

## **ETIOPALEOPATHOLOGIE DU MEMBRE SUPERIEUR Paul Pilardeau**

### **CEINTURE SCAPULAIRE ET MEMBRE ANTÉRIEUR**

#### **1- EVOLUTION DES MEMBRES**

Le passage de la vie marine à la vie semi-aquatique, puis terrestre, a entraîné de très profondes modifications de la musculature satellite des ceintures scapulaire et pelvienne. Les ceintures et les membres des tétrapodes ont pour origine la transformation des nageoires lors du passage de la vie aquatique à la vie terrestre du fait des nouvelles contraintes imposées par la pression atmosphérique (nécessité de supporter la masse corporelle) \*.

\* Des recherches récentes font état d'une hypothèse différente. Des membres primitifs existaient bien avant le changement d'élément eau/air. Les poissons munis de ces appendices les utilisaient pour se déplacer dans les fonds marins. Cette mutation, peut-être neutre pendant cette période, aurait ainsi favorisé certains groupes au moment de l'émergence du milieu liquide.

Quatre étapes peuvent être distinguées :

- Le développement des membres à partir des bourgeons primitifs
- La transformation du membre reptilien transversal en membre mammalien para sagittal
- La spécialisation du membre supérieur chez les primates (abandon de la quadrupédie, apparition de la brachiation, libéralisation de la main).
- L'apparition de la bipédie

Ces quatre étapes se caractérisent essentiellement par des transferts d'insertions tendineuses et des modifications de la physiologie de certains groupes musculaires.

## **+ Développement des membres**

L'apparition du membre, tel que nous le connaissons au Dévonien supérieur chez les Ichthyostégides, représente une étape essentielle du passage entre l'eau et l'air. Dès cette époque la structure des membres antérieurs et postérieurs est calquée sur un schéma comprenant un os au niveau du stylo-pode (humérus ou fémur), deux os au niveau du zeugopode (ulna et radius ou tibia et fibula) et un autopode à cinq rayons correspondant au poignet et à la main (ou à la cheville et au pied). Les gènes régulateurs du système Hox chargés de cette mise en place existent déjà chez les poissons (certains d'entre eux possédaient d'ailleurs des rudiments de membres au Dévonien). Cette constatation a pu être réalisée grâce à l'étude du très célèbre «fossile vivant », le caelacanthé et à l'examen d'ossements fossiles datant de l'Ordovicien moyen. Trois phases ont pu être décrites en fonction du segment concerné, I pour le stylo-pode, II pour le zeugopode et III pour l'autopode. Chez ces premiers poissons (Agnathes) les gènes Hox des phases I, II et III existaient mais seuls les gènes 9 et 10 (phase I) s'exprimaient (présence d'une racine de membre donnant la nageoire). Le stylo-pode et le zeugopode apparaissent lors de l'expression des gènes Hox 11 et 12 (phase II) au Silurien supérieur. Enfin, le gène correspondant à la phase III (Hox 13) achève le membre chiro-dien au Dévonien supérieur.

## **+ Translation des membres**

Chez les premiers Rhipidistiens qui commencèrent à se traîner en rampant dans les zones humides et sur les plages, les membres se trouvaient placés sur les côtés de l'animal, les trois segments dans l'axe, de façon presque horizontale. Le premier rayon (I) était placé en avant, aussi bien au niveau du membre antérieur qu'au niveau du postérieur. Chez les Ichthyoségides du Dévonien les membres subissent une translation et se placent sur les flancs de l'animal. Cette position est encore d'actualité chez les crocodiliens, chéloniens (les tortues), les Urodèles. Cette nouvelle disposition permet de soulever le corps du sol mais présente, sur le plan biomécanique, plusieurs inconvénients. En premier lieu, la position horizontale du stylo-pode forme un bras de levier qu'il faut stabiliser par des muscles puissants et un raccourcissement du segment, deuxièmement, le déplacement est souvent assez lent (exception faite pour les crocodiliens). Chez ces animaux le I (premier rayon) se trouve toujours orienté vers la partie antérieure de l'animal. Contrairement à une idée tenace le nombre de rayons était souvent bien supérieur à cinq, des traces vieilles de 280 millions d'années montrent des empreintes de pattes à sept doigts. L'autopode à cinq rayons, loin de constituer un signe archaïque est donc bien déjà l'expression d'un phénomène évolutif. La

phase suivante consiste à placer les membres en position parasagittale, c'est-à-dire pratiquement sous l'animal. Cette position est mécaniquement très favorable aux déplacements et à la course rapide. D'une part, le Stylo-pode et le Zeugopode sont alignés et permettent une lutte efficace contre la pesanteur, d'autre part les différents segments du membre réalisent un ressort qui transforme l'énergie, et donne à l'animal une grande souplesse d'utilisation de ses bras de leviers pour la course, les sauts et les déplacements rapides. Les masses musculaires des ceintures sont moins importantes, les muscles des membres sont plus longs et plus fins.

Le passage du membre transversal au membre para sagittal se réalise par un mouvement de rotation des membres prenant pour pivot le stylo-pode :

**= Cette rotation s'est effectuée vers l'arrière pour le membre antérieur.** Les condyles huméraux primitivement parallèles à l'axe du corps se trouvent antériorisés (le condyle antérieur devient externe, et vis versa pour le condyle postérieur). Pour ramener le I en position interne les deux os du zeugopode (radius et ulna) doivent nécessairement se croiser. Le radius en position externe au niveau du coude se retrouve en position interne au poignet. Cette torsion n'a pas changé les rapports anatomiques du radius, toujours articulé avec le I.

**= Au niveau du membre postérieur la rotation de 90° s'est réalisée vers l'avant,** plaçant vers l'intérieur le I sans avoir besoin de croiser les os du zeugopode. Cette rotation a eu pour effet de postérioriser les condyles fémoraux (le condyle antérieur se trouve en position interne).

L'étude comparative des os et des reliefs osseux des membres postérieurs et antérieurs montre que le tibia correspond au radius et le cubitus au péroné, mais aussi que l'épicondyle (massif externe du coude) répond au condyle interne du fémur.

### **+ Brachiation**

La brachiation n'a pas fondamentalement modifié les rapports existant entre le zeugopode et l'autopode. Au niveau du membre antérieur (devenu supérieur), la main peut se placer en pronation (comme les quadrupèdes) mais aussi en supination par décroisement des os du zeugopode. Les masses musculaires tendent à se spécifier. La grande liberté des doigts et de la main est obtenue en divisant des groupes musculaires et en différenciant leurs insertions distales. Un

processus du même type, mais moins complet, se met en place au niveau du membre postérieur, notamment en ce qui concerne la pronation.

### **+ Bipédie**

La mise en place de la bipédie n'a eu d'effet que sur le membre inférieur et la ceinture pelvienne (ce ne sont pas les modifications du membre inférieur qui sont à l'origine de ce nouveau mode de déplacement). Le membre inférieur du bipède se caractérise par une réduction du nombre des os du pied, une perte des muscles en rapport avec la fonction de prono-supination, un renforcement des articulations qui perdent en mobilité et des modifications très importantes des angles de travail des différents segments. Les structures de la ceinture scapulaire et du membre supérieur sont identiques à celles mises en place lors de l'acquisition de la brachiation.

## **2- LA CEINTURE SCAPULAIRE**

La ceinture scapulaire, ou ceinture pectorale, permet de rattacher les membres antérieurs (ou supérieurs) au squelette. Cette ceinture est formée de deux pièces mobiles, les omoplates (ou scapula), de deux clavicules, qui relient les omoplates au sternum, et d'un os impair médian, le sternum.

### **+ Mise en place de la ceinture scapulaire**

La mise en place de la ceinture scapulaire chez les mammifères a été réalisée à partir de mécanismes de fusion, de disparition et de spécialisation des os primitifs, les muscles et les tendons s'adaptant avec plus ou moins de facilité à leurs nouvelles fonctions. Chez les primates cette ceinture présente de nombreux caractères communs, quel que soit le mode de vie de l'animal (quadrupède, brachiateur ou bipède). Chez l'homme, la ceinture scapulaire est constituée de deux omoplates auxquelles sont soudées les coracoïdes, et de deux clavicules issues des os crâniens. Comme chez nos ancêtres lointains, l'humérus s'articule avec la scapula. Le seul point d'appui de la ceinture scapulaire sur le squelette est constitué par l'articulation sterno-claviculaire située à l'extrémité proximale de la clavicule. Il s'agit d'une articulation fragile du fait de l'étroitesse des surfaces articulaires. La ceinture scapulaire est particulièrement mobile et nécessite de ce fait pour sa stabilité de très nombreux muscles.

## + Les origines

La ceinture scapulaire est constituée de deux types d'éléments osseux. Le premier, endosquelettique, correspond à une ossification enchondrale (les points d'ossification sont situés au centre d'une structure cartilagineuse, l'ossification se réalise en progressant autour du noyau initial), il concerne la scapula et la coracoïde (apophyse antérieure de l'omoplate). Le deuxième est constitué d'os dermiques (même type d'ossification que les os du crâne). L'ossification de la clavicule, qui appartient à la ceinture exosquelettique, est de ce type, elle dérive du bouclier céphalo-thoracique mis en place chez les poissons du primaire.

### = Ossification endosquelettique

L'ossification de type endosquelettique des Chondrichthyens modernes n'est plus représentée que par deux pièces osseuses, la scapula dorsale et la procoracoïde en position ventrale (os indépendant de forme variable suivant les espèces). Chez les reptiles mammaliens (Synapsides) la scapula change de forme et de position, tandis que la procoracoïde régresse pour laisser place à une structure plus moderne appelée coracoïde, articulée à la scapula (mammifères marsupiaux et les euthériens). Chez beaucoup de mammifères ongulés (cervidés, suidés...) la coracoïde disparaît à son tour pour ne laisser subsister qu'une scapula, grossièrement triangulaire, séparée sur sa face dorsale par une saillie osseuse appelée épine. Chez les primates, les rongeurs et de nombreux mammifères modernes présentant une liberté importante du membre antérieur, la coracoïde se soude au bord supérieur (antérieur) de la scapula pour former l'omoplate. Chez l'Homo et les Australopithèques, la coracoïde n'est plus qu'une apophyse antérieure soudée sur le bord supérieur de l'omoplate. Elle se présente sous forme d'une apophyse digitiforme dirigée en haut puis en avant de la scapula. Son rôle dans la suspension est essentiel chez les brachiateurs. Chez l'enfant, lors de son développement, la coracoïde s'ossifie à partir de trois points initiaux situés à la base, au niveau du coude osseux et au centre du segment horizontal \*. L'ossification définitive se fait par convergence des zones d'ossification, et fusion progressive des noyaux.

\* Il est possible que ces trois points d'ossification correspondent aux vestiges des coracoïdes anciennes (chez certains ancêtres mammaliens on peut trouver trois coracoïdes).

## = Ossification exosquelettique.

Chez les ostéichthyens (poissons osseux), l'ossification exosquelettique est très développée. Elle forme un arc vertical placé derrière les ouïes, comprenant généralement un cleithrum et une clavicule. Cette ceinture se retrouve chez les crossoptérygiens et leurs descendants les tétrapodes, puis disparaît chez de nombreuses espèces de vertébrés (Crocodiliens, Urodèles, Ongulés, Pinnipèdes...), mais persiste chez les oiseaux et les primates, sous forme de clavicules. Par opposition à la scapula et à la coracoïde, la clavicule présente donc une origine osseuse très particulière, issue de la région postérieure du crâne de nos ancêtres poissons. Cette originalité est à rapprocher des caractéristiques morphologiques (déformation des os du crâne et absence de clavicule) des sujets atteints de dysostose cléido-crânienne, maladie décrite en 1897 par Pierre Marie et Sainton.

### + Anatomie

## = Ostéologie

Deux os, l'omoplate et la clavicule, participent à la constitution de la ceinture scapulaire. Les deux omoplates sont situées en position dorsale et «glissent » sur les arcs costaux postérieurs, tandis que les clavicules assurent la liaison entre l'acromion (apophyse osseuse située à l'extrémité de l'épine de l'omoplate) et le sternum placé en position ventrale (antérieure).

### – L'omoplate chez l'homme

Chez les mammifères, la scapula présente une structure plate, et de forme générale triangulaire. L'angle supéro-externe (ou antéro-externe chez les quadrupèdes) est occupé par la cavité glénoïde. Chez les quadrupèdes le grand axe de cette cavité se trouve perpendiculaire au plus grand axe de l'omoplate, alors que chez les bipèdes permanents, ou semi-permanents, l'axe de la coracoïde est parallèle au grand axe de l'omoplate.

La scapula comporte deux faces, une face postérieure (ou dorsale chez les quadrupèdes), convexe séparée en deux fosses par une épine osseuse, et une face antérieure (ou ventrale), concave. Suivant les espèces et leur mode de locomotion, l'importance relative des deux fosses postérieures (sus et sous épineuses) est très différente. Elles sont égales chez de nombreux ongulés fossiles et modernes, et inégales dans un rapport 1/3-2/3 (sus/sous) chez les primates, les Australopithèques et les Homo. L'importance relative de ces deux zones d'insertions musculaires est directement en rapport avec les nécessités motrices

de l'animal (les animaux présentant des capacités rotatoires importantes, notamment en rotation externe de l'épaule, présentent une dissymétrie de ces deux fosses). Les fragments de scapula fossile appartenant à des Australopithèques montrent que ces ancêtres présentaient une fosse susépineuse proportionnellement plus vaste que celle des Homo (fosse dans laquelle s'insère le susépineux, muscle essentiel à la brachiation). L'épine osseuse qui sépare ses deux fosses se termine, chez les espèces possédant une clavicule, par un renflement articulaire appelé acromion. Chez l'homme, l'articulation acromio-claviculaire permet un transfert des forces postérieures appliquées sur la scapula, vers l'avant. La coracoïde (qui ressemble à un corbeau) se présente sous la forme d'un doigt replié en avant. Cette apophyse présente un intérêt majeur chez tous les animaux ayant besoin, soit de stabiliser leur omoplate lors d'exercices en traction du bras (brachiation), soit d'augmenter la force de flexion de l'avant-bras et du bras. Le développement antérieur de cet os, d'une très grande résistance, permet la création d'un bras de levier considérable qui sera utilisé chez tous les primates et chez un certain nombre de rongeurs arboricoles utilisant leurs membres antérieurs pour grimper (écureuil).

#### – La clavicule chez l'homme

Les clavicules (petites clés en latin) se présentent sous forme de deux os longs et aplatis, reliant l'omoplate au sternum. Les clavicules jouent chez l'homme un rôle fondamental de stabilisateur antérieur de la ceinture scapulaire. Les articulations sterno-claviculaires sont en effet les seuls à prendre appui sur le squelette (sternum). Ce double point d'appui permet de fixer sur le plan antérieur les omoplates, notamment lors des mouvements de rotation interne et de rétropulsion de l'épaule. Lors des mouvements de poussée verticale de bas en haut sur le membre supérieur les clavicules limitent l'ascension du moignon de l'épaule. La clavicule constitue un point fixe très intéressant dans la brachiation sans véritablement limiter la mobilité de l'articulation du membre supérieur. Elles donnent insertions à de très nombreux muscles destinés au cou (sterno-cléido-mastoïdien, sterno-cléido-hyoïdien), au bras (deltoïde) et au thorax (grand pectoral).

#### **= Structures ligamentaires de la ceinture scapulaire**

La ceinture scapulaire comprend des ligaments articulaires (sterno-claviculaire, acromio-claviculaire coraco-huméral...), et des ligaments placés entre deux pièces osseuses fixes (acromio-coracoïdien). Sur le plan étio-paléo-pathologique deux ligaments sont particulièrement intéressants à étudier :

## v Le ligament acromio-coracoïdien

Le ligament acromio-coracoïdien humain (et certainement aussi celui des Australopithèques) unit deux pièces osseuses, la scapula et la coracoïde, appartenant à une même structure osseuse, l'omoplate (le plus souvent un ligament relie deux pièces osseuses articulées). Le ligament acromio-claviculaire est tendu entre l'acromion, pour son insertion postérieure, et l'apophyse coracoïde pour son insertion antérieure. Il est constitué d'une lame fibreuse assez large, inextensible et résistante, qui passe en pont au-dessus du tendon terminal du muscle susépineux, fermant ainsi le toit du canal formé par la fosse susépineuse. Sur un plan strictement mécanique ce ligament ne présente chez l'homme aucune utilité décelable. De nombreuses hypothèses ont été proposées pour expliquer la présence de ce ligament à cet endroit. Pour certains auteurs, il s'agirait d'une structure issue de l'aponévrose inférieure du deltoïde, destinée à renforcer les insertions profondes de ce muscle sur l'omoplate, pour d'autres d'une butée fibreuse destinée à limiter l'abduction du bras, notamment lors de la suspension, mouvement très utilisé en brachiation.

Confronté aux processus évolutifs ce ligament pourrait bien être une structure vestigiale unissant deux pièces osseuses anciennement mobiles, la scapula et la coracoïde. A cette époque la présence d'une ou plusieurs coracoïde justifiait en effet la présence de nombreux ligaments aujourd'hui disparus pour maintenir l'union articulaire de ce système. La physiologie du bras humain, telle que nous la connaissons aujourd'hui, montre sans ambiguïté que ce ligament ne sert, ni de renfort aux deux pièces osseuses, ni d'élément destiné à limiter les mouvements du bras y compris lors de l'abduction maximale.

Ce ligament «mal placé» pose de nombreux problèmes aux Homo sapiens sapiens pratiquant une activité physique nécessitant des mouvements répétés de l'épaule (lancers, tirs, lutte, tennis, natation...).

## v Le ligament scapulo-huméral antérieur

Le ligament scapulo-huméral antérieur est tendu horizontalement depuis l'extrémité de l'apophyse coracoïde jusqu'au col de l'humérus. Sa fonction essentielle consiste à limiter les mouvements de rotation externe du bras ainsi que les rétropulsions. Contrairement au précédent, il s'agit donc d'un ligament physiologiquement actif. L'intérêt de ce ligament réside dans l'originalité de sa mise en place au cours de l'évolution. Le ligament scapulo-huméral antérieur est en effet absent chez de très nombreux animaux primitifs, et notamment chez ceux



présentant une coracoïde indépendante ou faiblement développée. Le ligament scapulo-huméral est né de la transformation du tendon terminal du muscle petit pectoral en ligament. Le muscle pectoral, unique chez les synapsides, est un muscle plat, triangulaire s'étendant de la cage thoracique à la partie antérieure de l'humérus. Une étude anatomique plus précise montre que la masse musculaire est formée de plusieurs faisceaux dont les fibres convergent toutes vers le rebord externe de la gouttière bicapitale humérale. Chez les mammifères deux faisceaux peuvent être individualisés, le petit pectoral formé des faisceaux les plus antérieurs et s'insérant sur les premières côtes, et le grand pectoral situé derrière le précédent. Chez les primates, le développement important de l'apophyse coracoïde, en dessous des fibres musculo-tendineuses terminales du petit pectoral, soulève ces dernières qui finissent par se fixer sur cette apophyse. Le petit pectoral se trouve, de cette manière, séparé en deux parties, une partie proximale musculaire tendue entre les côtes et l'apophyse coracoïde, une partie distale fibreuse qui constitue le ligament coraco-huméral.

Cette modification de l'insertion distale du muscle change totalement la physiologie du petit pectoral qui, de rotateur interne du bras (comme le grand pectoral), devient stabilisateur antérieur de l'épaule. Sa contraction ne présente plus aucun effet sur l'humérus. Le développement osseux d'une apophyse primitivement inscrite dans notre génome, si toutefois il s'agit bien de la coracoïde décrite chez nos ancêtres fossiles, se trouve donc à l'origine d'une modification fonctionnelle particulièrement intéressante lors de la brachiation.

### **= Structures musculaires et tendineuses de la ceinture scapulaire**

Les muscles et les tendons de notre ceinture scapulaire sont certainement en place depuis le début de l'apparition des primates. La quadrupédie, la brachiation et la liberté du membre antérieur (devenu supérieur) n'ont fait qu'utiliser au mieux des structures déjà existantes. Chez les poissons et leurs proches descendants les bourgeons myotomiaux se séparent en deux couches réparties de chaque côté du squelette. L'ébauche dorsale donne naissance aux muscles extenseurs et l'ébauche ventrale aux futurs fléchisseurs. En biologie animale, on différencie les muscles extrinsèques chargés d'assurer les liaisons musculaires entre les pièces osseuses de la ceinture scapulaire, et les muscles intrinsèques essentiellement chargés de la locomotion chez les quadrupèdes ou de la mobilité du membre supérieur chez les bipèdes.

– Les muscles extrinsèques chargés de stabiliser la ceinture sont représentés par : les dentelés (grands et petits), chargés de stabiliser l'omoplate

sur son plan de glissement costal, l'élévateur de la scapula, le trapèze et le sterno-cleido-mastoïdien.

### **v Grand dentelé**

Le grand dentelé (ses insertions sur les côtes donnent un aspect dentelé) joue un rôle original dans la dynamique de notre ceinture scapulaire. C'est le seul muscle qui, du fait sa position sous scapulaire, assure un plan de glissement de l'omoplate sur le gril costal. Muscle antigravitaire chez les quadrupèdes, il est devenu un stabilisateur essentiel de l'omoplate chez les primates brachiateurs ou bipèdes.

### **v Trapèze**

Le trapèze est le muscle qui relie, sur la partie antéro-supérieure du dos des quadrupèdes, le rachis cervico-dorsal à l'omoplate. Son rôle physiologique est différent suivant qu'il prend appui sur ses insertions axiales (mobilisation du moignon de l'épaule en avant ou en haut) ou sur l'omoplate (inclinaison et rotation de la tête).

### **v Angulaire de l'omoplate et rhomboïdes**

Ce groupe de muscles relie le bord axial de l'omoplate au rachis dorsal et cervical. Ce sont de tout temps des stabilisateurs postéro-axiaux de l'omoplate.

– Les muscles intrinsèques sont beaucoup plus nombreux du fait de leur rôle moteur. Ils sont divisés en deux groupes : ventral et dorsal.

#### **– Groupe dorsal**

**v Le grand dorsal** (latissimus dorsi) s'étend de la région sacrée, en bas du rachis lombaire à la gouttière bicipitale placée sur la face antérieure de l'humérus. C'est un propulseur chez les quadrupèdes et un rotateur interne de l'épaule chez les bipèdes et les brachiateurs. De son bord antérieur se détache un faisceau qui relie le bord externe de l'omoplate à l'humérus (c'est le grand rond ou teres major) dont la physiologie est superposable à celle des faisceaux antérieurs du grand dorsal. Cette division du latissimus dorsi en deux dans sa partie scapulaire n'apporte pas de véritable avantage fonctionnel.

**v Le sous-scapulaire** (scapulaire interne ou subscapularis) prend naissance dans la fosse antérieure (chez l'homme) ou interne (chez les quadrupèdes) de la scapula pour se terminer comme les deux précédents sur la crête antérieure de l'humérus. Sa fonction est également propulsive ou rotatrice interne suivant le mode de déplacement de l'animal.

**v Le deltoïde** (deltoideus) prend naissance sur le bord supérieur (face externe chez les quadrupèdes) de la scapula et de la clavicule pour former le moignon de l'épaule et se terminer sur l'humérus. Sa fonction est abductrice chez tous les animaux. Il joue un rôle majeur dans la suspension chez les brachiateurs.

– **Le groupe ventral ou antérieur est constitué par :**

**v Les pectoraux** (pectoralis minor et major) naissent du gril costal et s'étendent en éventail vers la région antérieure de l'humérus où ils se fixent, chez les reptiles et la plus grande partie des mammifères. Leur fonction est rotatrice interne et propulsive chez les quadrupèdes, rotatrice interne pour le grand pectoral et stabilisatrice de l'omoplate pour le petit pectoral chez les brachiateurs et les bipèdes.

**v Le supracoracoïdien** (supracoracoïdeus), est un muscle qui reliait initialement la coracoïde à la tête, et à la partie postérieure, de l'humérus. Chez les animaux ayant perdu leur coracoïde au cours de l'évolution (suidés par exemple), ce muscle se postériorise et s'insère dans la fosse dorsale (ou postérieure de la scapula). Il se trouve alors divisé par l'épine de l'omoplate en deux muscles de tailles inégales suivant les espèces, les sus et sous épineux. Chez l'homme les faisceaux les plus inférieurs du sous épineux se séparent de ce muscle pour donner le petit rond (teres minor). L'action de ces muscles varie suivant la physiologie de l'animal. Le sus épineux est abducteur du bras (on parle même du «starter » de l'abduction, tandis que le sous-épineux est rotateurs externes du bras comme le petit rond. Chez les quadrupèdes ces deux muscles, souvent d'égale importance, servent à ramener le membre antérieur en avant pour réaliser une nouvelle foulée.

**v Le coraco-brachial** (coraco-brachialis) s'étend de la coracoïde (chez les dinosaures) ou de l'apophyse coracoïde (chez les primates) à la diaphyse humérale. Sa fonction est l'adduction du membre antérieur. Il joue un rôle très important dans la brachiation, comparable à celui assuré par le court biceps.

## = Physiologie de la ceinture scapulaire

Au cours de notre évolution, la ceinture scapulaire s'est donc profondément modifiée donnant suivant les pressions sélectives des avantages aux quadrupèdes, aux brachiateurs ou aux animaux bipèdes apparus il y a plus de 4 millions d'années. Si certains aspects sont restés excessivement primitifs, comme les rapports rotateurs internes/rotateurs externes, d'autres, au contraire, ont été l'objet d'une véritable spécialisation en rapport avec les nécessités de s'adapter à un nouveau milieu. Sans vouloir sombrer dans le Lamarckisme le plus profond, il semble toutefois que la mise en place de certaines structures réponde à la fois à un processus génétique typique (fusion de la coracoïde à la scapula) et à un processus adaptatif partiel (dimension de la coracoïde). Entendons par-là que les brachiateurs ayant, sans mutation, acquis par simple polymorphisme intraspécifique, une coracoïde plus développée, se sont spontanément trouvés être de meilleurs grimpeurs, et donc certainement les plus aptes à assurer leur survie et leur descendance. Le système de fonctionnement moderne de notre épaule répond encore à de nombreuses exigences anciennes, auxquelles sont venues se surajouter de nouvelles adaptations physiologiques. Le muscle possède en effet cette particularité de pouvoir, en fonction de son emploi, modifier sa force et son volume, mais surtout sa structure intime (modification du rapport régissant les différentes fibres). Physiologiquement, deux types de muscles peuvent être distingués au niveau de la ceinture scapulaire, les muscles moteurs du bras, et les muscles stabilisateurs de la ceinture. Ces deux groupes musculaires travaillent en «chaîne » donnant à la ceinture sa résistance à l'étirement (brachiation) et à la pression (quadrupédie).

On peut définir trois ensembles synergiques à ce niveau :

**v La chaîne postérieure** formée du grand dentelé des rhomboïdes, du grand dorsal, du grand rond, des muscles petit rond et sous épineux.

Les muscles constituant le système postérieur comprennent les muscles fixateurs ou stabilisateurs de l'omoplate au rachis ou au gril costal (rhomboïdes, grand dentelé), et les muscles proprement moteurs du membre supérieur (grand dorsal, grand rond et sous-épineux). La physiologie de cette chaîne est double puisqu'elle concerne aussi bien la rotation externe que la rotation interne. Il s'agit d'un système très ancien, présent chez tous les quadrupèdes. Les physiologies des rhomboïdes et du grand dentelé sont pratiquement identiques, que l'animal soit bipède ou quadrupède (assurer le glissement de la scapula sur le gril costal tout en maintenant son bord axial fermement arrimé au rachis). Chez les brachiateurs,

le travail de cette chaîne s'effectue en traction lors de la suspension alors qu'il était réalisé en course interne chez les quadrupèdes. Il n'existe pas de modifications significatives des insertions au cours de l'évolution animale.

**vLa chaîne supérieure**, constituée du trapèze, de l'angulaire de l'omoplate, du sus-épineux et du deltoïde.

La chaîne antérieure, ou supérieure chez les bipèdes, a pour fonction essentielle l'abduction du bras et la traction du corps quand le mouvement s'effectue en suspension. Les muscles participant à ce travail comprennent, comme pour la chaîne postérieure, des fixateurs de la ceinture scapulaire (trapèze et angulaire de l'omoplate), et des muscles moteurs destinés à l'abduction du bras le sus-épineux et le deltoïde. Ces muscles travaillent en parfaite synergie. Tandis que le sus-épineux plaque la tête humérale dans la cavité glénoïde, le deltoïde assure l'abduction en prenant appui sur une ceinture scapulaire fermement maintenue par le trapèze. Cette chaîne peut être considérée comme la plus spécifique de la brachiation. Chez l'homme, son utilisation abusive pour divers travaux comme le bricolage ou le jardinage, aboutit à de nombreuses pathologies microtraumatiques.

**v La chaîne antérieure**, comprenant le sous-scapulaire, les pectoraux et le coraco-brachial.

La chaîne antérieure est chargée de la rotation interne (grand pectoral, sous-scapulaire), de l'adduction du bras (grand pectoral, coraco-brachial), tandis que le petit pectoral fixe solidement en avant la scapula. Ce système comprend des éléments anciens (grand pectoral) que l'on retrouve chez tous les quadrupèdes et des structures récentes nées de l'allongement de la coracoïde (petit pectoral et coraco-brachial) essentiellement développées chez les brachiateurs.

Naturellement ces trois chaînes musculaires, distinguées dans cet ouvrage pour faciliter l'analyse de leurs évolutions, travaillent toutes les trois simultanément pour assurer la mobilité du membre supérieur et la stabilité de la ceinture scapulaire. Cette analyse montre que les mouvements de liberté donnés au membre supérieur chez les bipèdes ne constituent pas une acquisition récente comme on pourrait le penser. En effet, la nature même de la ceinture scapulaire, uniquement fixée au squelette par les clavicules, donne à cette structure une liberté naturelle que l'on peut retrouver dès le début du mésozoïque chez les dinosaures bipèdes. Son mode de travail actuel semble beaucoup plus résulter de l'abandon des contraintes provoquées par la lutte antigravitaire que d'une évolution

survenue lors de la brachiation. Autrement dit, les primates utilisent de façon moderne une ceinture de conception primitive.

## = **Etio-paléo-pathologie de la ceinture scapulaire des hominiens**

La ceinture scapulaire des hominiens, depuis Lucy jusqu'à nos jours, a très peu évolué sur le plan osseux et musculaire, gardant des stigmates de la marche quadrupède et de la brachiation.

Plusieurs pathologies modernes peuvent être rapprochées de cette inadéquation entre les vestiges de notre longue évolution et les nécessités de la dynamique moderne. Seront successivement traités la dysostose cléido-crânienne, la rupture du susépineux, le déséquilibre rotateurs internes/rotateurs externes, tendinites et contractures, la paralysie du grand dentelé.

### + **Dysostose cléido-crânienne**

Cette pathologie répond à une atteinte chromosomique autosomique dominante. Elle se caractérise par l'association d'une aplasie claviculaire bilatérale et d'une atteinte de l'ossification du crâne

L'atteinte crânienne correspond à une anomalie de l'ossification de la voûte crânienne membraneuse (la fontanelle antérieure peut rester ouverte jusqu'à l'âge adulte). Sur un plan morphologique, le crâne apparaît volumineux et bombé latéralement par deux bosses frontales saillantes. L'aplasie claviculaire, uni ou bilatérale, donne un relief particulier à l'acromion qui apparaît saillant tandis que le moignon de l'épaule semble abaissé et projeté en avant. De dos les omoplates, non stabilisées par les clavicules sont décollées. Le sujet peut en adductant ses bras faire entrer en contact ses deux épaules. Il n'existe pas de troubles fonctionnels majeurs. Cette pathologie ne s'accompagne d'aucun trouble cérébral. D'un point de vue étio-paléo-pathologique, il est vraisemblable que cette double malformation d'origine chromosomique crâne/clavicule, réponde à une atteinte du génome codant depuis le primaire la formation du crâne, et notamment sa partie distale devenue depuis le début du secondaire une clavicule. La migration de la clavicule au niveau de la ceinture scapulaire ne s'est apparemment pas accompagnée d'un éloignement des gènes codant sa mise en place et celle des os du crâne

### + **Rupture du sus-épineux**

La tendinite, puis la rupture du tendon du susépineux, est une pathologie malheureusement classique que l'on retrouve chez les sujets utilisant de façon

répétitive l'abduction de l'épaule (tir au handball, peinture de plafond, nettoyages divers...). Cette tendinite correspond à une inflammation du tendon dans sa partie distale, c'est-à-dire sous le ligament acromio-coracoïdien. Les frottements de la région supérieure du tendon sur la partie inférieure de ce ligament vestigial et inutile, sont donc à l'origine d'une des pathologies de l'épaule les plus invalidantes. La résection chirurgicale du ligament s'avère même inefficace puisque, et c'est un cas assez rare avec les structures ligamentaires, ce ligament se reconstitue après l'intervention, obligeant à une véritable amputation osseuse.

### **+ Coaptation de l'épaule**

Chez l'Homo, le susépineux joue un rôle original, contrairement à ce qui est observé chez les quadrupèdes. Chez les animaux ne présentant pas d'épine dorsale sur l'omoplate, le muscle supracoracoïdien est rotateur interne du membre antérieur. Inversement chez les brachioteurs et les bipèdes érigés, le susépineux (faisceau supérieur du supracoracoïdien) applique la tête de l'humérus dans la cavité glénoïde de la scapula. Ce rôle physiologique très particulier a fait dire de ce muscle qu'il constituait le «starter» de l'abduction. Si pour une raison pathologique locale (tendinite, capsulite...) ou locorégionale (paralysie du nerf sus-scapulaire), le susépineux n'assure plus cette fonction, le sujet se trouve dans l'incapacité totale de prolonger l'abduction du bras au-delà de 90°. Passé cet angle, la coaptation de la tête humérale (élévation de la tête par rapport à la cavité glénoïde) bloque toute velléité d'élévation au-delà de l'horizontale. Il faut noter que l'antépulsion est parfaitement conservée, le sujet peut, en levant son bras devant lui, atteindre la verticale sans douleur du fait de la non intervention du susépineux dans ce mouvement. La fonction assurée par le susépineux est donc relativement moderne. Absente chez les quadrupèdes, elle trouve toute son importance chez les brachioteurs. Il résulte de cette observation que ce n'est donc pas la division de la fosse postérieure (dorsale) de l'omoplate en deux fosses (sus et sousépineuses) qui a modifié la physiologie du susépineux, mais son insertion distale sur l'humérus (les suidés, les équidés et beaucoup d'autres quadrupèdes présentent également une épine dorsale). Il suffirait que son insertion soit située quelques centimètres plus bas sur l'humérus pour que le susépineux retrouve sa fonction de rotateur externe, identique à celle du sous-épineux. Le rôle joué par ce muscle dans l'espèce humaine est donc un souvenir récent de la brachiation.

## + Inadéquation entre les muscles rotateurs

La simple énumération des muscles rotateurs de l'épaule des hominiens montre clairement le déséquilibre des forces susceptibles de s'appliquer sur l'humérus. Outre que trois des rotateurs internes portent le nom de «grand », l'étude morphologique et mécanique de ce groupe musculaire montre la force considérable qu'ils peuvent mettre en jeu comparativement aux deux muscles rotateurs externes.

### . Rotateurs externes

**Sous-épineux**

**Petit rond**

### . Rotateurs internes

**Grand dorsal**

**Grand pectoral**

**Grand rond**

**Sous-scapulaire**

. La mise en place de ce système est, contrairement à ce qui a été vu pour le sus-épineux, très ancienne. Chez les premiers quadrupèdes amphibiens, la propulsion en avant est assurée au niveau de l'épaule par les rotateurs internes. Ces derniers assument donc à la fois une fonction antigravitaire et une fonction propulsive d'autant plus grande que le poids de l'animal est important. Le rôle des rotateurs externes est beaucoup plus modeste, ils assurent essentiellement le repositionnement du membre antérieur en avant. Lors de leur contraction le membre est levé ce qui du même coup supprime la lutte contre la gravitation (mise à part le poids du membre lui-même) et aucune force propulsive ne s'y applique. A cette époque, le système musculaire est d'ailleurs beaucoup plus simple. Les rotateurs internes sont représentés par le pectoralis major, le latissimus dorsi, qui n'a pas encore donné naissance au teres major, et au subscapularis. Quant aux rotateurs externes, il n'en existe qu'un seul le supracoracoïdien. Compte tenu de l'ancienneté de ce système, il apparaît presque normal que de très nombreuses modifications évolutives aient peu à peu transformé notre système rotatoire de l'épaule.



## . Modifications portant sur les rotateurs externes

Le supracoracoïdien a subi trois changements importants lors de son évolution

- v **Un rattachement à la scapula** lors de la fusion de la, ou des coracoïdes.
- v **Une séparation en sus et sous épineux** lors de l'apparition de l'épine de l'omoplate.
- v **Un changement de physiologie** des fibres les plus hautes (sus-épineux) qui deviennent abductrices et non plus rotatrices externes.
- v **Une séparation des fibres inférieures** du muscle qui s'individualise en teres minor sans toute fois changer sa physiologie.

Ces quatre modifications majeures ont eu pour effets : En premier un affaiblissement relatif de la rotation externe du bras. En second, une amélioration des capacités de suspension et d'élévation latérale du bras (abduction).

## . Modifications portant sur les rotateurs internes

Mis à part le subscapularis (sous-scapulaire), resté pratiquement inchangé depuis la nuit des temps, les deux autres muscles ont été profondément modifiés.

v **Le latissimus dorsi** prend de l'importance en s'étendant jusqu'à la ceinture pelvienne. Si sa fonction reste en partie rotatrice du bras, il prend chez les bipèdes une dimension fonctionnelle beaucoup plus grande de maintien de la verticalité. Chez l'homme, il ne possède plus sur l'omoplate qu'une insertion limitée à sa pointe inférieure. Les fibres les plus externes se sont séparé du muscle original pour former un cordon musculaire puissant (le teres major) dont la physiologie reste toujours la rotation interne.

v **Le pectoralis major** subit quant à lui deux modifications essentielles. La première consiste en une simple séparation de ses fibres les plus antérieures (supérieures chez l'homme) qui donnent chez les primates le pectoralis minor. La deuxième concerne l'extrémité du pectoralis minor transformée entre l'apophyse coracoïde et l'humérus en ligament. Cette modification relativement récente modifie totalement la physiologie de ce muscle qui perd tout effet rotatoire sur l'humérus.

Cette dysharmonie entre les rotateurs externes et internes est responsable chez l'homme moderne d'une très riche pathologie. Tout mouvement répétitif en

rotation externe (armer lors des tirs ou des lancers), mouvements de rotation externe contrés sont à l'origine de déchirures de l'insertion du sous-épineux, incapable de résister à des mises en tension importantes. De plus, le déséquilibre agoniste/antagoniste génère des conflits microtraumatiques (simple répétition de gestes identiques même pratiqués sans intensité) connus sous le nom de tendinite des rotateurs ou de la coiffe des rotateurs. Le système des rotateurs a donc été profondément remanié depuis notre sortie des eaux. Si nous reconnaissons encore chez l'homme un reste de quadrupédie, ce dernier s'est trouvé modifié par les acquisitions motrices nouvelles, dont la brachiation constitue certainement la plus importante sur le plan physiologique. Il s'agit d'un système fragile car faiblement adapté aux conditions modernes d'utilisation (chasse, artisanat, sport...). Il est d'autre part certain que notre amie Lucy, ainsi que ses descendants et/ou cousins Homo, présentait un système musculaire rotatoire identique à celui que nous connaissons chez l'Homo sapiens.

### **+ Tendinites et contractures**

La distinction entre tendinite et contracture musculaire est particulièrement intéressante à étudier au niveau de la ceinture scapulaire. Schématiquement, on peut admettre que les muscles stabilisateurs (rhomboïdes, angulaire de l'omoplate, trapèze, petit pectoral) ne sont l'objet que de contractures. Inversement, les extrémités des muscles moteurs (rotateurs, abducteurs et antépulseurs) souffrent de tendinites. Cette dualité de pathologies s'explique par le rôle fonctionnel assuré par ces deux groupes musculaires chez l'homme. Le premier, les stabilisateurs, travaillent le plus souvent en contraction isométrique (taille du muscle inchangée pendant la contraction), alors que le deuxième groupe réalise un travail dynamique en course interne ou externe. Les traitements à appliquer à ces deux groupes est donc totalement différent, décontractant (massage, myorelaxant dans le premier cas), anti-inflammatoire dans le deuxième.

### **+ Paralysie du grand dentelé**

La paralysie du grand dentelé se manifeste cliniquement par un décollement de l'omoplate lors de l'antépulsion du bras à 90°. Cette extériorisation de l'omoplate correspond à l'incapacité que présente le muscle grand dentelé d'assurer sa fonction de stabilisateur postérieur de la scapula. L'origine de cette pathologie résulte d'une atteinte du nerf grand dentelé au niveau de l'inflexion qu'il réalise sur le gril costal. L'irritation de ce nerf a pour étiologie une répétition importante de mouvements provoquant une mobilisation des premières côtes (le plus classique est le service ou le smash au tennis). Cette pathologie, qui s'installe

souvent à bas bruit, est particulièrement longue et difficile à traiter, d'une part du fait de la difficulté à cicatriser du système nerveux, d'autre part de l'amyotrophie qui en résulte. La paralysie du grand dentelé est l'exemple le plus typique de l'inadéquation qui existe entre les capacités fonctionnelles d'un système et la demande motrice qui lui est appliquée.

### **3- LE MEMBRE SUPERIEUR**

Le membre antérieur chiridien comprend trois segments. Le segment proximal, ou stylopode, ne comprend qu'un seul os, l'humérus. Il s'articule avec le zeugopode formé de l'ulna et du radius. Le segment distal, ou autopode, se divise lui-même en basipode (carpe), métapode (métacarpes) et acropode (phalanges).

#### **3-1 STYLOPODE (Bras)**

##### **+ Anatomie**

L'anatomie de ce segment ne comprendra que la description de l'humérus et du biceps brachial, les muscles moteurs du bras ayant déjà fait l'objet d'un développement dans le paragraphe consacré à l'épaule.

##### **= Ostéologie**

Le stylopode ne comprend qu'un seul os, l'humérus. Les muscles moteurs du stylopode ont été étudiés avec la ceinture scapulaire, c'est pourquoi ne seront traités dans ce paragraphe que les tendinites directement en rapport avec une insertion humérale (deltoïde, muscles épitrochléens et épicondyliens). L'humérus est un os court chez les quadrupèdes, et relativement long chez les brachiateurs. Cette morphologie est à rapporter au mode de travail de l'os en pression ou en suspension. La grande longueur de l'humérus chez les brachiateurs donne à ces animaux un bras de levier particulièrement intéressant. Chez les bipèdes, l'humérus est proportionnellement moins long que chez les autres primates. Il est à noter que la rotation du membre antérieur, lors du passage à la position transversale des ceintures, a provoqué une torsion de l'humérus qui présente ses condyles en position antérieure (contrairement au fémur). L'humérus s'articule en haut avec la cavité glénoïde de l'omoplate et dans sa partie distale avec l'ulna par une trochlée (en forme de poulie) et avec le radius par un condyle (du grec kondalos, articulation). Au-dessus de des surfaces articulaires, l'humérus présente deux tubérosités appelées épicondyle du côté externe, et épitrochlée du côté interne.

## = Myologie

Le biceps est un muscle qui s'étend de la scapula et de la coracoïde, au radius sur lequel il s'insère au niveau d'une tubérosité placée en position externe, la tubérosité bicipitale. Chez les mammifères, son extrémité proximale comprend deux chefs, et donc deux tendons. Le court tendon s'insère sur la coracoïde, tandis que le long prend naissance sur le bord antérieur (supérieur) de la cavité glénoïde. Le court biceps descend obliquement devant la scapula avant de rejoindre le long biceps. Chez les primates la longue portion glisse dans une gouttière ostéo-fibreuse placée sur le bord antérieur de l'humérus. Le biceps est un muscle bi-articulaire, fléchisseur de l'autopode (avant bras). Cette fonction se trouve complétée par celle du coraco-brachial dont l'insertion proximale est confondue avec celle du court biceps sur l'apophyse coracoïde.

## = Etio-paléo-pathologie du stylopede des hominiens

Le stylopede (bras) des hominiens ne présente pas de caractères anatomiques évolutifs bien spécifiques. On peut considérer que seule l'utilisation que nous en faisons, en tant que bipèdes non brachiateurs, présente une certaine originalité. Les pathologies affectant ce segment sont donc le plus souvent le résultat de troubles fonctionnels tendineux (biceps, deltoïde) provoqués par une biomécanique à la limite de la physiologie.

### + Rupture du long biceps

La longue portion du biceps des primates coulisse dans une gouttière ostéo-fibreuse placée sur le bord antérieur de l'humérus. Cette gouttière correspond à une adaptation, elle est engendrée par la pression exercée par les fibres tendineuses sur l'os lors de la croissance. La gouttière ostéo-fibreuse est limitée sur sa berge externe par les fibres du grand pectoral, et sur sa berge interne par celles du sous-scapulaire, du grand dorsal et du grand rond. Cette disposition anatomique, uniquement présente chez les animaux brachiateurs ou bipèdes, est à l'origine d'une zone de frottement du tendon contre les éléments osseux et fibreux de la gaine. L'irritation qui résulte de ces frictions itératives provoque dans un premier temps une tendinite puis, secondairement une rupture brutale du tendon. Le muscle rompu (la partie correspondant à la longue portion) se contracte au niveau du tiers inférieur du bras, formant une tuméfaction impressionnante mais indolore. Dans la majorité des cas cette rupture est laissée en l'état, compte tenu de la mauvaise qualité du tendon rompu d'une part, et de l'importance relative des

forces exercées par le long biceps d'autre part (moins de 20% de la force totale). Les infiltrations répétées au niveau de ce tendon ont pour effet immédiat de le fragiliser, favorisant ainsi sa rupture, mais aussi de rendre vaine toute tentative de réparation chirurgicale (tendon nécrosé et dégénéré).

### **+ Tendinite deltoïdienne**

Le deltoïde s'insère sur le bord externe de l'humérus au niveau de son tiers supérieur. Chez l'homme, la forme de l'insertion dessine un V, la pointe tournée vers le bas. La tendinite, (phénomène inflammatoire aigu touchant les fibres tendineuses), répond à une succession de mouvements pratiqués en abduction. Ces mouvements ne sont réellement possibles que chez les primates. L'apparition de cette tendinite répond à un problème mécanique complexe mettant en jeu le muscle susépineux. En effet, quand le bras est descendu le long du corps la contraction du deltoïde, compte tenu du point d'application des forces et de son axe de travail, tend à provoquer une élévation du moignon de l'épaule. Cette dernière ne peut être maintenue en place (appliquée contre la cavité glénoïde) que par l'action du susépineux qui est le fruit, comme cela a été décrit plus haut, d'une innovation évolutive récente. Tout dysfonctionnement de ce système, secondaire à une fatigue exagérée (répétition de mouvements) ou à une pathologie du susépineux, favorise l'apparition de la tendinite deltoïdienne. A l'inverse, quand le bras travaille en suspension le deltoïde exerce son activité en traction, sans risque majeur de voir apparaître cette tendinite.

### **+ Epitrochléite et épicondylite**

Ces deux tendinites siègent de façon symétrique au niveau du coude (l'épicondylite du côté externe et l'épitrochléite du côté interne). Il s'agit d'une inflammation des muscles moteurs du basipode et du zeugopode chargés de réaliser les mouvements de pronosupination et de flexion/extension de la main. L'épicondylite s'appelle également «tennis elbow » et l'épitrochléite «golf, ou javelot elbow ». Ces pathologies se manifestent par des douleurs de type inflammatoire, augmentées lors de la pronation. Ces tendinites apparaissent lors de la répétition des mouvements en pronosupination, les doigts étant serrés sur un objet (manche d'outil, de raquette, de taille haie, prise d'objets\*...). ou lors des appuis en charge la main étant en supination (pompes). Les mouvements de pronation/torsion réalisés en suspension (gymnastique aux agrès ou brachiation) ne provoquent qu'assez peu de tendinites de ce type. Chronologiquement on peut imaginer que l'épicondylite et épitrochléite commencèrent à se manifester avec la pratique de la chasse (lancer de pierre ou d'épieux) et de la taille des outils (du

côté tenant le chopper). C'est donc la libération de la main d'une part, et son utilisation pour de nouvelles tâches d'autre part, qui développèrent les tendinites épicondyliennes et épitrochléennes. Il est clair que ces pathologies signent la non adaptation mécanique de notre coude aux nouvelles contraintes imposées par le changement radical de notre mode de vie et de déplacement. Il n'existe aucun signe patent pouvant faire penser que la physiologie du coude et la dynamique de notre avant-bras ont été l'objet de remaniements importants concernant leur biomécanique entre la période pré-humaine brachiatrice et celle qui donna naissance aux premiers «travailleurs».

*\* La douleur peut être si violente que le simple fait de vouloir soulever un verre d'eau devient impossible*

### **+ Ostéonécrose condylienne**

L'ostéonécrose (ou ostéochondrite nécrosante) est une atteinte osseuse et cartilagineuse centrifuge (partant de l'os vers le cartilage) habituellement retrouvée au niveau des condyles fémoraux, mais tout à fait exceptionnelle au niveau du membre supérieur. Cette pathologie a pour origine une atteinte vasculaire de l'artériole terminale irriguant l'extrémité de l'os, secondaire à des traumatismes répétés en «pression». C'est pourquoi l'ostéonécrose condylienne humérale ne se retrouve que chez les gymnastes qui pratiquent de façon répétée des équilibres sur les mains, transposant ainsi leur charge corporelle sur les membres supérieurs. L'ostéonécrose condylienne laisse sur les ossements fossiles ou non des cicatrices très bien reconnaissables. C'est ainsi que nous avons pu noter que cette pathologie touchait, depuis la sortie de la mer nourricière, la totalité des espèces de vertébrés terrestres (amphibiens, sauriens, mammifères...) avec cependant une répartition très différente suivant le mode de vie de l'animal. Les bipèdes, permanents ou non, ne présentent des lésions qu'au niveau des membres postérieurs, les quadrupèdes sont également touchés aux quatre membres, les brachiateurs semblent méconnaître ce type de lésion (travail en étirement et non pas en pression). Cette pathologie, présente sur terre depuis plusieurs centaines de millions d'années, correspond à une inadéquation entre les contraintes de la gravitation appliquée à l'os et ses capacités à assumer cette charge compte tenu de sa structure et de sa vascularisation. Si cette pathologie existe chez tous les fossiles terrestres, il n'a pas été possible de mettre en évidence de relation directe entre, la fréquence d'apparition des lésions au sein d'une espèce, et le poids (ou la taille) des animaux. Cette remarque peut s'interpréter de trois manières :

- + Soit le rapport qualité fonctionnel de l'os/poids est variable d'une espèce à l'autre,
- + Soit l'échantillon est encore trop faible pour discerner une différence entre les espèces,
- + Soit enfin certains de ces animaux vivaient une partie de leur temps immergés dans l'eau (hippopotames) diminuant ainsi spontanément les contraintes appliquées aux membres porteurs.

En ce qui concerne l'espèce humaine, il est clair que l'ostéochondrite humérale relève d'une incapacité de notre articulation à prendre en charge le poids du corps sans y avoir été «préparée » pendant la phase de croissance.

### **3-2 ZEUGOPODE (Avant-bras)**

#### **+ Anatomie**

Le zeugopode est constitué de deux os : le cubitus (ulna) et le radius. Ces deux os présentent la particularité d'être croisés entre le coude et le poignet, du fait de la rotation imposée au membre antérieur lors de la mise en place des appuis sagittaux. Ainsi, la tête de l'ulna, en position interne au niveau du coude, se retrouve en position externe au niveau du poignet, et inversement pour le radius. La motricité du zeugopode est assurée par des muscles longs prenant leurs insertions sur l'humérus (triceps et brachial antérieur) et sur la scapula (biceps). En outre, le zeugopode est le segment de membre comprenant le plus grand nombre de muscles (ces muscles, destinés au carpe ou à la main, prennent leurs insertions sur l'humérus et/ou les deux os de l'avant bras mais ne participent pas directement à la motricité du zeugopode). Cette particularité peut s'expliquer par la très grande liberté et l'extrême mobilité de la main acquise dans les mouvements depuis l'abandon de la quadrupédie.

#### **= Ostéologie**

Les deux os constituant le zeugopode sont présents chez les vertébrés dès l'apparition des premiers amphibiens. Dans ce domaine l'évolution du squelette humain est restée très primitive et non spécifique d'un comportement moteur particulier, comme cela est le cas chez les oiseaux, les ongulés et les mammifères marins. Au niveau du coude, la pièce osseuse chargée de limiter l'extension est directement fixée sur le cubitus. Il s'agit de l'olécrane (en grec littéralement «tête du coude ») qui présente lors de la croissance de l'enfant un noyau d'ossification propre. La disposition de ces deux os donne aux brachiateurs et aux bipèdes une

très grande mobilité du poignet et de la main. Cette grande liberté est acquise grâce à l'absence de contact entre le cubitus et les os de la première rangée du carpe. Comme pour l'humérus, l'aspect et la longueur de ces os diffèrent suivant le mode de déplacement de l'animal, massifs et courts chez les quadrupèdes, ils sont fins et longs chez les primates.

### **. Cubitus**

Le cubitus (ulna) est un os long situé sur le bord interne de l'avant bras. Il s'articule en haut par une trochléenne avec l'humérus, et sur son bord externe avec le radius. Le cubitus se prolonge par une apophyse osseuse postérieure, l'olécrane, qui présente deux facettes articulaires antérieures (image en miroir de la trochlée humérale). Sur son bord postérieur rugueux, l'olécrane donne insertion au triceps brachial. Le corps de l'os, en forme d'un S italique, comprend trois faces qui donnent insertion chez l'homme au fléchisseur commun profond des doigts, au long fléchisseur du pouce, au carré et rond pronateurs, au court supinateur et au brachial antérieur pour la face antérieure, au fléchisseur commun profond pour la face interne, à l'anconé, au long abducteur du pouce, au long extenseur du pouce, au court extenseur du pouce, au court supinateur, au cubital antérieur et au cubital postérieur pour la face postérieure. Son extrémité inférieure plus grêle se prolonge par une apophyse, dite styloïde interne. Cette extrémité présente une facette articulaire destinée au contact avec le radius, elle donne insertion au ligament triangulaire tendu entre cet os et le carpe. Le cubitus ne présente pas d'articulation avec les os du poignet. Du fait de sa forme (évasée en haut et frêle en bas), le cubitus présente une grande fragilité au niveau de son apophyse styloïde et de son tiers inférieur.

### **. Radius**

Le radius est le plus externe des deux os de l'avant bras. Il s'articule en haut avec l'humérus, par une cupule et un condyle, et sur le bord interne avec le cubitus. Le corps du radius augmente progressivement de taille du haut en bas. Il se termine par une extrémité volumineuse qui s'articule en dedans avec le cubitus et en bas avec la première rangée du carpe (scaphoïde, semi-lunaire). Sous le col, le radius présente une tubérosité externe qui donne insertion au tendon distal du biceps. La face antérieure du radius donne naissance au court supinateur, au fléchisseur superficiel, au long fléchisseur propre et au carré pronateur. Sa face postérieure donne des insertions pour le court supinateur, le long abducteur du pouce, le rond pronateur et le court extenseur du pouce.



## = Myologie

Les muscles moteurs du zeugopode peuvent être fonctionnellement divisés en deux groupes, les muscles assurant la flexion/extension, et ceux prenant en charge la pronosupination \*. Les premiers prennent leurs origines sur la ceinture pectorale (biceps, triceps), et/ou sur l'humérus (brachial antérieur, triceps). Les seconds comprennent deux muscles pronateurs (le carré et le rond), et deux muscles supinateurs (le long et le court).

\* *Pronation : la paume de la main est tournée vers le sol, comme pour «prendre».* *Supination : la paume de la main est orientée vers le ciel comme pour «supporter».*

### – Flexion/extension

Les muscles assurant la flexion/extension du zeugopode se divisent en deux groupes, un groupe ventral, et un autre dorsal.

#### . **Muscles ventraux**

Ce groupe est formé de deux muscles, le biceps brachial, ou biceps brachii (déjà traité), et le brachial (brachialis).

+ **Le biceps** est fléchisseur et rotateur externe du zeugopode.

+ **Le brachial antérieur** s'insère sur la face antérieure de l'humérus, franchit le pli du coude et se termine sur l'ulna au niveau de l'apophyse coronoïde. Il est fléchisseur du zeugopode sur le stylopede. Comme le biceps, il joue un rôle très important chez les brachiateurs. Chez les quadrupèdes, il est antagoniste du triceps brachial.

#### . **Muscles dorsaux**

Chez les reptiles, un seul groupe musculaire occupe la loge dorsale du stylopede, le triceps brachial ou triceps brachii. Ses fibres s'insèrent sur l'humérus pour deux des trois chefs (vaste externe et interne) et sur la coracoïde (ou la scapula chez les primates) pour la longue portion du triceps \*. Il se termine sur le sommet de l'olécrane (extrémité de l'ulna). Il s'agit pour la longue portion d'un muscle bi-articulaire. Le triceps brachial est extenseur du zeugopode sur le stylopede (de l'avant-bras sur le bras). Chez les quadrupèdes, il travaille comme muscle

antigravitaire, chez les brachiateurs, il est utilisé lors de la suspension bras tendu. Chez les primates, il existe un autre muscle postérieur situé dans la région distale de l'humérus, l'anconé, muscle court et triangulaire qui s'étend de l'épicondyle à la face latérale externe de l'olécrane. Comme le triceps, ce muscle est extenseur de l'avant-bras. Son origine paléontologique peut se discuter, mais il semble bien qu'il soit issu du groupe des extenseurs longs de l'autopode. Il s'agirait dans ce cas des fibres les plus proximales de ce muscle primitif. Toutefois, la localisation plus postérieure de son insertion sur l'épicondyle (chez l'homme cette insertion est nettement individualisée) de même que l'orientation de ses fibres (obliques vers le haut), pourraient également en faire un muscle original équivalent du muscle poplité du membre inférieur.

*\* Chez les primates l'insertion de la longue portion se situe sur l'omoplate juste en dessous de la cavité glénoïde (symétrique de la longue portion du triceps). Chez les animaux présentant une coracoïde indépendante, cet os ne se présente jamais devant la scapula, comme chez l'homme, mais en position externe. La longue portion du triceps peut ainsi se placer derrière le stylopode.*

#### – Muscles de la pronosupination

On compte chez l'homme deux muscles pronateurs et deux supinateurs.

#### **– Muscles pronateurs**

**Le carré pronateur** est tendu entre le radius et l'ulna au niveau du 1/3 inférieur de l'avant bras sur sa face antérieure. Ce muscle, qui n'existe que chez les brachiateurs et les bipèdes permanents ou non, n'existe pas (ou plus) au membre inférieur et chez les quadrupèdes.

**Le rond pronateur** est un muscle épais et puissant situé dans la partie la plus externe des muscles épitrochléens. L'origine de ce muscle peut être retrouvée dans les fibres les plus hautes des fléchisseurs longs déjà existants chez les amphibiens. Le rond pronateur s'insère au niveau de l'épitrochlée et, par un faisceau inconstant, sur l'apophyse coronoïde du cubitus. Il descend obliquement en dehors pour se fixer sur la partie moyenne du radius. Le rond pronateur est, comme son nom l'indique, pronateur (il place la main et le poignet vers le sol). Ce muscle pose un problème d'origine.

Deux hypothèses peuvent être formulées :

– Le rond pronateur existait chez tous les vertébrés aux membres antérieurs et postérieurs, mais a régressé au niveau des membres postérieurs du fait de son inutilité en se transformant en membrane fibreuse.

– Ce muscle n’existait pas et s’est différencié à partir des muscles ventraux de l’avant-bras chez les brachiateurs et les bipèdes.

Si l’on considère le caractère mécanique de ces deux muscles, il est clair qu’en l’absence total de fonction, comme c’est le cas chez les quadrupèdes (membres en charges sans possibilité de prono-supination) une telle structures dégénère très vite. Il ne s’agit pas dans ce cas de processus lié a une mutation (on peut supposer que tout est en place chez l’embryon), mais plutôt d’une absence d’induction. Sans pronosupination lors des premiers jours de la vie, le muscle ne se développe pas. Cette hypothèse expliquerait facilement l’absence de ce muscle aux membres antérieurs et postérieurs des quadrupèdes ainsi qu’aux membres postérieurs des bipèdes. La deuxième hypothèse envisage un processus classique en évolution musculaire, la scission de deux faisceaux musculaires provenant d’un même chef mais présentant, du fait de leurs insertions sensiblement différentes, des physiologies totalement divergentes (c’est le cas pour le sus et le sous épineux). Il est donc possible de penser que le grand et le petit palmaire, le cubital antérieur et le rond pronateur se sont différenciés à partir des muscles épitrochléens présents chez les premiers amphibiens.

#### – Muscles supinateurs

**Le court supinateur** naît de l’épicondyle et de la surface sous sigmoïdienne de l’ulna (cubitus) par une lame aponévrotique pour aboutir : au col du radius juste au-dessus de l’insertion du biceps, et dans une zone du radius située immédiatement sous la précédente. Ce muscle est le principal supinateur de la main.

**Le long supinateur**, bien qu’il porte ce nom, n’est supinateur que quand l’avant bras est en pronation complète. Sa principale fonction reste la flexion de l’avant bras. Le rond pronateur est un muscle qui n’existe que chez les animaux présentant la liberté (au moins partielle) du membre supérieur (bipèdes ou brachiateurs) et capables, du fait de leur anatomie, de réaliser le mouvement de prono-supination. Il ne présente pas d’équivalent chez les quadrupèdes et est absent des membres inférieurs des bipèdes. De ces deux fonctions, pronation et supination, la pronation est celle qui présente le plus de force à la fois en traction et en

contraction interne, la supination est la plus originale, elle n'existe que chez les espèces utilisant le membre supérieur pour d'autres tâches que la propulsion.

### **Mise en place de la prono-supination**

La pronation (paume de la main tournée vers le sol), et la supination (paume tournée vers le haut), sont possibles grâce aux articulations du coude et du poignet. La prono-supination donne à l'animal une liberté de mouvement des membres inégalée dans la nature. Cette innovation, indépendante du développement de la bipédie (les bipèdes du secondaire ne semblent pas en possession de la supination) améliore considérablement le mode de déplacement et surtout la biomécanique de la main. L'utilisation de l'autopode chez les premiers quadrupèdes pour se déplacer se fait toujours d'une manière identique (zeugopode vertical, basipode en extension, métapode et acropode posés à plat sur le sol), c'est-à-dire l'autopode en pronation. Ce n'est que beaucoup plus tard que des spéciations secondaires à des mutations feront apparaître les modes plantigrade, digitigrade, ou onguligrade, ainsi que les transformations en aile ou en palette natatoire. La pronation étant acquise dès le début, c'est donc la supination qui constitue l'originalité de la biomécanique du poignet et de la main. Pour pouvoir se développer, et présenter un caractère fonctionnellement intéressant, plusieurs éléments doivent conjuguer leurs particularités :

**v L'articulation du poignet** doit être libre d'un des deux os de l'avant bras. Cette liberté est assurée par l'absence d'articulation classique entre l'ulna et les os du poignet. Ce système, maintenu en place par des ligaments très résistants et une articulation rudimentaire cubitus/radius chez les primates, permet à l'ulna de «tourner» sensiblement sur le radius. La liberté du poignet est acquise au dépend de la solidité du système.

**v Le radius et le cubitus** doivent être articulés au niveau du coude. Chez les chiroptères les articulations humérus/cubitus et humérus/radius sont présentes. A partir de ce modèle initial trois modes d'évolution peuvent être distingués. Le premier consiste en une fusion ulna/radius qui renforce le zeugopode, mais interdit toute supination. Le second en un abandon de l'articulation du radius avec l'humérus (ce type d'évolution reconnaissable chez certains quadrupèdes du secondaire donne une assise considérable à l'ulna, et surtout une grande stabilité au coude). Enfin le troisième mode consiste en la création d'une articulation très mobile entre le radius et l'ulna, c'est le cas chez les primates et un certain nombre de rongeurs.

v **Les muscles moteurs** doivent pouvoir réaliser indépendamment, et de manière agoniste/antagoniste, la supination et la pronation.

v **Les doigts** doivent être libres, et si possible opposables

L'ensemble de ces aménagements existe chez les primates et donne à ces animaux une agilité et une précision manuelle qui furent longtemps considérées comme l'élément moteur de la cérébralisation.

## = **Etio-paléo-pathologie du zeugopode**

Trois pathologies feront l'objet d'un développement, la tendinite du triceps, la rupture du ligament triangulaire, la tendinite distale du biceps.

### + **Tendinite du triceps**

La tendinite distale du triceps (au niveau de son insertion sur l'olécrane) est une pathologie plus rare que la tendinite du biceps. Elle survient chez les individus pratiquant des exercices en extension forcée de l'avant bras (comme la pratique des fameuses «pompes » ou les mouvements de développé/couché). Elle se manifeste par une douleur postérieure du coude siégeant en regard de l'insertion du triceps sur l'olécrane (ce dernier est l'équivalent mécanique, au coude, de la rotule pour le membre inférieur). Très faiblement stimulé (autrement qu'en extension passive chez les brachiateurs) le triceps a perdu depuis longtemps les caractéristiques qui en faisait un muscle antigravitaire majeur chez les quadrupèdes. La remise en charge artificielle du membre supérieur chez les bipèdes, et la stimulation «anormale » de ce muscle non entraîné à travailler en extension active, créent ainsi un déséquilibre entre la résistance du tendon et les charges appliquées. Nous sommes actuellement incapables physiologiquement de redonner à ce système sa fonction antérieure.

### + **Tendinite distale du biceps**

Cette tendinite se manifeste par des douleurs siégeant au niveau de l'apophyse bicipitale du radius. Il s'agit toujours d'une atteinte microtraumatique secondaire à des exercices pratiqués en traction. Chez l'homme moderne la tendinite distale du biceps se rencontre lors des suspensions/tractions (barres fixes ou asymétriques) et des flexions répétées en charge de l'avant bras (exercice de musculation avec des haltères). Cette tendinite est le résultat d'une utilisation

itérative trop intense du tendon. Inconnue chez les quadrupèdes, elle ne se manifeste pas non plus chez les singes brachiateurs ou les très jeunes gymnastes du fait de la faiblesse de la masse corporelle au regard de la résistance du tendon. L'augmentation de notre taille, et parallèlement de notre poids, ne nous permet plus de jouer les «Tarzan » sinon en prenant le risque de traumatiser le tendon distal du biceps. Ce n'est donc pas dans ce cas notre bipédie ou une quelconque modification biomécanique de notre coude qui est en cause, mais bien la résistance maximal d'un tendon à l'étirement confronté à l'augmentation de notre masse corporelle.

### **+ Rupture du ligament triangulaire**

Cette pathologie, inexistante chez les brachiateurs, est spécifique des bipèdes utilisant leur main et surtout leur avant-bras pour des exercices répétitifs générateurs de microtraumatismes. La rupture survient sur un mouvement violent en hyper flexion dorsale du poignet ou lors d'un mouvement de rotation (aux barres asymétrique au moment du lâcher de barre) mettant le tendon fragilisé en charge. L'articulation radio-cubitale basse (ulno-radiale distale) répond à une triple nécessité. En premier lieu, unir les deux os de l'avant-bras en limitant leur écartement, en second permettre le glissement du radius sur l'ulna lors de la prono-supination, enfin assurer une bonne stabilité entre les os du carpe (basipode) et du zeugopode. Cette tâche difficile, qui nécessite d'allier résistance et malléabilité, est confiée en grande partie à un ligament, le ligament triangulaire. Le ligament triangulaire est tendu entre la tête du cubitus, et la cavité sigmoïde du radius d'une part, et les capsules articulaires radio-cubitale et radio-carpienne d'autre part, où il joue le rôle de «surface articulaire » entre le cubitus et le carpe. Au niveau du tarse, il correspond anatomiquement aux ligaments péronéo-tibiaux antérieurs et postérieurs. La rupture de ce ligament survient lors des mouvements de torsion forcée de l'avant-bras ou lors des chutes sur le talon de la main par écartement des deux os de l'avant-bras (le carpe entrant comme un coin dans l'articulation radio-cubitale inférieure). Ce ligament, inexistant chez les quadrupèdes, aurait pour origine une structure fibreuse non articulaire, unissant les deux os du zeugopode, résultat d'un bricolage évolutif étonnant. Deux étapes ont dû se succéder lors de sa mise en place :

– Dans un premier temps, un raccourcissement par mutation de l'ulna provoquant d'une part, la perte de contact entre le basipode et le zeugopode, et d'autre part une beaucoup plus grande mobilité de l'articulation du carpe (condition nécessaire à l'acquisition de la prono-supination).

– Dans un second temps, un glissement adaptatif des structures ligamentaires locales par le mécanisme bien connu du renforcement capsulaire (les capsules articulaires développent, au niveau des zones de tension, un épaissement de leur structure formant de véritables ligaments).

Le ligament triangulaire, résultant de ces processus évolutifs, reste une structure fragile et surtout difficile à traiter en cas de rupture du fait de son caractère articulaire.

### **3-3 AUTOPODE (Poignet main)**

#### **+ Anatomie**

L'anatomie de l'autopode est l'une des plus complexes du corps humain, à la fois au plan structural et fonctionnel, mais aussi au regard des processus évolutifs.

#### **= Ostéologie de l'autopode**

L'autopode chiridien (Dévonien) est subdivisé en trois ensembles, le basipode qui correspond au carpe, le métapode ou métacarpe, et l'acropode constitué des phalanges.

#### **3-3-1 BASIPODE**

Le basipode est une articulation peu mobile dans ses différents degrés de liberté, mais dont le rôle central entre l'avant-bras et le métapode est fondamental pour assurer les différentes fonctions de la main. Il comprend chez les premiers Ichthyostégides une dizaine d'os courts disposés en trois rangées osseuses :

**La première rangée** comprend trois os, le radial, l'intermédiaire et l'ulnaire.

**La deuxième rangée** est formée de quatre os appelés «centraux »

**La dernière rangée**, la plus distale comprend cinq os, les carpiens.

Chez les mammifères, le nombre et la forme des os du carpe ont été constamment remaniés suivant les caractères adaptatifs de l'animal à une fonction (vol, nage, course, brachiation). Si l'on excepte les siréniens, chez qui l'évolution a augmenté

de façon importante le nombre de doigts, les os carpiens ont régressé dans toutes les espèces, y compris chez les primates. Les primates actuels présentent huit os répartis en deux rangées. Cette régression peut être le fruit de fusions ou de disparition pur et simple

La mise en place de ce système radié remonte aux premiers tétrapodes. Elle résulte, via l'induction de gènes Hox, d'une succession de dichotomies partant des deux os de l'avant bras et gagnant de proche en proche le poignet. Suivant cette hypothèse récente, le scaphoïde et le semi-lunaire seraient les seuls os correspondant au bourgeon radial, tandis que les autres os du poignet, du métacarpe et des doigts auraient pour origine le bourgeon ulnaire. L'axe de formation (par inductions successives) partant de l'ulnaire s'incurve pour donner en premier l'auriculaire, puis les autres doigts, pour terminer par le premier rayon (pouce\*).

*\* La taille réduite de l'auriculaire, souvent considérée comme un signe de régression, prodrome d'une disparition annoncée, n'est naturellement plus valide dans cette hypothèse.*

### **v Première rangée (proximale)**

Cette rangée comprend, du premier rayon (pouce) au cinquième rayon (petit doigt), le scaphoïde (de skaphoeidés «bateau » en grec \*), le semi-lunaire (lunatum), le pyramidal (triquetrum) et le pisiforme (en forme de poisson).

*\* La forme particulière de cet os, a beaucoup inspiré les anciens, grecs et latins, puisque à Rome cet os était appelé «naviculare », diminutif de «navis », bateau en latin. On retrouve cette racine dans l'appellation «os naviculaire », encore utilisée de nos jours.*

Si l'on compare la structure moderne du poignet au carpe chiridien, la correspondance peut être la suivante : L'os radial a donné le scaphoïde (il est possible que le premier os central ait fusionné avec le radial), l'intermédiaire correspond au lunatum, l'ulnaire au pyramidal, et le cinquième carpien au pisiforme.



<b>Radial</b>	<b>Scaphoïde</b>
<b>I er central</b>	
<b>Intermédiaire</b>	<b>Lunatum</b>
<b>Ulnaire</b>	<b>Pyramidal</b>
<b>Vè<sup>me</sup> carpien</b>	<b>Pisiforme</b>

*Correspondances possibles entre les os de la première rangée du carpe*

### v Deuxième rangée (distale)

Chez les primates la deuxième rangée du carpe comprend du V vers le I : l'os crochu, le grand os (capitum), le trapézoïde et le trapèze. Le schéma évolutif fait correspondre le trapèze au premier carpien, le trapézoïde au deuxième central et au deuxième carpien, le grand os au troisième et quatrième centraux et au troisième carpien, et l'os crochu au quatrième carpien. Une autre hypothèse peut faire naître cet os de la fusion des quatrième et cinquième carpiens, tandis que le pisiforme pourrait correspondre au post minimus retrouvé chez les Urodèles. Chez l'homme moderne, chacun de ces os se développe avec un seul point d'ossification, à l'exception du scaphoïde qui en possède deux. Cette observation peut être à l'origine d'une autre hypothèse concernant l'évolution des os du carpe. Suivant ce schéma, seul le scaphoïde serait le résultat d'une fusion (radial + 1 er central) ou (radial + intermédiaire suivant Leboucq), les autres os (une partie des centraux et des carpiens disparaissant totalement).

<b>I er Carpien</b>	<b>Trapèze</b>
<b>II<sup>ème</sup> central</b>	<b>Trapézoïde</b>
<b>II<sup>ème</sup> carpien</b>	
<b>III<sup>ème</sup> central</b>	
<b>IV<sup>ème</sup> central</b>	<b>Grand os</b>
<b>III<sup>ème</sup> carpien</b>	
<b>V ème carpien</b>	<b>Os crochu</b>

*Correspondances possibles entre les os de la deuxième rangée du carpe*

L'apparition des points d'ossification, très variable d'un os à l'autre, s'étend de 1 an et demi pour le grand os, à 12 ans pour le pisiforme. Ce développement tardif présente des conséquences importantes sur la morphologie des os donnant appui à des insertions musculaires ou tendineuses (pisiforme, scaphoïde, os crochu, grand os, trapèze et trapézoïde). Les zones d'insertion cartilagineuse sont en effet

dans ce cas soumises pendant de très longues années aux forces exercées par les muscles prenant appui dessus. Chez les primates, l'os crochu développe son apophyse unciforme du fait des forces exercées par le court fléchisseur et l'opposant du pouce. Si lui-même est programmé génétiquement, sa forme est modelée plus tardivement par l'effet des tendons, il s'agit d'un processus adaptatif. De la même façon, le pisiforme, réduit à une portion congrue au niveau du carpe humain, peut se développer de façon considérable si les forces exercées par l'extensor carpi sont importantes. C'est le cas chez les plantigrades (ursus speleus ou ours des cavernes) dont le pisiforme est volumineux et possède une apophyse postérieure très saillante, destinée à l'insertion de ce muscle directement associé à la marche (il ressemble précisément au calcanéum de cet animal). Chez l'homme, les tractions relativement faibles exercées par le cubital antérieur sur cet os n'influent pas sur le développement du pisiforme qui garde un aspect relativement indifférencié (ovalaire).

L'articulation médio-carpienne (entre les deux rangées du carpe) moderne est le siège de nombreux mouvements (flexion, extension, inclinaison, circumduction et rotation) limités dans leurs amplitudes. Elle représente à elle seule près de 50% de l'ensemble des mouvements du carpe (les 50% restant étant sous le contrôle de l'articulation radio-carpienne). Cette grande liberté, proche de celle de l'épaule des primates, n'a été acquise qu'au prix d'une perte considérable de la résistance.

### **3-3-2 METAPODE ET ACROPODE**

Depuis le Dévonien ce segment du membre supérieur est resté, chez les pentadactyles (cinq doigts), d'une stabilité désespérante. La «non évolution» de ce segment (cinq rayons, trois phalanges par doigt excepté le pouce qui n'en comprend que deux), fait de lui la structure la plus primitive de notre squelette. Le caractère «humain» de la main, élément de développement extraordinaire de notre espèce, ne porte donc pas sur son ostéologie, mais sur son innervation et sa motricité.

#### **+ Muscles moteurs de l'autopode**

L'importante mobilité de l'autopode chez les primates n'a pu se réaliser qu'à partir d'une très grande diversité de fonctions musculaires développées au cours des temps. Contrairement à ce qui sera observé au niveau du membre postérieur, les muscles fixés sur le zeugopode, et chargés de la mobilité de l'autopode, vont subir une évolution buissonnante complexe donnant à la main des primates une gamme de fonctions très étendue, mais aussi une grande fragilité. Trois fonctions essentielles peuvent être définies, la pronosupination (décrite dans le paragraphe

précédent), l'extension et la flexion. Les muscles fléchisseurs sont placés en position ventrale, et les muscles extenseurs en position dorsale.

### = **Muscles ventraux**

Chez l'homme les muscles ventraux sont dits «antérieurs ». Ces muscles prennent leurs insertions proximales sur l'humérus, les deux os de l'avant bras et sur les os de l'autopode.

#### – Muscles avec insertion sur l'humérus

Ces muscles constituent le groupe des longs fléchisseurs. Ils prennent leur origine sur l'humérus, au niveau du condyle interne (épitrochlée), et se terminent au niveau de l'autopode (basipode et acropode) par une très large aponévrose, dite aponévrose palmaire. Chez les mammifères, cette aponévrose se scinde en plusieurs tendons qui se terminent à l'extrémité des phalanges. Chez les primates, et l'homme en particulier, ces muscles se sont différenciés en trois groupes, un fléchisseur des doigts proprement dit (fléchisseur commun profond), deux muscles se terminant au niveau de l'aponévrose palmaire (grand et petit palmaires) tous deux fléchisseurs de la main, et le cubital antérieur, à la fois fléchisseur de la main et adducteur, qui se fixe sur le pisiforme. A ces muscle épitrochléens il convient d'ajouter un muscle issu de l'épicondyle, le long supinateur, tendu de l'épicondyle à l'extrémité inférieure de l'ulna dont la fonction est double (fléchisseur et supinateur). L'évolution globale de ce groupe musculaire a essentiellement porté sur un découplage des fléchisseurs originaux et une différenciation distale de leurs tendons (l'aponévrose originale reste importante mais une partie de cette structure a donné naissance à des tendons différenciés).

#### – Muscles ne prenant pas leur insertion sur l'humérus

Ils comprennent des muscles longs issus du fléchisseur court et prenant leurs insertions sur le radius et l'ulna et des muscles très courts (muscles de la main) prenant leurs insertions sur les os du carpe et les métacarpiens.

**Le premier groupe** est constitué de plusieurs fléchisseurs courts prenant leurs insertions sur le radius et sur l'ulna. Au nombre de cinq, chez les amphibiens et les reptiles, le nombre de ces fléchisseurs régresse chez les mammifères pour former un fléchisseur commun et un fléchisseur propre du pouce. Chez les primates on constate un allongement de ces muscles du fait du développement des

tendons distaux. Pour cette raison la nomenclature ne parle plus de fléchisseurs courts, mais de fléchisseurs communs profonds. Leurs insertions tendineuses distales se situent sur la troisième phalange après avoir coulissé dans un anneau fibreux formé par les tendons terminaux du fléchisseur commun. Le fléchisseur propre du pouce (long fléchisseur du pouce chez les primates) s'étend du radius à la phalange unguéale du pouce. Une partie des fibres de ce muscle provenant de l'apophyse coronoïde de l'ulna a progressivement régressé pour donner un ligament connu sous le nom de Weitbrecht. Ce ligament unit l'ulna au radius et renforce la partie haute du ligament interosseux. Sa fonction consiste à limiter l'écartement des deux os de l'avant-bras lors des appuis sur la main et des mouvements de pronosupination.

**Le second groupe** comprend les muscles interosseux, et toute une série de muscles prenant leurs insertions soit sur l'éminence thénar, dans l'axe du premier rayon (court abducteur du pouce, court fléchisseur du pouce, opposant du pouce), soit sur l'éminence hypothénar en regard du cinquième rayon (adducteur du V, court fléchisseur du V, opposant du V) ;

La fonction de ces muscles est primordiale chez les primates car elle permet, outre l'adduction et l'abduction des doigts, le phénomène d'opposition du pouce avec les autres doigts. Cette particularité mécanique donne à la main des capacités très étendues dans le domaine de la « prise » d'objets et celui de la précision du geste. L'opposition n'est rendue possible que par la présence de l'opposant du I, et les degrés de liberté de l'articulation entre la base du premier métacarpien avec le trapèze.

### = **Muscles dorsaux**

Comme pour les muscles ventraux on distingue les groupes musculaires prenant leurs insertions sur l'humérus et ceux s'insérant sur un ou les deux os de l'avant bras.

#### – Muscles prenant leur insertion sur l'humérus

Le groupe des extenseurs longs a son origine sur la partie externe de l'extrémité humérale (épicondyle). Cet ensemble musculaire se différencie rapidement en deux muscles, l'extenseur commun des doigts (extensor digitorum communis) et l'extenseur du carpe (extensor carpi). Chez les primates, on retrouve l'extenseur commun des doigts, qui prend son insertion proximale sur l'épicondyle et se termine sur les dernières phalanges des doigts (ce muscle est extenseur des deux

dernières phalanges et du carpe sur l'avant-bras), et l'extenseur propre du V<sup>ème</sup> doigt, tendu de l'épicondyle à l'extrémité du cinquième doigt. Ce muscle grêle et fusiforme correspond à une individualisation du long extenseur commun. Il est probable que ce groupe musculaire a également donné naissance à un autre muscle (insertion et trajet très proche) dont l'extrémité distale se fixe sur le bord externe du premier métacarpien. Ce muscle, le long abducteur du pouce, permet d'écartier le pouce des autres doigts. L'extensor carpi a donné le cubital postérieur, dont le trajet s'étend de l'épicondyle à l'extrémité supérieure du cinquième métacarpien. Il est probable que les premier et deuxième radial, tendus respectivement de l'épicondyle au troisième métacarpien, et de l'épicondyle à la face dorsale de la base du deuxième métacarpien, sont d'origine commune. Tous les deux sont extenseurs et abducteurs de la main.

#### – Muscles ne prenant pas leur insertion sur l'humérus

Chez les amphibiens et les vertébrés à cinq doigts non mammaliens, les extenseurs courts prennent leurs insertions proximales sur la radius et l'ulna. Le corps musculaire charnu descend pratiquement verticalement pour se fixer par un très court tendon sur les métacarpes et les phalanges. Chez les mammifères ce groupe musculaire régresse en partie pour ne laisser en place qu'un extenseur propre du pouce. Chez les primates, on peut également trouver un extenseur propre de l'index ainsi que les long et le court extenseurs du pouce. Chez l'homme, l'extenseur propre de l'index termine sa course sur le tendon de l'extenseur commun au niveau de sa séparation en trois languettes fibreuses fixées sur les deuxième et première phalanges. Le court et le long extenseur du pouce s'unissent juste avant leur insertion sur la deuxième phalange. Sur un plan évolutif l'extenseur court de nos ancêtres ne garde donc que trois faisceaux (au lieu de cinq), deux destinés au pouce et un pour l'index \*. Contrairement aux courts fléchisseurs placés sur la face ventrale du zeugopode, qui gardent leur fonction au cours de l'évolution, les muscles extenseurs régressent en grande partie sans «doubler» l'action physiologique de l'extenseur commun des doigts. Sur un plan strictement fonctionnel il est clair que les extenseurs des doigts jouent un rôle moteur moins important sur le plan de l'intensité de la contraction musculaire que les fléchisseurs parfois amenés à supporter tout le poids du corps, notamment lors de la brachiation.

*\* En cas de rupture de l'extenseur du pouce, muscle dont le tendon peut être rompu après dégénérescence inflammatoire au niveau du poignet du fait des contraintes mécaniques particulières imposées par la gaine sous-carpienne, la*

*«réparation fonctionnelle » est réalisée par transposition de l'extenseur propre de l'index sur le pouce.*

## **= Etiopaléopathologie**

L'évolution des muscles moteurs de l'autopode répond certainement à un double schéma évolutif : D'une part, des mutations comme celle portant sur le raccourcissement de l'ulna et qui donne la possibilité de mettre en place la pronosupination. D'autre part des «arrangements évolutifs » concomitants du développement embryonnaire et fœtal au moment des premières contractions musculaires.

Très schématiquement les grands traits évolutifs des muscles moteurs du zeugopode peuvent se résumer de la façon suivante :

+ **Une division longitudinale** des muscles qui gardent néanmoins leur insertion proximale.

+ **Un allongement de ces muscles** prolongés par des tendons jusqu'aux extrémités de l'autopode.

+ **Des modifications des points d'insertion** distaux entraînant une transformation de la physiologie du muscle concerné (long supinateur, long abducteur du pouce...).

Contrairement à ce qui a été constaté au niveau du stylopode, dont l'anatomie n'a pratiquement pas évolué depuis l'apparition du membre chiridien pentadactyle chez les Ichthyostégides du Dévonien, le zeugopode a lui été l'objet de transformations fondamentales (croisement ulna/radius, divisions et spécialisation musculaire, modification des rapports osseux avec le stylopode et l'autopode...). Autrement dit l'évolution des différentes espèces vers des spécialisations concernant leur mode de déplacement est essentiellement distale. Ces modifications sont à l'origine de conflits anatomiques entre les différentes structures, mais aussi physiologiques en fonction des modes d'utilisation qu'on pu en faire les animaux dans leur déplacement. Ce n'est pas en cherchant à grimper sur l'arbre que le singe est devenu brachiateur, mais parce que la mise en place de structures nouvelles lui ont donné un jour cette possibilité. Ce même concept peut être appliqué à l'utilisation d'outils qui ne façonnèrent pas plus la main que le cerveau. Chez l'homme moderne, ces modifications plus ou moins adaptées à nos besoins, sont à l'origine de pathologies dont les principales ont pour cause la transformation du rapport résistance/mobilité. Il apparaît en effet

impossible à l'évolution d'améliorer simultanément ces deux paramètres. Chez sapiens la mobilité exceptionnelle du membre supérieur s'est accompagnée d'une moins grande résistance. L'allongement des tendons des fléchisseurs et extenseurs des doigts constitue notamment un point faible du membre supérieur. Cette «anomalie biomécanique » a été très vite mise en évidence par nos ancêtres qui ont tous, en fonction de leur culture et des moyens dont ils disposaient, réalisés des «bracelets de force ». Ce bracelet en cuir chez les Scythes, en écorce chez les pygmées, en métal chez les Gaulois et les Grecques, est connu depuis la plus haute antiquité égyptienne. Son mode d'action est simple et efficace, il consiste à renforcer le ligament annulaire du carpe sous lequel coulisent les tendons. En modifiant le point d'appui des forces exercées sur les tendons et en diminuant la longueur du bras de levier, les muscles se révèlent d'une bien meilleure efficacité. Le renforcement protecteur de la charnière zeugopode/autopode permet ainsi de tirer plus fort sur la corde de l'arc, de jeter plus loin le javelot ou la sagaie, de soulever des charges plus importantes devant les badauds des foires... Mais, revers de la médaille, le bracelet de force diminue de façon importante la mobilité du poignet. Il reste cependant très utile dans le domaine de la prévention pour modifier la physiologie des muscles de l'avant-bras chez les lanceurs de javelot, tennismen, handballeurs... et les haltérophiles.

#### **+ Maladie de Dupuytren**

La maladie de Dupuytren se caractérise par une rétraction de l'aponévrose palmaire moyenne secondaire à une prolifération de fibroblastes. Plus fréquente chez l'homme que chez la femme, elle se manifeste habituellement après 50 ans. Les microtraumatismes répétés ont souvent été incriminés mais il semble bien qu'un facteur héréditaire soit en cause. Très semblable à l'atteinte de l'aponévrose plantaire, la maladie de Dupuytren est cependant rarement associée à cette dernière, exception faite des atteintes systémiques secondaire au diabète ou à l'alcoolisme. La dégénérescence fibroblastique des tissus aponévrotiques de la main pourrait être en rapport avec un processus sénescence accéléré secondaire à la mutation d'un gène de régulation, le phénomène étant aggravé par le travail manuel en pronation (sculpteurs, forgeron, travail domestique...). La chirurgie peut améliorer le caractère fonctionnel de la maladie mais se révèle impuissante quant à l'évolution inexorable du processus rétractile.

#### **+ Fracture du scaphoïde**

Dans le domaine médical la fracture du scaphoïde est la plus fréquente de celles observées au niveau des os du carpe, elle est aussi certainement la mieux connue

du grand public du fait de l'immobilisation prolongée que son traitement nécessite et de sa difficulté à guérir sans séquelle. Cette fracture répond à une chute sur le talon de la main, l'avant-bras étant en extension. Les forces transmises par le sol se répercutent directement sur le scaphoïde, puis sur le radius. Chez l'enfant c'est d'ailleurs le radius qui se «tasse» au niveau du cartilage de croissance constituant la célèbre fracture en «motte de beurre». Chez l'adulte, le scaphoïde encaisse la totalité de l'onde de choc et se brise soit dans sa partie moyenne, soit au niveau de ses pôles, mais généralement suivant un trait horizontal. Le problème majeur induit par cette fracture est la faiblesse relative du saignement. C'est en effet à partir du caillot initial que le cal osseux peut se constituer et rétablir la continuité osseuse. La vascularisation de cet os est réalisée par deux artérioles apicales, et basale, de faible importance qui laissent la région centrale de l'os très peu vascularisée, donc difficilement réparable. On retrouve dans cette bivascolarisation l'existence de deux noyaux osseux originaux provenant de la fusion probable de deux os primitivement séparés. Cette fusion osseuse ne s'est pas accompagnée, sur le plan vasculaire, d'anastomoses intra osseuses suffisamment perméables pour permettre une bonne oxygénation du fragment déplacé. Malgré une période d'immobilisation très longue (2 à 3 mois), le scaphoïde présente donc un risque important de nécrose, source de douleurs et de gênes fonctionnelles.

#### **+ Luxation du semi-lunaire**

La luxation dorsale du semi-lunaire illustre bien la difficulté à associer mobilité et résistance. Quand la main repose sur le sol, le semi-lunaire se trouve placé comme un coin entre le radius et l'ulna avec lequel il n'entretient pas de rapports anatomiques directs. Si la pression augmente (chute sur les mains) les ligaments unissant le semi-lunaire au scaphoïde et au triquetrum se rompent, plaçant le semi-lunaire en position luxée, instable. Cette pathologie, qui nécessite toujours un geste chirurgical, met clairement en évidence l'incapacité de notre carpe à travailler en charge. Notre adaptation à la brachiation, puis à la bipédie, ne nous autorise plus aujourd'hui à un quelconque retour en arrière.

#### **+ Fracture de fatigue et nécrose du pisiforme**

Le pisiforme est le seul os du carpe à recevoir une insertion tendineuse, celle du cubital antérieur. Ce privilège, si toutefois cela en est un, amène cet os à subir de très nombreuses impulsions par étirement lors de la contraction musculaire. Si ces impulsions sont trop fréquentes le pisiforme peut présenter ce que l'on appelle en anglo-saxon une «fracture de stress» ou plus simplement en latin une fracture de



fatigue.

Ces fractures, qui ne sont jamais secondaires à un traumatisme, se manifestent par l'apparition d'une douleur progressivement croissante, pouvant finir par être insupportable, notamment lors de la préhension d'objets. Connue des joueurs de tennis, cette fracture (invisible à la radiographie), doit être diagnostiquée par scintigraphie osseuse. Au niveau du carpe, c'est le seul os victime de cette symptomatologie.

### **+ Tendinite de De Quervain**

Cette tendinite concerne la gaine ténosynoviale du long abducteur du pouce et du court extenseur du pouce. Elle donne une douleur caractéristique dans la région de la styloïde radiale, irradiant vers le bord externe de l'avant-bras. La tendinite de De Quervain est très invalidante. L'atteinte inflammatoire de cette gaine est retrouvée entre autres chez les tennismen et les golfeurs, elle est secondaire à un épaissement inflammatoire de la gaine synoviale en rapport avec des mouvements itératifs du poignet, le pouce étant amené à réaliser des mouvements répétés d'abduction adduction (ouverture et fermeture de la main). La particularité anatomique de cette gaine est double, d'une part elle renferme deux tendons, seul cas au niveau du carpe, d'autre part ces deux tendons se croisent l'un sur l'autre, provoquant une zone d'irritation potentielle. La localisation antébrachiale de ces deux muscles laisse supposer une origine commune par scission. Leur division anatomique, puis fonctionnelle, n'a cependant pas été totale puisque demeure encore le problème de la «gaine partagée ».

### **+ Phocomélie et adactylie**

Ces pathologies, qui touchent soit le membre (phocomélie), soit l'extrémité des doigts (adactylie ou polydactylie) ont pour origine deux types de troubles génétiques différents, mais portant tous les deux sur le système de régulation Hox. Comme la polydactylie (plus de cinq doigts), l'adactylie (absence d'un ou plusieurs doigts) répond à un trouble héréditaire. Ces malformations digitales sont à transmission autosomique dominante. L'atteinte touche un ou plusieurs membres supérieurs et/ou inférieurs. L'expression peut être polymorphe (Ex : trois doigts à la main gauche, six doigts de pied à droite). L'origine de cette anomalie correspond à un trouble de l'expression du gène Hoxd 13 responsable de la mise en place de l'extrémité distale des membres. La phocomélie (du grec phôké = phoque) correspond à un trouble de développement des membres caractérisé par la disparition d'un ou plusieurs segments et l'implantation directe de doigts sur le moignon (par exemple des doigts directement implantés sur une

épaule). La phocomélie, contrairement est secondaire à l'atteinte d'un gène régulateur Hox (Hoxd 9 et/ou 10) \*. Chez les tétrapodes, ce gène est responsable de la formation des membres, à la fois sur le plan chronologique (formation du stylopode, du zeugopode et de l'autopode), mais aussi sur celui de la croissance de l'os (le temps de croissance déterminant la longueur du segment osseux considéré). Plusieurs gènes sont nécessaires pour induire la formation d'un membre. On compte trois phases de développement. La phase I s'exprime dans la totalité du membre, il s'agit de la mise en place du bourgeon qui donnera le membre. La phase II est chargée de la mise en place proximale du membre (stylopode et zeugopode). La phase III agit sur le bourgeon terminal et donne la main. De façon tout à fait étonnante, ces trois gènes existaient déjà chez le poisson, mais chez ces animaux seule la phase I est mise en place. Dans le cas de la phocomélie le gène I s'exprime en provoquant la genèse d'un bourgeon embryonnaire, le gène deux est totalement inhibé, le gène trois s'exprime plus ou moins normalement. L'ensemble de ces gènes peut être l'objet d'hyper ou d'hypomorphose. En l'absence de stimulation des trois gènes, il n'existera aucune trace de membre. Si une hypomorphose touche le gène II l'humérus, le radius ou les deux os, ils seront plus courts que normalement, enfin si c'est le gène III qui est atteint, on pourra noter une absence de main (et non pas seulement de doigts).

*\* Dans les années 50 et 60 l'utilisation de la Thalidomide (drogue sédatrice) par les femmes enceintes pendant les premières semaines de grossesse provoqua de très nombreuses atteintes de ce type du fait de l'interaction de ce médicament avec les gènes de régulation. La Thalidomide est d'autre part un anti-inflammatoire puissant utilisé entre autre dans le traitement du Lupus érythémateux et de l'érythème noueux.*