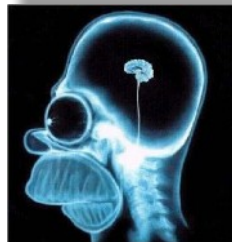


# TD OSTÉOLOGIE

## L3VT

**Année scolaire 2022 – 2023**

Jean-Luc Voisin  
([jeanlucvoisin2004@yahoo.fr](mailto:jeanlucvoisin2004@yahoo.fr))



### REMARQUES

- \*Ce document correspond au support du TD sur l'ostéologie pour les L3 de Paris VII (Diderot)
- \*Le français et l'orthographe sont donc parfois aléatoires.
- \*Les tableaux et figures appelés dans le texte se trouvent dans le polycopié téléchargeable sur ce site (<http://jeanlucvoisin.free.fr>).

### TP L3 : OSTÉOLOGIE

(Hall et voir p. (3-4) Dire 2 mots sur les os acellulaires.

Le but de ce TD est de mieux connaître les os, les cartilages et les dents, structures les plus souvent conservées en paléontologie, en dehors des cartilages, car ce sont des organes fortement minéralisés. Il est, cependant, délicat de ne pas présenter les cartilages tant ces derniers et les os sont liés.

En employant les termes d'os et de cartilage, on mélange deux notions distinctes bien que très proches : les tissus et les organes. Un tissu est une structure composée de cellules similaires qui effectuent une même tâche pour l'ensemble de l'organisme. En revanche, un organe est un ensemble de tissus collaborant à une fonction physiologique. Le terme os devrait donc être réservé à l'organe osseux et non aux tissus osseux. Ainsi, le fémur, la clavicule, etc. sont des organes (en effet, ces structures ne comprennent pas que du tissu osseux lorsqu'ils sont vivants mais aussi des tissus épithéliaux, nerveux, etc.). Il existe quatre grands groupes de tissus fondamentaux en s'appuyant sur leur mode de développement, leur structure et leur fonction (Tableau 1) :

- Les tissus épithéliaux
- Les tissus conjonctifs et de soutien
- Les tissus musculaires
- Les tissus nerveux

Chez les Vertébrés, donc chez les Primates et l'Homme, il existe uniquement quatre types de tissus minéralisés qui sont :

- Les os
- Les cartilages
- La dentine
- L'émail

La dentine, les os et le cartilage sont issus d'un tissu conjonctifs alors que l'émail résulte de la différenciation de cellules épithéliales.

Nous verrons les caractéristiques générales des os, des cartilages et des dents (donc de la dentine et de l'émail) de Mammifères avec un regard particulier pour l'ostéologie humaine. Des comparaisons avec d'autres Vertébrés seront parfois réalisées afin de mieux comprendre l'anatomie humaine.

Le nombre d'os moyen est très variable d'une espèce à une autre (Tableau 2). Ainsi, l'homme adulte en possède normalement 206, mais ce nombre peut varier car certains os peuvent fusionner, surtout chez les personnes âgées, ou alors des os surnuméraires peuvent être présents (os acromial, os lambdatique, etc.). Ces os surnuméraires n'ont aucun effet fonctionnel et ne sont découverts fortuitement que lors d'analyses médicales. En outre, chez les jeunes enfants certaines

structures osseuses, qui ne font qu'une à l'âge adulte, sont constituées de plusieurs os distincts. Par exemple, chez les enfants, l'os frontal est constitué de deux os distincts : un frontal gauche et un droit, alors que chez l'adulte ces deux os ont fusionné et ne forment plus qu'un seul os. Cependant, il arrive parfois chez l'adulte que la suture entre les deux os frontaux, appelée suture métopique, ne fusionne pas. L'individu adulte possède alors deux os frontaux (**Projection**).

Les quatre tissus minéralisés des Vertébrés ont de nombreuses fonctions dont :

- La protection (écailles, os dermique du tégument et du neurocrâne)
- La prédation (dents, une innovation des Vertébrés)
- Support endo-squelettique (squelette axial et appendiculaire)

Le squelette des Tétrapodes se divise en trois parties :

- Le squelette céphalique ou crâne qui se subdivise en neurocrâne et en splanchnocrâne
- le squelette axial qui comprend la colonne vertébrale et la cage thoracique
- le squelette appendiculaire qui comprend les ceintures et les membres

Nous commencerons par aborder les caractéristiques des tissus de soutien en général puis nous étudierons les cartilages et nous finirons par les os et les dents. La partie sur les dents sera courte en regard de celle sur les os.

## I.) Les caractéristiques biochimiques des tissus de soutien

Les tissus de soutien, dont font partis les cartilages et les os, sont caractérisés par des **cellules fusiformes ou étoilées**, noyées dans une matrice extracellulaire qu'elles ont sécrété. Cette dernière comprend :

- Une **substance fibrillaire (fibres conjonctives)** dont le rôle est de soutenir et de renforcer les tissus conjonctifs. Il existe 3 types de fibres : les fibres de collagènes, les fibres élastiques et les fibres réticulaires.
- Une **substance fondamentale amorphe** dans laquelle sont noyées les fibres conjonctives.

### a) La substance fibrillaire

La **substance fibrillaire** résulte de la polymérisation extracellulaire de protéines précurseurs (tropocollagène, tropoélastine) sécrétées par les cellules mésenchymateuses<sup>1</sup>.

#### \*Les fibres de collagène

Le collagène (protéine), qui a une masse de 300 kDa, représente le quart de la masse protéique des Mammifères car on la retrouve dans les os, le cartilage, l'interstitium pulmonaire, les muscles, les tendons, les ligaments ainsi que les parois des vaisseaux. De façon générale, c'est la protéine la plus abondante du monde animal.

La quantité de collagène présente dans un fossile est un marqueur de la quantité d'ADN ancien présent dans ce reste osseux ou dentaire. Ainsi, avant de prélever de l'ADN dans un fossile on analyse la quantité de collagène présente dans le reste osseux et si cette dernière est

<sup>1</sup> Le mésenchyme est un tissu conjonctif embryonnaire.

suffisamment importante, alors on prélève une plus grande quantité de tissus osseux ou dentaires afin de tenter de récupérer de l'ADN.

Aujourd'hui, plus de 25 molécules de collagènes différentes sont connues, chacune ayant une ou des fonctions différentes, une ou des localisations spécifiques dans l'organisme (Tableau 3). Certains de ces collagènes n'ont ni de fonctions connues ni de localisation connues. On ne connaît que leurs gènes (Tableau 3). Il n'est pas exclu que certains de ces collagènes ne soient produits que sur une période de temps très courte lors de du développement de l'individu, en particulier du développement intra-utérin. Le plus important, en terme de quantité, est le collagène de type I qui représente 90% du collagène d'un Vertébrés (Tableau 3).

L'orientation des fibres de collagène dans l'os (surtout du collagène de type I) est dépendante de l'orientation des contraintes dominantes que subit l'os mais elle sont le plus souvent parallèle entre elles ce qui permet d'assurer une certaine souplesse aux tissus.

Les fibres de collagène sont caractérisées par leur très haute résistance à la traction, donc ne se cassent pas facilement, sans être rigide.

### Formation du collagène (Figure 1)

*Étape 1 : les caractéristiques du tropocollagène (ou collagène).* Le tropocollagène est formé de 3 chaînes polypeptidiques  $\alpha$  gauche qui s'assemblent en tripe hélice droite. La structure primaire des chaînes  $\alpha$  est constituée d'environ 1000 acides aminés qui sont caractérisés par une succession de triplet Glycine-X-Y. Les groupes X et Y pouvant être n'importe quel acide aminé mais le plus souvent l'acide aminé X est une proline et le Y une hydroxyproline<sup>2</sup>. Un autre acide aminé fréquent est l'hydroxylysine. L'hydroxyproline et l'hydroxylysine sont deux acides aminés fondamentaux pour l'efficacité du collagène. En effet, l'hydroxyproline réalise des liaisons hydrogène avec l'eau ce qui confère la stabilité des fibres de glycoène et l'hydroxylysine réalise des liaisons covalentes avec les glucides.

*Étape 2 : les fibrilles de collagène.* Les molécules de tropocollagène s'assemblent côte à côte mais avec un décalage de 67 nm, jusqu'à s'assembler en une fibrille de collagène. Cette dernière est composée de 5 molécules de tropocollagène. L'assemblage de plusieurs fibrilles forme une fibre de collagène (Figure 1).

Les fibres de collagène présentent une alternance de phases sombres et claires due à l'espacement et au décalage des fibres de tropocollagène (Figure 1). L'espace laissé libre entre deux molécules de tropocollagène est occupé par la substance fondamentale amorphe qui sera essentiellement de l'hydroxyapatite dans le cas des os.

---

<sup>2</sup> En l'absence d'hydroxyproline, la triple hélice de tropocollagène est très instable à température ambiante et ne se forme pratiquement pas à la température corporelle. L'hydroxylation de la proline, qui a lieu dans le réticulum endoplasmique, dépend de l'acide ascorbique (un cofacteur de l'enzyme prolyl hydroxylase) plus connu sous le nom de vitamine C. Ainsi, une carence en vitamine C conduit à une mauvaise synthèse du collagène, ce qui entraîne la fragilité des vaisseaux sanguins, des tendons et de la peau. Ce sont les symptômes du **scorbut**. Cette maladie était très répandue chez les marins du XVe au XVIIIe siècle et fut combattu grâce à l'introduction d'aliments riches en vitamine C. Le scorbut est une pathologie connue par l'humanité depuis longtemps et sa 1<sup>ère</sup> description remonte à 1500 avant notre ère dans le papyrus d'Ebers (règne Amenhotep Ier). La plupart des Vertébrés sont capables de synthétiser la vitamine C dans leur foie ou dans leurs reins. De même, la majorité des Mammifères sont capables de synthétiser leur propre vitamine C sauf l'homme, les grands singes, le cochon d'Inde et une espèce de chauve souris. De même certains oiseaux et poissons en sont aussi incapables.

Les fibres de collagènes se présentent soit sous forme de gros cordons de 1 à 12 µm d'épaisseur, soit sous forme de petites fibres disposées en réseau.

#### \*Les fibres élastiques : l'élastine

Les fibres élastiques, d'un diamètre de 0,2 à 1 µm de diamètre, se disposent en réseau et sont constituées, chez la majeure partie des Tétrapodes, d'une protéine : l'élastine (Tableau 3). Cette dernière est absente des os eux-mêmes (seul le périoste en possède en quantité limitée ainsi que certains cartilages) et donc je ne parlerais pas plus de cette molécule. En revanche, on la trouve en grande quantité dans différents tissus comme les parois des artères, des alvéoles pulmonaires, la peau, etc. Sa synthèse diminue au cours de la croissance et s'arrête avec la fin de la puberté. C'est pour cette raison que les rides apparaissent avec l'âge. En effet, plus l'individu adulte est âgé et moins il y a d'élastine dans la peau, cette dernière devient de moins en moins élastique et ainsi des plis se forment. C'est aussi la raison pour laquelle les artères deviennent plus rigides avec l'âge, les rendant donc moins résistantes à une pression artérielle élevée.

#### \*Les fibres réticulaires

Les fibres réticulaires sont constituées de réticuline, une forme très ramifiée de collagène. Comme les fibres de collagène, les fibres réticulaires soutiennent et renforcent les tissus conjonctifs. Les fibres réticulaires se trouvent surtout dans le stroma<sup>3</sup> (c'est à dire, la charpente de nombreux organes mous).

#### *b) La substance fondamentale*

La substance fondamentale est un gel polysaccharidique hydraté (qui peut parfois se minéraliser comme le tissu osseux par exemple) constitué de deux types de macromolécules :

- les **glycosaminoglycanes** qui sont des polysaccharides (ou protéoglycanes) non branchés, tels que l'acide hyaluronique<sup>4</sup> ou les chondroïtes sulfates, pouvant se lier à des protéines (sauf l'acide hyaluronique); les **glycosaminoglycannes présents déterminent le type de tissu de soutien** (conjonctif, cartilage, etc.)
- la **fibronectine** est une glycoprotéine favorisant l'adhérence entre les cellules mésenchymateuses, les fibres de collagène et les glycosaminoglycanes. La fibronectine favorise donc la migration cellulaire.

La nature chimique, la consistance et les propriétés de la substance fondamentale permettent de distinguer 3 grands types de tissus squelettiques :

- les **tissus conjonctifs**, caractérisés par une substance fondamentale qui reste molle,
- les **tissus cartilagineux**, caractérisés par une substance fondamentale ferme et élastique,
- les **tissus osseux** caractérisés par une substance fondamentale qui se calcifie et devient dure. Dans ce dernier tissu, la matrice extracellulaire occupe entre 92 et 95% du

---

3 Le stroma s'oppose au parenchyme qui constitue la partie fonctionnelle de l'organe. Attention à l'homonymie avec le parenchyme végétal qui n'a, bien entendu rien à voir.

4 l'acide hyaluronique est une substance visqueuse qui relie les cellules, lubrifie les articulations et participe au maintien du globe oculaire.

volume tissulaire et peut être subdivisée en une matrice organique (comprenant la substance fondamentale et la substance fibrillaire), qui représente 22% du volume tissulaire et une matrice inorganique qui en représente 69% (constitué essentiellement d'hydroxyapatite). La teneur en eau, environ 9%, varie en fonction de l'âge.

## II.) Les cartilages

Les cartilages sont donc des tissus conjonctifs, c'est-à-dire que ce sont des tissus dont les cellules sont séparées par de la matrice extracellulaire. Les cartilages ont la particularité d'être des structures non innervées et non vascularisées. Les cellules produisant le cartilage, ou **chondrocytes**, sont dans des logettes (chondroplastes ou lacunes cartilagineuses) noyées dans la matrice extracellulaire et ne présentent pas de contact entre elles, contrairement aux **ostéocytes**. Les cartilages sont résorbés par les **chondroclastes**. Les cartilages, sauf les cartilages articulaires, sont recouverts d'une fine membrane : le péricondre. Ce dernier est vascularisé et assure la croissance, la nutrition et la réparation du cartilage.

Les **cartilages** se forment à partir d'un **mésenchyme embryonnaire** (Figure 2). Les **cellules mésenchymateuses** se **transforment** en **chondroblastes** avant de se différencier en **chondrocytes** et sécrètent une matrice extracellulaire très riche en glycosaminoglycane (protéoglycanes), en particulier en chondroïtine sulfates (Figure 3), et en différents types de **collagène**, en particulier le **type II**. Les **glycosaminoglycanes** sont responsables de la **dureté** et de **l'élasticité** des cartilages et donc de leur résilience. En revanche, ce sont les fibres de collagène qui assurent la résistance des cartilages aux différentes forces que le cartilage subit. Les chondrocytes perdent au cours de leur différenciation leurs relations cytoplasmiques.

La majorité des chondrocytes se divisent durant toute la vie de l'individu même si dans certains cartilages, en particulier les cartilages articulaires des mammifères, seul 1% de la population de chondrocytes se divise et donc peut se régénérer.

Le **cartilage des Mammifères** (si on tient comptes de tous les Vertébrés et mêmes des lamproies, la diversité des cartilages augmente considérablement) peut se subdiviser en **3 types** en fonction de leurs caractéristiques histologiques et biochimique :

- **Cartilage hyalin** est composé d'une matrice extracellulaire constitué d'une substance fondamentale très riche en acide hyaluronique et de fibres conjonctives composées essentiellement de **collagène de type II et XI**. Chez les Mammifères ce cartilage se trouve chez l'embryon comme structure primaire des os enchondraux. Chez l'individu juvénile, le cartilage hyalin se trouve dans les cartilages assurant la croissance en longueur des os (le cartilage de conjugaison). Chez l'adulte il forme, notamment, le cartilage articulaire. Il est d'un blanc bleuté luisant. C'est le cartilage le plus abondant dans l'espèce humaine.
- **Cartilage élastique** est composé d'une matrice extracellulaire constitué d'une substance fondamentale classique (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de glycosaminoglycanes particuliers surreprésentés). Par ailleurs, les fibres conjonctives qui constituent cette matrice sont riches en élastine et en collagène **de type II**. Il est de couleur **jaunâtre**. Il est caractéristique de structure comme le pavillon de l'oreille externe.

- **Cartilage fibreux** ou « **fibrocartilage** » est composé d'une matrice extracellulaire constitué d'une substance fondamentale classique (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de glycosaminoglycanes particuliers surreprésentés) et de fibres conjonctives essentiellement représentées par du collagène de **type I**. Ces fibres de collagène sont denses et orientées selon les forces de tension (en faisceaux ou entrecroisés) que subit le cartilage. Ce cartilage est ainsi très résistant aux forces de tractions. Il se trouve, notamment, sur la périphérie des disques intervertébraux (le centre étant occupé par une structure gélatineuse) ainsi que sur les zones d'attache des ligaments et des tendons sur l'os.

Les cartilages existent chez tous les Vertébrés, et chez certains, comme les Chondrichthyens (Requins, Raies et Chimères) et les Chondrostéens (Esturgeons, Béluga (*Huso huso*)<sup>5</sup>, poissons spatules, etc.), il remplace totalement ou presque totalement le squelette osseux. Les cartilages existent aussi chez de nombreux invertébrés (Céphalopodes, etc.).

#### **Attention**

Les cartilages **hypertrophiés** et **sériés** (Figure 4) sont des cartilages hyalins particuliers que l'on trouve dans les cartilages de **conjugaison**. Ces derniers permettent la **croissance** des os longs par ossification enchondrale (voir plus bas).

### **III.) Les tissus osseux**

Les os sont, comme les cartilages, des tissus mésenchymateux conjonctifs, c'est-à-dire que ce sont des tissus dont les cellules sont séparées par de la matrice extracellulaire. Contrairement aux cartilages, les tissus osseux sont innervés et vascularisés. Cependant, il existe un type d'os qui ne possèdent pas de cellules : ce sont les **os acellulaires**. Ils sont donc non innervés et non vascularisés. Chez la plupart des Mammifères et les humains en particuliers, la mise en place de ce tissu osseux acellulaire est le résultat de nombreuses pathologies. En revanche, les os acellulaires sont la norme chez deux groupes majeurs de Vertébrés : chez les poissons téléostéens actuels (ce groupe comprend près de 24 000 espèces, contre 20 000 pour tous les oiseaux et les mammifères réunis) et la sous-classe des hétérostracés (un groupes d'agnathes fossiles qui vécut du Silurien inférieur au Dévonien supérieur).

Les os constituent le tissu de soutien majeur chez l'homme. C'est une structure extrêmement résistante et légère. En effet, lors de la course, les os du genou peuvent supporter jusqu'à cinq fois la masse du coureur et pourtant ils représentent moins de 20% de la masse totale de l'individu. Une barre d'acier réalisant les mêmes performances pèserait 4 à 5 fois plus que le squelette humain.

Chez les Mammifères, il existe deux types de tissus osseux (Tableau 4) et seul les os lamellaires seront étudiés ici (voir plus bas).

---

<sup>5</sup> Ne pas confondre avec l'autre Béluga, aussi appelé baleine blanche (*Delphinapterus leucas*), qui a donc un squelette osseux.

- Les os immatures ou *os réticulaires*
- Les os matures ou *lamellaires*

Les tissus osseux réticulaires se mettent en place lors du développement embryonnaire et correspondent au premier type de tissus osseux à se mettre en place. Ils sont rapidement remplacés par de l'os mature ou lamellaire, le seul type d'os dont nous parlerons ici.

Les os ont de nombreuses fonctions :

- Supportent le poids du corps (fonction la plus évidente),
- Protègent les organes vitaux (cerveau, moelle épinière),
- Servent de point d'attachement pour les ligaments et les muscles,
- Constituent un réservoir majeur de calcium et de phosphore, d'où leur rôle important dans l'homéostasie minérale,
- Hébergent, pour certains d'entre eux, les tissus hématopoïétiques<sup>6</sup> (uniquement chez les Mammifères) ; ils constituent alors la moelle rouge.
- Le stockage des triglycérides ; la moelle jaune est surtout composée d'adipocytes.

#### a) Organisation macroscopique des tissus osseux lamellaires

Les os lamellaires sont ainsi nommés car ils sont composés de tissus osseux organisés en lamelles parallèles à la surface de l'os et concentriques (voir plus bas).

Au niveau macroscopique on peut diviser les *os lamellaires* en *deux* catégories :

- L'*os cortical*, dense ou compact (Figure 13),
- L'*os spongieux* (Figure 13)

Ces types osseux ne se distinguent pas uniquement par leur porosité différente mais aussi par leur localisation et leur fonction, comme nous le verrons plus loin.

#### +) L'os cortical ou compact

L'os cortical est caractérisé par une structure morphologique très compacte. Ainsi, ce type d'os ne peut être nourri par diffusion à partir des vaisseaux de surface et c'est pourquoi un système de canaux et de canalicules existent : c'est le système haversien.

Pour bien comprendre le système haversien, il faut regarder la coupe transversale d'un os long comme le tibia (Figure 5). On y voit des groupes de cercles concentriques (Figures 5 & 6). Chaque groupe de cercles concentriques correspond à un système de havers encore appelé ostéon secondaire. En moyenne, dans chaque ostéon il y a 4 à 8 cercles concentriques connus sous le nom de lamelles haversiennes qui correspondent à une alternance de couche fortement minéralisée et de couches plus riches en collagène. Ces fibres de collagène sont orientées différemment dans chaque lamelle. C'est cette alternance dans l'orientation des fibres qui confère la solidité à l'os.

Chaque ostéon mesure 0,3 mm de diamètre pour 3 à 5 mm de long. Un ostéon correspond à l'unité de base de l'os compact. Dans le canal de Havers, localisé au centre, passent les vaisseaux sanguins (veines et artères) et lymphatiques ainsi que des fibres nerveuses. Les canaux de Havers sont orientés selon le grand axe de l'os. Les ostéons sont reliés entre eux par des lamelles

---

<sup>6</sup> Les tissus hématopoïétiques produisent les cellules sanguines ainsi que les éléments figurés du sang.



interstitielles qui sont des restes d'ostéons antérieurs. Les ostéons sont entourés par de nombreux ostéoblastes et ostéoclastes. Les ostéons vont ainsi répondre aux contraintes en produisant de l'os ou en éliminant.

Dans chaque lamelle, il y a des *lacunae* ou lacunes (Figures 2, 5 et 6) qui hébergent chacune un ostéocyte (voir plus bas). Les nutriments sont transportés aux ostéocytes via les canalicules, qui sont des petits canaux qui relient les différents *lacunae* entre elles et avec les canaux de Havers.

#### +) L'os spongieux

L'os spongieux ne rencontre pas les problèmes d'apport en nutriments que connaît l'os compact. En effet, ce type osseux est beaucoup plus poreux car il est constitué de trabécules osseuses laissant des espaces libres remplie de moelle osseuse (Figure 7). Ces trabécules ne représentent que 20 à 25% du volume totale de l'os spongieux.

Dans les trabécules, il n'y a pas de canaux de Havers et les ostéons sont le plus souvent incomplets. L'os spongieux reçoit les nutriments par le sang passant dans la moelle car ils sont suffisamment fins pour qu'ils puissent passer par diffusion et donc les canaux de Havers sont inutiles.

Le tissu osseux spongieux permet d'augmenter la résistance d'un os (tels que le fémur, le tibia, etc.) sans en augmenter sa masse. Son rôle n'est pas de supporter un poids directement, mais de transmettre les forces exercées sur l'os à la partie corticale. Il existe une relation entre les caractéristiques des trabécules (nombre de trabécules, leur épaisseur, la distance entre chaque trabécules, la quantité de connexion entre les trabécules et la partie corticale) et la résistance générale de l'os (Figure 8).

#### b) La matrice extracellulaire

Les tissus osseux appartiennent aux tissus conjonctifs, tout comme les cartilages, mais au contraire de ces derniers ils sont innervés et vascularisés. Les tissus osseux sont caractérisés par une matrice extracellulaire dont la minéralisation représente 65% de la masse de l'os sec (Figure 9). Cette minéralisation est donc très importante. En revanche, la partie organique des tissus osseux (essentiellement du collagène de type I) ne représente que 20 à 25% de la masse de l'os. La masse restante, environ 10%, est composé d'eau qui est soit fixée sur les complexes de collagène, soit libre et circulant dans des canaux vasculaires et autres porosités de l'os. La disposition de l'eau libre dans l'os varie en fonction de la charge exercée sur l'os et de l'âge. Plus l'os devient rigide et plus il est minéralisé et moins il possède d'eau libre mais cela le rend plus cassant. La masse cellulaire ne représente qu'une infime partie de la masse totale de l'os et peut donc être négligée.

La matrice extracellulaire correspondant à celle des autres tissus de soutien on y retrouve :

- Une substance fibrillaire
- Une substance fondamentale

\*La *substance fondamentale* est constituée d'une matrice minérale, qui représente environ 65 % du poids de l'os sec et qui rend l'os rigide et solide. Cette minéralisation est assurée essentiellement par des **cristaux d'hydroxyapatite** (ou phosphate tricalcique).

Cette matrice minérale est fixée sur les fibres conjonctives et complète les pores et les « hole » (Figures 1 à 3).

\*La *substance fibrillaire* est principalement constituée de larges fibres de **collagène**, essentiellement de **type I** (80 % des protéines totales), et dans une moindre mesure, de protéoglycanes et de protéines non collagéniques spécifiques du tissu osseux comme **l'ostéopontine** (lie les ostéocytes aux cristaux d'hydroxyapatites) Les fibres sont parallèles les unes aux autres et sont organisées en fonction des forces de pressions exercées.

### c) les cellules osseuses

Il existe trois types de cellules associées aux os :

- Les ostéoblastes,
- Les ostéocytes
- Les ostéoclastes

#### +) Les ostéoclastes

Les ostéoclastes sont les cellules majeures de la résorption osseuse et sont toujours localisés à la surface de l'os, dans les zones de lyses (lacune de Howship). Ces cellules ont un rôle essentiel pour le développement et le maintien de la morphologie osseuse aussi bien durant la croissance que lors de l'âge adulte.

Les ostéoclastes matures sont des cellules polynucléaires (de 3 à plus de 20 noyaux), issus de la fusion de précurseur mononucléaire (Figure 10). Ce sont des cellules en dôme et les noyaux sont localisés à l'extrémité apicale. Tous les noyaux ne sont pas actifs.

Les ostéoclastes terminent leur vie par apoptose.

Des cellules de la moelle osseuse (cellules myéloïdes) vont se transformer en pré-ostéoclastes qui vont fusionner pour donner les ostéoclastes.

#### +) Les ostéoblastes

Les ostéoblastes sont les cellules responsables de la formation du tissu osseux en synthétisant la matrice osseuse, tout du moins une matrice organique : **l'ostéoïde** constitué de **collagène de type I** et d'autres **protéines** qui serviront de trame pour le dépôt de la phase minérale. Les ostéoblastes ont pour origines des cellules mésenchymateuses, les mêmes qui donnent aussi naissance aux chondrocytes, aux cellules musculaires et au adipocytes.

Les ostéoblastes actifs sont, comme les ostéoclastes, localisés sur la surface de l'os. Ces cellules sont cuboïdes avec un noyau de grande taille, un appareil de Golgi et un réticulum endoplasmique bien développés (caractères distinctifs de cellule en grande activité sécrétrice). Après avoir rempli leur mission de synthèse de tissus osseux, 60 à 80% des ostéoblastes meurent par apoptose. Les ostéoblastes restants se **transforment** soit en **ostéocyte** soit en **cellules bordantes**.

Les cellules bordantes sont des cellules aplaties recouvrant toute la surface de l'os inactif. Ces cellules peuvent synthétiser à nouveau la matrice organique en cas de nécessité. Les cellules bordantes sont en contact avec les ostéocytes via des jonctions gap. Les cellules de revêtement participent aussi au remodelage osseux en créant une voûte ou canopée au-dessus de la zone à remodeler favorisant l'action des ostéoclastes et des ostéoblastes (Figure 11).

C'est donc l'action conjointe des ostéoblastes et des ostéoclastes qui sont responsables de la forme de l'os.

#### + ) *Les ostéocytes*

Les ostéocytes dérivent donc de la transformation de quelques ostéoblastes qui sont emprisonnés dans la matrice osseuse (Projection). Ce sont les cellules les plus abondantes des os et correspondent à plus de 90% des cellules présentes aussi bien dans la matrice extracellulaire qu'à la surface de l'os. Le corps des ostéocytes est logé dans des lacunes et émet une cinquantaine de dendrites dans des canalicules traversant la matrice extracellulaire. Les dendrites d'un ostéocyte entrent en contact avec les dendrites des autres ostéocytes les plus proches et forment des ponts cytoplasmiques entre cellules via des jonctions GAP.

Les ostéocytes sont les cellules ayant une grande durée de vie et correspondent à des cellules sensibles aux variations de l'environnement (variation de contraintes, hormonales, etc.). Les ostéocytes régulent l'action des ostéoblastes et des ostéoclastes afin que l'os soit le mieux adaptés aux contraintes qu'il subit.

### IV.) Typologie osseuse et leur mise en place

Il existe de nombreuses classifications des os en fonction de critères très différents. Il est possible de les classer en fonction de leur morphologie générale (c'est celle que nous utiliserons ici), de leur aspect macroscopique (os cortical, os spongieux, que nous avons déjà vu) une classification en fonction de la disposition des fibres de collagènes (os réticulaires, os lamellaires que nous avons déjà vu), en fonction de leur origine embryologique (os enchondral, os dermique voir plus bas) ou encore en fonction de leur moment d'apparition (tissus primaire, secondaire ou tertiaire). Ces différentes typologies sont utilisées en fonction des travaux réalisés. La classification embryologique par exemple est de faite utilisée lorsqu'on étudie la mise en place du tissu osseux.

Je propose de suivre une classification morphologique car c'est celle qui est la plus évidente et la plus utilisée en paléanthropologie.

#### a) *La classification morphologique*

Il existe 4 types d'os chez les Tétrapodes :

- Les *os longs* (fémur, humérus, etc.) ont une de leurs dimensions nettement plus grandes que les deux autres. Ils présentent une diaphyse et deux épiphyses (Figure 12). Diaphyse et épiphyse sont reliées par une zone qui est le siège de la croissance : la métaphyse ou **cartilage de conjugaison**. Celui-ci ne s'ossifie complètement qu'à la fin de la croissance de l'os. Les os ne terminent pas leur croissance au même moment.

Par exemple l'extrémité médiale de la clavicule (l'extrémité qui s'articule avec le sternum) termine son ossification vers 25 ans quel que soit le sexe. L'humérus termine son ossification entre 13 et 17 ans chez les femmes et entre 16 et 20 ans chez les hommes.

μ La diaphyse est constituée d'un tissu osseux compact et épais, la corticale. La partie centrale de la diaphyse est creuse et forme le canal médullaire qui est rempli de moelle osseuse jaune. La diaphyse est entourée d'une membrane à l'extérieur (le périoste) qui est riche en vaisseaux nourriciers qui participent à l'ossification en épaisseur et sert de point d'attache aux ligaments et aux tendons. La cavité médullaire est tapissée d'une fine membrane : l'endoste (Figure 13).

μ Les épiphyses se situent aux extrémités : une épiphyse distale et une proximale. Elles sont formées de tissu spongieux. Elles sont très riches en moelle rouge hématopoïétique. Elles sont recouvertes de cartilage articulaire (Figure 13).

- Les *os courts* (carpes, tarses, etc.) ont leurs trois dimensions sensiblement égales. Ils sont composés d'un noyau d'os spongieux entouré d'une corticale d'os compact.
- Les *os plats* (sternum, côtes, scapula, os du crâne, etc.) ont une dimension nettement plus courte que les deux autres. Ils sont composés de deux couches d'os compact, les tables externe et interne, enfermant une couche d'os spongieux (dite en diploé) (Figure 14).
- Les *os intermédiaires* : n'appartiennent à aucun autre type d'os.

#### *b) Mise en place des structures osseuses*

Le développement osseux débute lors du premier trimestre de gestation chez l'homme et continue durant toute la croissance.

Les tissus osseux proviennent toujours de tissu conjonctif, jamais de tissus cartilagineux, même si une trame cartilagineuse existe dans le cas de l'ossification enchondrale. Il existe deux modes d'ossification (au moins chez les mammifères) :

- L'ossification enchondrale
- L'ossification dermique

#### *+) L'ossification enchondrale*

C'est le mode d'ossification de la majorité du squelette humain et concerne notamment les os longs. Des cellules d'un mésenchyme embryonnaire se différencient en chondroblastes et un cartilage hyalin se met en place. Ce dernier est, comme la plupart des cartilages, entouré d'un périchondre. Lors de l'ossification, les cellules du périchondre vont se différencier en ostéoblastes et l'ossification va débiter sur le pourtour de la diaphyse des os longs. Ce premier tissu osseux est constitué d'os lamellaire. Cette ossification va entraîner la mise en place d'un réseau vasculaire, de la cavité médullaire et d'un centre d'ossification primaire. On obtient ainsi une structure composée d'une diaphyse osseuse et d'extrémité cartilagineuse. A ces extrémités, des centres d'ossification secondaire vont se mettre en place. Le cartilage présent entre le tissu osseux produit par le centre primaire et celui produit par le/les centres secondaires est le cartilage

de conjugaison, qui est responsable de la croissance en longueur de l'os (Figure 15).

+) *L'ossification dermique*

Ce type d'ossification concerne les os plats comme les os du crâne ou la scapula. Contrairement à l'ossification enchondrale, il n'y a pas de modèle cartilagineux qui précède la mise en place du tissu osseux. L'ossification se fait directement à partir d'un tissu conjonctif local. Elle se fait le plus souvent dans le derme de la peau.

+) *La croissance osseuse*

Le périoste assure la croissance en épaisseur de l'os, mais aussi apporte les nutriments aux os et permet l'insertion des tendons et des ligaments à la surface de l'os. C'est un tissu fin et résistant qui recouvre l'extérieur des os, en dehors des surfaces articulaires. Le périoste est composé d'une couche externe fibreuse, d'une couche intermédiaire fibroélastique et d'une couche interne ostéoblastique ou cellulaires.

Les fibres collagéniques des tendons et des ligaments s'enchevêtrent avec le réseau dense de fibres de collagène qui constituent la couche externe fibreuse du périoste avant de s'insérer dans le tissu osseux sous-jacent.

La couche ostéoblastique abrite de nombreux types cellulaires dont des ostéoblastes et des ostéoclastes. Les ostéoblastes vont produire des dépôts successifs d'os lamellaires chez le l'individu en croissance. Chez l'adulte, ces cellules vont produire du tissu osseux ou en retirer en fonction des contraintes mécaniques que les os vont subir.

La croissance en longueur est assurée par la présence de cartilage de conjugaison. Ce cartilage se trouve pris en sandwich entre la diaphyse et l'épiphyse. Au fur et à mesure que l'os grandit, ce cartilage est éloigné de son point d'origine. Lorsque les cellules cartilagineuses cessent de se diviser, le cartilage est alors remplacé par de l'os ce qui entraîne la fusion de la diaphyse et de l'épiphyse.

## V°) Le squelette axial et céphalique

Le squelette axial, qui correspond aux os qui entourent les viscères, comprend les os de la tête, la colonne vertébrale, les côtes et le sternum. De nombreux os de cette partie du squelette sont impairs.

### 1°) *Les os de la tête*

La tête est constituée de deux parties : le crâne et la face<sup>7</sup> (Figure 16). La tête est constituée de 27 os (le nombre exact pouvant varier à cause de la présence, parfois, d'os surnuméraire), dont l'os hyoïde et les 3 osselets de l'oreille interne de chaque oreille (sans compter les dents). Le crâne contient l'encéphale et la face osseuse tous les organes des sens sauf le toucher.

#### a) le crâne

Le crâne est formé de deux parties (Figures 17, 18, 19, 20, 21, 22) :

---

<sup>7</sup> Le crâne correspond au neurocrâne de la biologie animale (organisé autour de l'encéphale et les organes sensoriels paires (olfactifs, visuels et stato-acoustique)) et la face (figure 16) au splanchnocrâne (organisé autour des cavités buccale et pharyngienne).

- la calvaria constituée de 8 os soudés entre eux : le frontal, l'ethmoïde, le sphénoïde, l'occipitale et de deux os pairs latéraux les pariétaux et les temporaux. En plus dans chaque os temporal il y a les 3 osselets de l'oreille, ce qui porte le nombre d'os à 14.
- La base du crâne est composée de 6 os : une partie de l'occipital, une partie des deux os temporaux, l'essentiel du sphénoïde, l'ethmoïde et une partie du frontal.

b) la face

La face comprend 15 os qui constituent le splanchnocrâne (sans l'os hyoïde) (Figure 16) :

- Trois os impairs (le vomer, la mandibule et l'os hyoïde)
- Six os paires (les maxillaires, les os zygomatiques, les os lacrymaux, les os du cornet nasal inférieur, les os nasaux et les os palatins)

2°) La colonne vertébrale ou rachis (Figure 23)

Une vertèbre comprend au maximum trois parties (Figure 24) :

- Un corps vertébral, qui se forme autour de la corde
- Un arc neural dorsal qui entoure la moelle épinière. Il est présent chez tous les Vertébrés. Il se prolonge par une épine neurale (neurapophyse) sur laquelle s'insère les muscles axiaux. Des apophyses latérales peuvent aussi exister.
- Un arc hémal ventral qui entoure l'artère et la veine caudal. Cet arc n'est pleinement développé qu'au niveau des vertèbres caudales et il disparaît chez les Tétrapodes.

Ainsi, chez l'Homme, une vertèbre présente toujours un corps vertébral (ou centre vertébrale) et un arc neural (encore nommé arc vertébral) (Figure 26) qui délimite le foramen vertébral dans le quel passe la moelle épinière.

La morphologie de la colonne vertébrale est dépendante du mode de vie (Figure 25) :

- La colonne vertébrale des poissons osseux est divisée en deux régions : une région antérieure ou troncale où les vertèbres portent des côtes et une région postérieure, ou caudale, sans côte.
- Le passage de la vie aquatique à la vie terrestre entraîne la liaison de la ceinture pelvienne à la colonne vertébrale au niveau d'une ou plusieurs vertèbres sacrées qui sépare nettement les vertèbres troncales et caudales. Les vertèbres sacrées correspondent aux dernières vertèbres troncales.
- La différenciation d'un cou mobile chez les amniotes entraîne la subdivision des vertèbres troncales en vertèbres cervicales (à côtes réduites ou absentes) et en vertèbres dorsales (à côtes bien développée).
- Chez les Mammifères la région dorsale se subdivise en région thoracique, pourvue de côtes, et en région lombaires (dépourvue de côte)

Ainsi chez les Mammifères on distingue 5 groupes de vertèbres (Figure 23) :

- Les vertèbres cervicales au nombre de 7 (chez tous les Mammifères sauf les paresseux et les lamantins)

- Les vertèbres thoraciques (ou dorsale) qui sont au nombre 12 chez l'homme
- Les vertèbres lombaires qui sont au nombre de 5 chez l'homme
- Les vertèbres sacrées qui sont au nombre de 5 chez l'homme
- Les vertèbres coccygiennes qui sont au nombre de 3 à 6 chez l'homme

Chez l'homme la colonne vertébrale présente des caractéristiques particulières liées à la bipédie. En effet, ce mode locomoteur implique que la colonne vertébrale travaille en compression contrairement aux animaux quadrupèdes où cette colonne ne subit pas ce type de contraintes. Pour répondre à ces contraintes particulières, la colonne vertébrale humaine a développé des adaptations particulières (Figure 23) :

- La présence de quatre courbures permettant de réduire l'action des muscles dorsaux sur la colonne vertébrale et ainsi diminuer les contraintes exercées sur cette dernière. En effet, la courbure cervicale (qui est une lordose car elle est concave dorsalement) ramène la tête en arrière et qui est ainsi pratiquement en équilibre au sommet du cou. De même la lordose lombaire ramène le thorax en arrière ce qui le met ainsi en équilibre au-dessus du sacrum.
- Le poids du thorax, des membres supérieurs, etc. doit passer par la colonne vertébrale avant d'arriver aux membres inférieurs. Ainsi, chaque vertèbre supporte un poids plus important que la précédente. Cela se traduit par des vertèbres lombaires et sacrées plus larges que les autres.

Deux vertèbres consécutives sont séparées l'une de l'autre par un disque intervertébral, sauf entre le crâne et la première cervicale (appelée l'atlas) et entre la première cervicale et la deuxième cervicale (appelée l'axis). Le disque intervertébral est constitué de fibrocartilage dont le rôle est d'absorber les vibrations.

Les vertèbres cervicales se différencient des autres par de nombreux caractères, en particulier leur corps vertébral est le plus fin parmi les vertèbres et l'apophyse épineuse est bifide (Figure 27).

Les vertèbres thoraciques se distinguent, notamment, par la présence de deux facettes articulaires avec les côtes et un foramen vertébral cylindrique (Figure 28).

Les vertèbres lombaires sont les plus massives car elles supportent le poids de toutes les autres. Leur foramen vertébral est triangulaire (Figure 29).

Les vertèbres sacrées (ou sacral) sont soudées les unes aux autres et forment le sacrum.

Le coccyx est composé de 3 à 6 vertèbres soudées et atrophiées.

### III.) Le squelette appendiculaire

Le squelette appendiculaire correspond aux ceintures (squelette zonal) et aux membres chiridiens. Pendant longtemps on pensait que le membre chiridien pentadactyle était la forme primitive. Cependant, la découverte de nombreux fossiles montre que les premiers Tétrapodes possédaient plus de cinq doigts. Par exemple *Acanthostega* possédaient 8 doigts et *Tulerpeton* 6. Le pied à 5 doigts serait le meilleur compromis entre les contraintes liées à la marche et celles



imposées par la gravité.

Le membre chiridien est caractérisé par la structure suivante (Figure 30) :

- Le *stylopode* ou segment proximal qui est constitué d'un seul os long
- Le *zeugopode* ou segment moyen qui est constitué de deux os longs
- L'*autopode* ou segment distal qui lui-même se décompose en (Figure 30) :
  - \**Basipode* (correspond au carpe ou au tarse)
  - \**Métapode* (correspond au métacarpe ou au métatarse)
  - \**Acropode* (correspond aux phalanges)

Les os des membres sont essentiellement des os longs, donc des os avec une cavité médullaire.

Les membres sont reliés au squelette axial grâce à la ceinture pelvienne et à la ceinture pectorale.

#### \*La ceinture pectorale

Chez les primates en général et l'homme en particulier, la ceinture scapulaire est constituée de deux os : la scapula (os plat) et la clavicule (os intermédiaire) (Figure 31). Or chez les Mammifères euthériens, seuls les Primates, les Chiroptères, presque tous les Insectivores, les Dermoptères et les Tubulidentés possèdent une clavicule. Chez tous les autres Mammifères, la clavicule n'existe pas et il n'y a donc pas de contact osseux entre les membres supérieurs et le squelette axial. La scapula est noyée dans la masse musculaire.

L'histoire de la ceinture scapulaire est complexe. Chez les premiers tétrapodes, cette ceinture est constituée de nombreux os, massive et toujours associées au squelette axial (Figure 32), à l'image de la ceinture pelvienne. Au cours du temps elle s'est allégée et c'est chez les Mammifères que cet allègement a été maximum.

La présence de la clavicule est importante car c'est grâce à cet os qu'il nous est possible de réaliser tous les mouvements du bras en dehors du plan parasagittal. Ainsi, c'est cet os qui a permis de devenir arboricole et manipulateur. La ceinture scapulaire de l'homme et ses membres supérieurs sont adaptés à la manipulation stricte. Parmi les nombreux caractères liés à la manipulation stricte il y a :

- une ceinture scapulaire basse par rapport au thorax (en regard des grands singes)
- une cavité glénoïdale (facette articulaire avec l'humérus) orientée latéralement et non crânialement
- des phalanges courtes et plutôt droites en regard des grands singes
- l'importance de la main dans le cortex moteur (Figure 33) qui montre l'importance du contrôle moteur de cet organe, pourtant petit, en regard d'autres zones comme la jambe.

Les membres supérieurs uniquement manipulateurs sont une première dans l'évolution. En effet, chez tous les animaux devenu bipède, soit les membres supérieurs ont conservé une fonction de locomotion, soit se sont atrophiés. En effet, chez les oiseaux carinates, les membres supérieurs servent au vol et chez les oiseaux ratites (comme les autruches) les ailes sont réduites et ont un rôle secondaire lors de la course. Chez les Dinosaures Théropodes, comme le *T. rex*, les



membres supérieurs sont très atrophiés.

L'épaule, qui est constituée de la partie proximale de l'humérus et de la ceinture scapulaire, est l'articulation la plus mobile chez les Hominoïdes.

Les membres inférieurs sont totalement adaptés à la locomotion bipède.

#### \* La ceinture pelvienne

L'histoire évolutive de la ceinture pelvienne est plus simple que celle de la ceinture scapulaire. La première a toujours été solidaire du squelette axial chez les tétrapodes. En revanche, en fonction des groupes et des adaptations locomotrices, la ceinture pelvienne a pris des aspects bien différents.

La ceinture pelvienne est constituée de l'os coxal (Figures 34, 35 & 36) (le terme « bassin » correspond à l'ensemble réalisé par l'os coxal, le sacrum et le coccyx, Figures 36, 38) et résulte de la fusion de trois os plats : l'ilium, l'ischium et le pubis (Figure 34).

Cependant, l'intrication entre ces trois structures est telle qu'il est préférable de les traiter comme un ensemble unique.

Chez les Primates en général et l'Homme en particulier, le bassin est impliqué dans deux fonctions avec des contraintes parfois franchement opposées :

- La locomotion
- La parturition

La distance entre les articulations sacro-iliaques et coxofémorales est beaucoup plus grande chez les grands singes et tous les Mammifères quadrupèdes que chez l'homme. Cette distance transmet, chez les bipèdes, le poids du tronc vers les membres inférieurs. Elle est donc à des efforts de pressions et de cisaillements. La réduction de la distance entre les articulations sacro-iliaques et coxofémorales entraîne une augmentation de l'angle d'incidence du bassin (Figure 39) L'ouverture de cet angle permet le déploiement des 4 courbures vertébrales indispensables à la bipédie. L'ouverture de l'angle d'incidence du bassin place le sacrum en arrière des cotyles (acetabulum) ce qui favorise la station debout. En effet, la ligne de gravité du tronc doit être légèrement postérieure aux hanches pour que l'équilibre soit économique. Si le plateau sacré qui reçoit le poids du tronc transmis aux têtes fémorales est situé à la verticale des cotyles, l'équilibre est très instable. En revanche, si le plateau sacré est situé en arrière des cotyles, il est beaucoup plus stable.

L'élargissement du sacrum est à la fois une adaptation à la locomotion et à la parturition. Le premier rôle du sacrum est de fixer solidement la ceinture pelvienne au squelette axial. L'élargissement du sacrum chez l'homme permet d'augmenter la largeur sacro-iliaque ce qui va avoir une incidence sur la locomotion et la parturition.

La parturition est complexe chez l'homme et simple chez les chimpanzés et tous les autres primates à l'exception de quelques espèces sud américaines. En effet, le nourrisson n'a aucun mouvement particulier de la tête à réaliser alors que chez les australopithèques des mouvements sont déjà nécessaires. En revanche, chez l'homme de nombreux mouvements de la tête sont nécessaires pour que le nourrisson arrive à sortir.

## IV°) Les dents

### a) Généralité

Les dents, qui sont des structures fortement minéralisée, sont une innovation des Vertébrés. Elles sont toujours implantées par une ou plusieurs racines dans une structure osseuse buccale. Les Sélaciens ont une structure et une disposition dentaire très particulières. En revanche, chez les Ostéichthyens tous les os dermiques peuvent porter des dents (prémaxillaires, maxillaires, palatins, ptérygoïdes, vomer, parasphénoïde et dentaire). En revanche, chez les Tétrapodes cette localisation se restreint, en corrélation avec la réduction du nombre de dents, sur deux arcs dentaires, le supérieur formé par les prémaxillaires et les maxillaires et l'inférieur formé par le dentaire (appelé mandibule chez les mammifères). Les dents ont plusieurs rôles :

- Mastication des aliments
- Phonation
- Déglutition
- Esthétique (au moins chez l'homme)
- Préhension
- Contention
- Réservoir de calcium

La seule substance constante dans les dents est un tissu squelettique appelé dentine ou ivoire. Trois autres tissus squelettiques peuvent s'associer à la dentine : l'émail, le ciment et l'émailoïde (voir plus bas).

Chez les non mammaliens, les dents sont en général très nombreuses (**polydontie**) et toutes semblables (**homodontie**). Elles ont alors un rôle de contention et de préhension, jamais de mastication.

En revanche, chez les Mammifères les dents sont peu nombreuses (50 au maximum chez les Marsupiaux et 44 chez les Euthériens). On parle **d'ologodontie** et **d'hétéroodontie** car il y en a peu et elles sont très différentes. En effet, la formule dentaire des mammifères Euthériens est la suivante (pour une héli-mandibule ou héli maxillaire) :

- 3 incisives
- 1 canine
- 4 prémolaires
- 3 molaires

Soit 44 dents au total.

Chez l'homme adulte, le nombre de dents est de 32 : 2 incisives, une canine, 2 prémolaires et 3 molaires par héli-mâchoire (**Figure 46**). En revanche, il n'y a que 20 dents déciduales (des incisives aux prémolaires). Les dents humaines sont composées de 2 jeux : des dents déciduales et des dents adultes (ce qui est caractéristique des mammifères).

L'implantation des dents sur ces os dermiques peut se faire de deux façons différentes :

- Soit par soudure de la racine à l'os dermique : implantation par **ankylose** (poissons

- osseux, Amphibiens, Reptiles non Crocodiliens soit les Sauropsides non Archosauriens)
- Soit par liaison ligamentaire de la racine aux parois des alvéoles : implantation **thécodontes**. C'est le cas des Crocodiliens et des Mammifères. Dans ce cas les racines sont recouvertes de ciment.

*b) Structure des dents : exemple de la dent humaine (Figures 45 & 46)*

Les dents des Vertébrés sont toujours constituées d'une matière dure de coloration gris blanchâtre : la **dentine** ou **ivoire** qui est d'origine dermique n'existe chez aucun invertébrés. La dentine est fortement minéralisée (70 à 75% de la masse sèche, soit plus que les os). C'est la dentine qui donne la forme de la dent. Contrairement aux os et aux cartilages qui possèdent des cellules (ostéocytes et chondrocytes) la dentine est acellulaire, sauf à sa base. Les cellules formant la dentine sont des odontoblastes. Chaque odontoblaste émet un long prolongement cytoplasmique apical autour duquel il sécrète un procollagène qui va être clivé en tropocollagène qui va polymériser en collagène et former ainsi la prédentine. La minéralisation en dentine se fait par dépôt de cristaux d'apatite. La couche de dentine croît en épaisseur par élongation des prolongements cytoplasmiques. Il existe différents types de dentines

Extérieurement, la dentine peut être recouverte par différents tissus. Au niveau de la couronne, elle est recouverte par une substance blanche très dure : **l'émail** qui est d'origine **épidermique**. L'émail est constitué à 98% de sels minéraux, essentiellement sous forme d'apatite, et n'existe chez aucun invertébré contrairement aux cartilages. Chez les Mammifères, l'émail a une structure prismatique et chez les Tétrapodes non mammaliens il est tubulaire. Contrairement à la dentine, dont les cellules restent vivantes après l'éruption de la dent, les cellules qui élaborent l'émail meurent dès que la couche d'émail a complètement recouvert la couronne et atteint son épaisseur normale. Chez les poissons il existe une structure particulière souvent confondu avec l'émail : **émailoïde** qui est d'origine **dermique**.

Au niveau de la racine, la dentine est recouverte par une substance jaunâtre : le **cément** qui est d'origine dermique. Ce ciment recouvre les racines des dents des Crocodiliens et des Mammifères. Chez certains Mammifères, le ciment recouvre aussi la couronne.

À l'intérieur, la dentine est creusée d'une cavité centrale, la **chambre pulpaire**, comblée par un tissu mou et rougeâtre, richement vascularisé et innervé : la **pulpe dentaire**. La cavité pulpaire plus ou moins élargie au niveau de la couronne se poursuit en se rétrécissant dans la racine pour former le canal dentaire qui s'ouvre sur l'alvéole au niveau de l'apex.

Les molaires néandertaliennes sont très souvent taurodontiques. On parle alors de taurodontisme. C'est-à-dire que ces dents présentent un allongement de la chambre pulpaire avec division très distale des racines dentaires. La chambre pulpaire est alors plus volumineuse. Le taurodontisme est considéré comme une malformation chez l'homme actuel, souvent associé à différentes pathologies.

Les dents sont maintenues dans la cavité alvéolaire par des ligaments (les **ligaments parodontaux** ou **ligaments périodontiques**) incorporés dans le ciment et dans l'os alvéolaire. Ainsi, des petits mouvements des dents sont possibles et permet ainsi un bon fonctionnement des dents. Chez certains animaux, certaines dents ont des ligaments parodontaux mobiles. C'est le cas

du cerf des marais asiatique (Hydropotes) qui présente des canines qui oscille lorsque l'animal mâche. Ces ligaments permettent aux dents de supporter de fortes pressions en agissant comme des amortisseurs. En outre, il existe dans ces ligaments des récepteurs sensibles aux variations de pressions. Ces récepteurs permettent de discerner les forces exercées sur chaque dent, pendant la mastication par exemple. En effet, l'émail ne possède aucun récepteur sensoriel par lui-même.

### **Conclusion**

Il existe chez les Vertébrés, donc chez l'homme, 4 types de tissus minéralisés. Ces derniers sont :

- Les os
- Les cartilages
- La dentine
- L'émail

Les deux premiers concernent le squelette et les deux derniers les dents.

Les os sont donc des tissus et / ou organes hautement spécialisés, caractérisés par leur dureté et leur apparentes rigidités, sans pour autant être figés. C'est au contraire, une structure dynamique en perpétuelle remaniement. Il est continuellement produit par les ostéoblastes et détruit par les ostéoclastes. Il est capable de s'autoréparer, d'adapter sa masse, sa forme, et ses propriétés intrinsèques à des modifications d'ordre biomécanique, de supporter une activité physique tout au long de la vie sans pour autant se fracturer ou être source de douleur. Il est le support mécanique essentiel du squelette, permet la locomotion, transmet les forces issues de la contraction musculaire d'une partie du corps à une autre pendant le mouvement et assure la protection des organes internes. Enfin, il joue un rôle extrêmement important dans le maintien de l'homéostasie car il est un réservoir métabolique de sels minéraux, en particulier de calcium et contribue ainsi à la régulation de la composition du fluide extracellulaire via le calcium ionisé.

Les capacités extraordinaires des os est le résultat du tissage entre une protéine (collagène) et un minérale (hydroxyapatite). La première assure la souplesse de l'os alors que le second assure sa rigidité.