situation de l'os compact et de l'os spongieux.

18. Pendant notre croissance, le diamètre de nos os longs augmente, mais l'épaisseur du cylindre d'os de la diaphyse reste relativement constante. Expliquez ce phénomène.

19. Décrivez le processus de formation de nouvelle matière osseuse dans un os d'adulte. Dans votre discussion, utilisez les termes *liséré ostéide* et *front de calcification*.

20. Comparez et montrez les différences entre le remaniement osseux d'origine hormonale et celui engendré par les forces mécaniques et gravitationnelles ; tenez compte de la véritable fonction de chaque système de régulation et des modifications de l'architecture osseuse qui peuvent survenir.

21. (a) Pendant quelle époque de la vie la masse squelettique augmente-t-elle de façon substantielle, et quand commence-t-elle à diminuer ? (b) Pourquoi est-ce chez les personnes âgées que l'on constate le plus grand nombre de fractures ? (c) Pourquoi les fractures en bois vert sont-elles surtout courantes chez les enfants ?



RÉFLEXION ET APPLICATION

1. À la suite d'un accident de motocyclette, un homme de 22 ans a été conduit au service des urgences. La radiographie a révélé une fracture en spirale du tibia droit (os principal de la jambe). Deux mois plus tard, la radiographie montre qu'un bon cal osseux est en formation. Qu'est-ce qu'un cal osseux ?

2. M^{me} Arcand conduit sa fille de quatre ans chez le médecin, disant qu'elle n'a pas l'air de bien aller. Le front de la fillette est agrandi, il y a des bosses sur sa cage thoracique et ses membres inférieurs sont tordus et déformés. La radiographie montre des cartilages épiphysaires très épais. Le médecin conseille à M^{me} Arcand d'augmenter la ration alimentaire de vitamine D et de lait et d'envoyer la fillette jouer dehors au soleil. À votre avis, d'après les symptômes présentés par la fillette, de quelle maladie est-elle atteinte ? Expliquez les suggestions du médecin.

3. Vous entendez des étudiants en anatomie rêver tout haut de ce que seraient leurs os s'ils avaient de l'os compact à l'intérieur et de l'os spongieux à l'extérieur, et non l'inverse. Vous leur déclarez que, du point de vue mécanique, de tels os seraient mal conçus et fragiles. Expliquez vos raisons.

4. À votre avis, pourquoi les personnes paralysées des membres inférieurs et confinées dans un fauteuil roulant ont-elles des os fins et fragiles dans les jambes et les cuisses ?

5. L'été de ses onze ans, Jean Beauchemin a participé à un camp d'haltérophilie. L'entraîneur insistait beaucoup auprès de lui et de ses amis pour qu'ils améliorent leur force. Après une séance d'exercice particulièrement énergique, Jean a ressenti une douleur et une faiblesse extrêmes dans l'un de ses coudes. Le médecin a fait une radiographie de son bras et lui a expliqué qu'il s'agissait d'une blessure grave car « l'extrémité de son humérus commençait à se tordre ». Que s'était-il passé ? La sœur de Jean, Thérèse, âgée de 23 ans, s'est inscrite à un programme d'haltérophilie ; risque-t-elle une blessure similaire ? Expliquez votre réponse.

Questions à court développement

15. Comparez l'os au tissu cartilagineux en ce qui concerne l'élasticité, la vitesse de régénération et l'accès aux nutriments.