

ADERF 2021

BIOMECANIQUE / MORPHOLOGIE FONCTIONNELLE

Rémi Hackert

UE 06 Théories, modèles, méthodes et outils en kinésithérapie

Notes de cours associées au cours magistral 1

Intro : Biomécanique et morphologie fonctionnelle

Rappels mathématiques

Description d'un corps

Force, déformation et équilibre

Mouvement : description cinématique

Mouvement : description dynamique

Formes d'énergie associées au centre de masse.

Conclusion : Mémo des variables introduites.

0. Introduction

Sujet de la biomécanique

La mécanique est la partie de la physique qui étudie le mouvement des corps. La biomécanique est une application de la mécanique à l'étude des mouvements des corps vivants. La biomécanique adresse donc un spectre très large de problème: de l'écoulement de globules dans un capillaire au déplacement d'un organisme complet.

On pourra distinguer différents niveaux d'étude: un niveau descriptif qui cherche à *décrire* le mouvement – la mesure des déplacements spatiaux, l'estimation de leur vitesse, la quantification de la variabilité de ces mouvements. Ce niveau d'analyse est appelé l'*analyse cinématique*. Elle étudie le mouvement en faisant abstraction de ses causes.

Si l'on s'intéresse aux causes du mouvement, on doit alors tenir compte des interactions du sujet d'étude avec son environnement. Ces interactions sont modélisées sous la forme de forces de nature diverses (forces de contact, force à distance comme la gravité, etc..). Ces forces ont une direction, un sens, une intensité. Elles sont représentées mathématiquement par des vecteurs. Les échanges gazeux respiratoires constituent aussi une forme d'interaction avec l'environnement. L'étude qui modélise le sujet en interaction avec son environnement est une étude qui s'intéresse à la *dynamique* de son mouvement.

La connaissance des forces *externes* c'est à dire des forces échangées avec l'environnement, peut permettre d'estimer certaines forces *internes*, c'est à dire des forces échangées entre deux sous parties du corps étudié. On notera que la *statique* d'une structure c'est à dire l'étude des forces internes d'une structure alors même que le mouvement est nul est également une partie de la biomécanique.

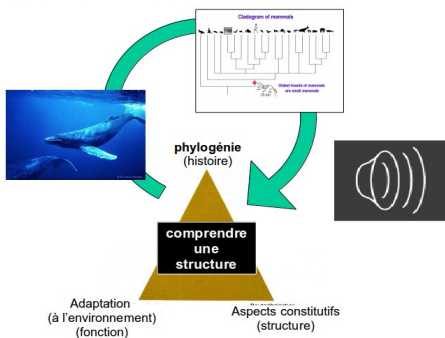
On a alors besoin de connaissances sur la *résistance des matériaux* composant la structure, notamment sa résistance à la déformation. On soumettra donc ces matériaux à des contraintes mécaniques en traction, en compression, en torsion ... La mécanique des structures biologiques, au sens de la *résistance des matériaux- en biologie on pourra souvent parler de résistance des tissus* - est aussi une partie de la biomécanique.

Position de la biomécanique

La biomécanique, en quantifiant les contraintes, les forces, les déformations, fournit *un éclairage* sur le pourquoi d'une architecture, sur la logique d'une forme, d'une structure dans son rapport avec la fonction accomplie. Néanmoins, il faut garder à l'esprit qu'elle ne peut à elle seule expliquer le pourquoi d'une forme vivante ou du mouvement qu'elle dessine.

Car trois facteurs gouvernent au moins la forme d'une structure biologique (Triangle de Seilacher):

Introduction / cadre conceptuel

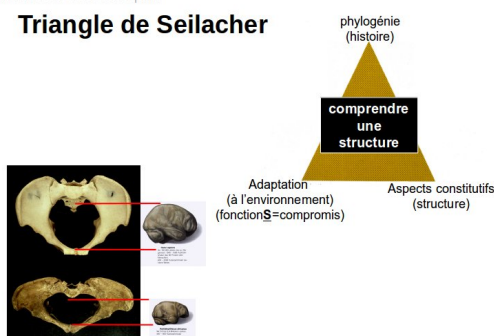


L'histoire évolutive du sujet d'étude. Le mouvement de nage d'une baleine avec ses oscillations dans le plan sagittal peut surprendre alors même que tous les poissons se déplaçant dans le même milieu oscille dans un plan latéral. La réponse tient entière dans l'histoire évolutive de cet animal: si on compare la baleine avec ses ancêtres c'est à dire les petits mammifères terrestres et qu'on s'intéresse à la locomotion des petits mammifères (actuel) on retrouvera alors les traces de ces oscillations sagittales dans la course.

[voir la flexion sagittale d'un ochetone pendant sa course [Pika Demi bd Xrays5.mp4](#)]

Introduction / cadre conceptuel

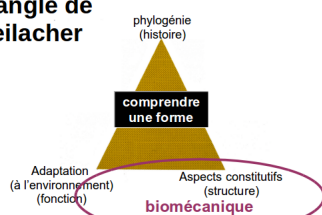
Triangle de Seilacher



Le deuxième pôle est fonctionnel. A quelle(s) fonction(s) participe la structure? Étudions un bassin. Le bassin apparaît comme la clef de voûte qui relie deux chaînes segmentées, les jambes. Mais sa forme est aussi déterminée par son rôle dans la parturition - le corps du nouveau né et surtout sa tête doivent pouvoir passer à travers le bassin, ce qui induit des contraintes de forme et de dimension. En outre chez l'homme, les ailes iliaques se sont ouvertes vers l'extérieur alors que ce n'est pas le cas chez les grands singes. C'est que suite à notre station érigée, les viscères tombent vers le bas et que les ailes iliaques jouent aussi un rôle de support du système viscéral. Ce pôle fonctionnel traduit donc *les relations (au pluriel)* de la structure avec son environnement. Une forme est souvent - pour ne pas dire toujours - le résultat d'un compromis.

Introduction / cadre conceptuel

Triangle de Seilacher



Outil : Évaluation de performances, de contraintes
Test d'hypothèse fonctionnelle / Modélisation / simulation

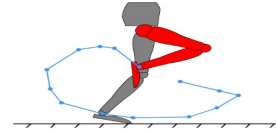
Enfin le dernier pôle est structurel: la forme d'une structure dépend aussi des propriétés de la matière à partir de laquelle elle est façonnée. C'est par exemple l'orientation des microstructure osseuses qui détermine en partie la résistance d'un os aux contraintes. C'est la structuration interne du muscle et des tendons qui rend possible un stockage d'énergie au sein de ces structures...etc.

La biomécanique n'aura pas grand chose à dire sur le pôle 1. Elle pourra surtout apporter des informations sur les aspects de structure et sur sa relation au fonctionnel notamment en associant à une structure en fonction des mesures objectives de sa performance.

Exemple de forme dynamique: pendant la course la trajectoire de la cheville dessine une poulaine, ces chaussures du moyen-age.

On notera que la forme étudiée n'est pas nécessairement statique comme l'est la forme d'un os, mais peut être dynamique comme l'est par exemple la trajectoire de la cheville lors du mouvement de course. Le cadre conceptuel pour l'étude des formes dynamiques reste le même.

Forme dynamique



1. Généralités / Fondamentaux

Description d'un corps

Dimension et forme

Les dimensions d'une structure participent naturellement à la description d'une structure. Les outils de mesure actuels ont très largement dépassé les possibilités du pied à coulisses. Mécaniquement parlant cependant toutes les dimensions ne seront pas aussi pertinentes les unes que les autres. Le propre de la biomécanique c'est l'abstraction et la modélisation d'une structure. Toute description porte une part de subjectivité qui réside déjà dans le choix des grandeurs à mesurer.

Ordonnement / conformation

Le positionnement des parties les unes par rapport aux autres, est une donnée fondamentale de la description du système. Les structures biologiques sont souvent des constructions faisant appel à la répétition de structures identiques. Exemple: mise en série de sarcomères, mise en parallèle de fibre musculaire. De fait, la quantification du nombre d'éléments en série, en parallèle sont des éléments fondamentaux pour la modélisation biomécanique. L'emboîtement de structures à l'exemple de celles du muscles induit une relation "d'ordre" dans la structure.

La description des liaisons entre les éléments d'une structure, l'estimation de la mobilité des parties entre elles, permettront de modéliser ces liaisons, et de contraindre ensuite la mobilité du modèle biomécanique associé c'est à dire lui attribuer le bon nombre de degrés de liberté (qui correspond en mécanique au nombre de paramètres indépendants nécessaire à positionner la structure).

La conformation d'une structure en mécanique fait référence à la description de la position tri-dimensionnelle de ces parties, une définition proche de la celle de la conformation moléculaire en chimie.

L'anatomie descriptive est donc fondamentale pour la biomécanique.

Masse

La masse, ou masse inerte, d'un corps quantifie sa résistance à une mise en mouvement ou à une modification de son mouvement, on parle d'inertie. Newton a identifié cette masse "inerte" à la quantité de matière qui constitue ce corps. L'unité de masse est le [kg].

Dans un référentiel Galiléen, la tendance naturelle d'un corps isolé est de persister dans son état actuel. Le repos en est un cas particulier où la vitesse est nulle. Persister revient donc à dire que le corps, si aucune action ne vient le perturber, continuera son déplacement rectiligne et uniforme (en conservant la même vitesse). Un référentiel terrestre lié à la Terre n'est pas Galiléen car il est aussi en rotation - la Terre tournant sur elle-même - par rapport au référentiel de Copernic (référentiel Galiléen avec l'origine au centre du soleil et trois axes pointant vers des étoiles lointaines fixes). Si les expériences durent peu longtemps, on pourra néanmoins assimiler le référentiel terrestre à un référentiel Galiléen pendant ce court instant.

Centre de masse

Nous décomposons mentalement le corps que nous étudions en petit éléments i qui ont chacun leur masse m_i . Le centre de masse est le point de l'espace - c'est donc une construction géométrique – qui est la *moyenne* des positions des différents éléments de masse (en mathématique on parle de barycentre) pondérée respectivement par la masse de l'élément.

Exemple : soit un système composé de deux éléments positionnés en A_1 et en A_2 et de masse respective m_1 et m_2 .

Alors la position du centre de masse M est donnée par la moyenne:

$$OM = (m_1 OA_1 + m_2 OA_2) / (m_1 + m_2)$$

C'est une construction géométrique et par conséquent le centre de masse peut ne pas se trouver dans le corps étudié, notamment si celui-ci n'a pas une forme compacte (penser par exemple à une banane). Par ailleurs puisque la plupart des structures étudiées en biomécanique se déforment, avec des parties potentiellement mobiles les unes par rapport aux autres, le centre de masse est un point à priori mobile lui aussi. Notons que, par définition, le centre de masse n'est pas un point incarné par une quelconque structure anatomique. Néanmoins sa position par rapport aux éléments de la structure est souvent un élément intéressant d'interprétation.

En pratique il existe de multiples façons de déterminer la position du centre de masse.

La plus simple dans le cas de structures simples, avec des géométries simples elles aussi, est d'utiliser les axes et plans de symétrie. Si le corps a une masse volumique homogène alors le centre de masse se trouvera sur les droites d'intersection des plans de symétrie.

Sur des structures non déformables assez grosses, on peut procéder par double suspension : en suspendant le corps par un premier point, le corps pendule autour de son point de suspension puis se stabilise. Le centre de masse est alors positionné au dessous, à la verticale du point de suspension. En suspendant notre structure de cette façon en deux points différents, nous obtenons ainsi deux droites qui se coupent en un point qui est le centre de masse.

Pour des structures plus complexes, inhomogène, avec des variations de densité, des scans volumiques aux rayons X peuvent permettre de reconnaître des structures de même densité et un calcul informatique (intégration sur les volumes) peut alors permettre d'aboutir.

Simple en théorie, la détermination peut se révéler laborieuse en pratique.

Au fait quelle est typiquement la masse volumique des tissus de notre corps ?

De l'ordre du gramme /cm³ (sang: 1.06 ; os autour de 1.6 chez l'adulte) donc supérieur à celle de l'eau pure 1g/cm³ ou de l'eau de mer 1,025g/cm³. Dans les deux cas, notre corps ne flotte que s'il renferme de l'air dans les poumons.

NB 1:: la densité est la masse volumique rapportée à la masse volumique de l'eau 1g/cm³. La densité est donc sans unité.

NB 2:: on peut écrire cette définition autrement ; introduisons M dans **OA₁** et **OA₂**

$$\mathbf{OM} = (m_1 (\mathbf{OM} + \mathbf{MA}_1) + m_2 (\mathbf{OM} + \mathbf{MA}_2)) / (m_1 + m_2)$$

soit encore $\mathbf{OM} (m_1 + m_2) = m_1 (\mathbf{OM} + \mathbf{MA}_1) + m_2 (\mathbf{OM} + \mathbf{MA}_2)$

et donc en simplifiant : $m_1 \mathbf{MA}_1 + m_2 \mathbf{MA}_2 = \mathbf{0}$

qui est une autre manière de définir le centre de masse.

On peut établir une correspondance entre centre de masse et une notion issue du monde des statistiques: la moyenne statistique.

Moment d'inertie

La grandeur "masse" ne dit rien sur la façon dont cette quantité de matière est répartie dans l'espace. Pourtant on sait bien que cette répartition joue un rôle important, notamment lors de l'accomplissement de certains mouvements de rotation autour d'un axe. La patineuse qui ramène ces bras le long du corps va tourner plus vite autour de l'axe de son corps. Si au contraire elle les écarte, elle ralentira sa rotation. En écartant les bras, sa masse ne varie pas mais la distribution spatiale de sa masse oui.

Pour appréhender cette distribution de masse on introduit le moment d'inertie J, calculé par rapport à un axe passant par le centre de masse M, grandeur définie comme suit

$$J_{/M} = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \dots$$

m_1, m_2, m_3 sont des petits éléments de masse. r_1, r_2, r_3 sont les distances respectives qui séparent ces masses de l'axe de rotation.

Après avoir dit que le centre de masse correspond à une position moyenne, et pour poursuivre le parallèle entre mécanique et statistique, on voit que J est alors homologue à la variance statistique., i.e. la somme des écarts à la moyenne mis au carré, chaque distance à la moyenne étant pondérée par le nombre d'occurrence La variance qui reflète la distribution des valeurs autour de la moyenne a aussi son correspondant en mécanique, et c'est donc le moment d'inertie. Comme pour la variance en statistique, le moment d'inertie est minimum lorsqu'il est calculé par rapport à un axe passant par le centre de masse.

Tout corps solide, aussi biscornu et dissymétrique qu'il puisse être, se comporte de façon identique à un ellipsoïde « équivalent » (une dragée) à trois axes de symétrie. Sauf cas particulier il possède 3 axes de symétrie inégaux, un grand, un moyen et un petit axe. C'est autour du grand axe que l'inertie est minimum (puisque tous les points de l'ellipsoïde sont proches du grand axe) et c'est autour du

petit axe que l'inertie est maximum. l'axe moyen représente une situation intermédiaire (et correspond d'ailleurs en mécanique à une rotation instable)

Quelques rappels de... mathématiques

La notion de vecteur est un outil fondamental en mécanique.

Mais qu'est ce qu'un vecteur ?

Mathématiquement: Soient deux points du plan A et B. Ce couple de point (A,B) définit ce qu'on appelle un bipoint. Ce bipoint est orienté A étant l'origine B, la destination. Le bipoint (A,B) est donc différent du bipoint (B,A). Un second bipoint (C,D) sera dit équipollent au bipoint (A,B) si ABCD forme un parallélogramme c'est à dire $AB \parallel CD$ et si la distance AB égale la distance CD. Le vecteur **AB** est l'ensemble des bipoints équipollents au bipoint (A,B).

Dans ce cours, le vecteur AB sera noté **AB** (en gras) ou vectAB en lieu et place de la notation consacrée qui fait apparaître une flèche horizontale au dessus du nom du vecteur.

Tout l'intérêt de cet outil mathématique est de pouvoir manipuler tout à la fois, une direction, un sens, et une intensité (parfois appelé norme) , trois grandeurs souvent liées à un phénomène dans notre espace physique : un déplacement, une vitesse, une accélération, une force pourront donc être représentés par un vecteur.

Un vecteur unitaire est un vecteur dont la norme (la longueur) égale 1.

Dans l'espace à trois dimensions muni d'un repère (c'est à dire d'une origine 0 et d'une base de vecteurs unitaires (**i, j, k**)), tout vecteur **u** peut être décomposé selon les vecteurs de la base. $\mathbf{u} = a \mathbf{i} + b \mathbf{j} + c \mathbf{k}$

a,b,c sont les coordonnées du vecteur dans la base choisie (**i, j, k**).

La norme du vecteur **u** est noté $\|\mathbf{u}\|$ et vaut $(a^2 + b^2 + c^2)^{1/2}$.

[Cette formule ne tombe pas du ciel , c'est l' application directe du théorème de Pythagore.]

Une force F s'appliquant en un point A selon une direction connue , un sens connu, et avec une intensité connue, pourra donc être représentée par un vecteur.

On appelle composante de la force **F** , notée F_x, F_y, F_z les coordonnées du vecteur **F** selon les trois axes du repère. Ces coordonnées représentent la projection orthogonale du vecteur **F** sur chacun des axes.

ici introduire dessin

On rappelle que cette projection orthogonale est équivalent à la notion mathématique de produit scalaire.

Sur la figure plane (en 2D) précédente, la projection de \mathbf{F} sur l'axe des x est F_x , la projection orthogonale de \mathbf{F} sur l'axe des y est F_y .

Le résultat du produit scalaire est un nombre pas un vecteur !

le produit scalaire de \mathbf{F} et \mathbf{i} noté $\mathbf{F} \cdot \mathbf{i}$ vaut $\|\mathbf{F}\| \times \|\mathbf{i}\| \times \cos(\mathbf{F}; \mathbf{i})$.

Puisque $\|\mathbf{i}\|=1$, $\mathbf{F} \cdot \mathbf{i} = \|\mathbf{F}\| \times \cos(\mathbf{F}; \mathbf{i})$ c'est à dire F_x .

La décomposition de F en ces composantes selon les axes du repère est le plus souvent physiquement intéressante et n'est pas que formelle. Par exemple lors de la description de force de contact entre un corps et le substrat. La force F pourra être décomposée en une partie parallèle, tangentielle, au substrat et une partie perpendiculaire (orthogonale) à la surface du substrat. La partie parallèle au substrat étant liée au mouvement de glissement du corps par rapport au substrat. L'effet d'une force sera d'autant plus grand dans une direction donnée que la projection de ce vecteur sur cette direction est grande.

Éléments de mécanique

La force de gravitation

La gravitation est l'une des 4 forces structurant l'univers. C'est une interaction à distance dont nous considérerons l'action comme instantanée et qui existe entre toutes les masses.

Une masse exerce donc en potentiel une force autour d'elle sur tout objet s'approchant. On parle de champ de force et ici de champ de pesanteur. Le champ de pesanteur terrestre est plus grand que le champ de force que crée mon corps.

Debout sur terre, nous sommes attirés par la terre dont la masse vaut $M_T=5,9736 \times 10^{24}$ kg. Ce que nous appelons notre poids est la mesure de cette force d'attraction formalisée par Newton :

$$\vec{F}_{12} = -G \cdot \frac{m_1 m_2}{d^2} \vec{u}_{12}$$

- \vec{F}_{12} étant la **force** gravitationnelle exercée par le corps 1 sur le corps 2 (en **newton** ou $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$);
- G , la **constante gravitationnelle**, qui vaut $6,6742 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ (ou $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)
- m_1 et m_2 , les masses des deux corps en présence (en **kilogrammes**);
- d , la distance entre les 2 corps (en **mètres**);
- \vec{u}_{12} est un **vecteur** unitaire dirigé du corps 1 vers le corps 2;

A la surface de la terre, la distance qui nous sépare du centre de la terre est le rayon terrestre $R_T = 6371$ km et donc la norme de la force $\|\mathbf{F}_{12}\| = G M_T \cdot m / R_T^2$. Pour simplifier cette expression, on

remplace $G M_T / R_T^2 \mathbf{u}_{12}$ qui est homogène à une accélération par \mathbf{g} . On a alors $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{g}$. L'application numérique donne $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Lorsqu'on se pèse, la balance mesure en interne une force, un poids mais elle affiche à la fin la masse. Parler du poids d'une personne pour lui demander en fait sa masse est un abus de langage (largement toléré cependant 😊).

Centre de gravité et centre de masse

A tort, la notion de centre de gravité et de centre de masse sont souvent confondues. Le centre de gravité est le point d'application de la force de gravitation terrestre.

L'attraction gravitationnelle de la terre s'exerce d'une façon radiale autour de la terre et dépend de la distance au centre de la terre.

Pour un corps qui serait extrêmement étendu par exemple la lune 😊, le champ gravitationnel terrestre n'est pas homogène **car la force de gravitation diminue avec la distance** au centre de la terre et n'est pas

identique d'un côté de la lune et de l'autre (voir définition et dépendance en $1/r^2$). Dans ces conditions centre de masse et centre de gravité ne se superposent pas. Mais dans le cadre de ce cours, la petite taille des corps étudiés (humain) nous permet de considérer que le champ de gravitation est homogène à cette échelle et que centre de masse et centre de gravité sont confondus ou plutôt superposés et nous emploierons par abus de langage l'une ou l'autre des expressions.

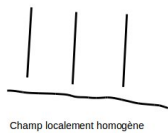
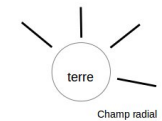
Centre de masse VS centre de gravité

Le centre de gravité est le point du corps ou s'applique la force d'attraction gravitationnelle (l'attraction terrestre dans notre cas).

La force gravitationnelle de la terre s'exerce d'une façon radiale autour de la terre et diminue avec la distance au centre. En un point du globe, localement ce champ gravitationnel peut être considéré comme homogène.

Dans ces conditions le centre de gravité et le centre de masse se confondent.

Pour un corps qui serait extrêmement étendu, centre de masse et centre de gravité ne se superposent plus.



Force de contact: principe de l'action et de la réaction

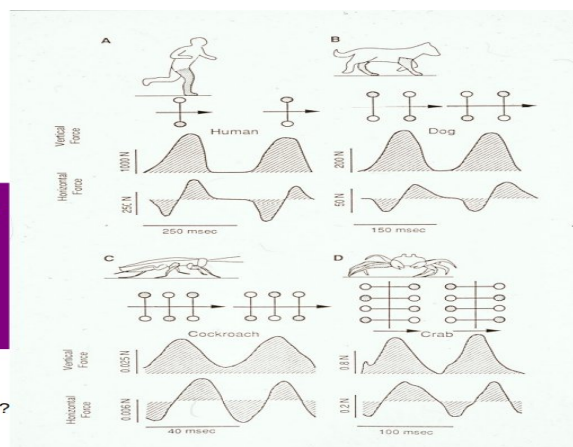
Quand deux corps entrent en contact, on parle d'échange de forces entre ces deux corps, ou encore d'interaction, car l'exercice d'une force par le premier corps sur le second produit en réaction une force du second sur le premier. Cette résistance prend la forme d'une force de même direction, de même intensité mais opposée en sens à la force exercée sur lui. C'est le principe de l'action et de la réaction.

Exemple de forces de réaction du sol mesurées grâce à des plateformes dynamométriques

Les patrons des forces exercées par les animaux à pattes sur le sol sont assez similaires malgré un nombre de pattes variables

Question

Quand commence-t-on à glisser ?



Dans les situations abordées ici, à moins d'être en chute libre dans le vide, nous aurons donc toujours au moins deux forces en présence, le poids et la réaction du support sur lequel se déplace le sujet.

La figure ci-dessous présente les forces de réaction du sol mesurées lors des appuis des pattes sur le sol pendant la marche. Pour chaque animal deux *composantes* de la force sont représentées : la composante verticale et la composante horizontale (dans le sens du mouvement). Les composantes horizontales montrent une alternance de parties négatives et positives. Les parties négatives correspondent au freinage du centre de gravité associé à la première partie du poser du pied et ce, en général, jusqu'à ce que le centre de masse de l'animal passe à la verticale du point d'appui, les parties positives sont associées à l'accélération du centre de gravité dans la seconde phase du poser. Il est "amusant" de remarquer que quelque soit le nombre de pattes utilisées chez ces animaux les forces de réaction ont un patron similaire.

Cône et coefficient de frottement

Pour faire avancer un corps posé sur un plan horizontal, l'expérience montre qu'il faut exercer que la composante tangentielle de la force ait une norme supérieure à une valeur seuil. C'est la composante tangentielle T de la force de réaction qui s'oppose au mouvement de glissement.

De façon générale désignons par N et T la composante orthogonale et la composante tangentielle de la réaction \mathbf{R} , l'expérience montre qu'il n'y a pas de glissement tant que $|T/N| \leq f$

ou f désigne le *coefficient de frottement statique* qui ne dépend que de la nature et de l'état des corps en contact

Quelques valeurs de f :

bois sur bois : 0.25 à 0.5

fer sur chêne : 0.6

métal sur métal : 0.15- 0.20

peau de phoque sur la glace: 0.11-0.17 (à 10km/h, à -1°C)

ce coefficient dépend beaucoup de l'état des surfaces

La condition $|T/N| \leq f$ exprime que l'orientation de la force de réaction \mathbf{R} doit être comprise dans un cône de demi-angle au sommet d'angle Φ . Le rapport T/N équivaut à $\tan(\Phi)$. Une fois le glissement amorcé, le rapport $|T/N|$ reste quasi indépendant de la vitesse et s'appelle le coefficient de frottement cinétique.

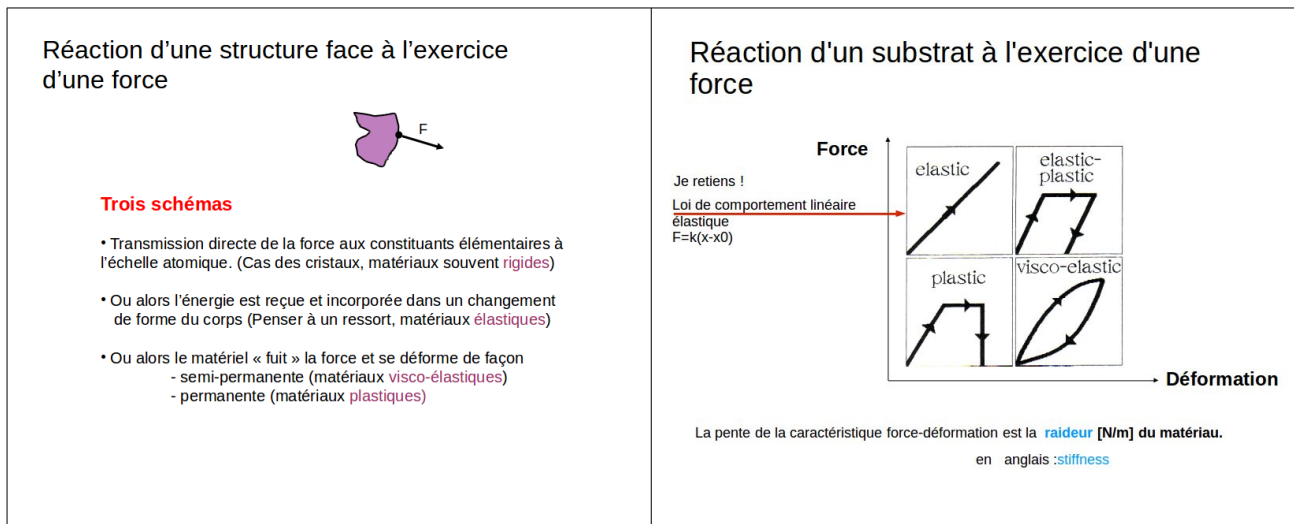
Réaction d'une structure face à l'exercice d'une force

Lorsque qu'une force est exercée sur une structure, on observe différents comportements des structures en fonction de leur constitution :

Ou bien il y a transmission directe de la force aux constituants élémentaires de la structure sans que la structure elle même soit modifiée, en tous les cas jusqu'à une certaine valeur de la contrainte qu'on nomme limite élastique. C'est le cas de nombreux matériaux :

Cela peut être le cas de matériaux rigides, comme un cristal par exemple. Il y a transmission directe de la force aux constituants élémentaires à l'échelle atomique. La déformation d'un cristal peut être infinitésimale mais se réalise jusqu'à une certaine limite d'une manière élastique. Si la force cesse, la déformation disparaît.

Mais c'est aussi le cas de matériaux plus naturellement associés à la notion d'élasticité (ressort, élastique en caoutchouc, tendon). La structure se déforme sous l'action de la force mais recouvre sa forme dès que l'action de la force cesse (tel un ressort). On dira que le matériau a un comportement élastique.



Ou bien le matériel « fuit » la force et se déforme

- Soit de façon semi-permanente (on parle de visco-élasticité), le matériel met un certain temps pour retrouver sa forme de départ. Les phénomènes de frottement empêchent le corps de regagner instantanément sa forme de départ. Ces frottements sont aussi source de dissipation d'énergie.
- Soit de façon permanente ; le matériel est dit *plastique*, et ne recouvre jamais sa forme initiale. L'énergie reçue par l'exercice de la force est incorporée dans le changement de forme.

Revenons à la figure présentant les forces de réaction au sol lors de la marche. Toutes ces courbes sont arrondies et non anguleuses. Cela traduit la présence d'un comportement élastique et visco-élastique dans les matériaux biologiques. Les muscles, les tendons, le cartilage présentent ce type de comportement, les os sont plutôt rigides mais pas complètement ! Élasticité et viscoélasticité des structures interviennent notamment lorsqu'on parle d'amortir les chocs entre parties rigides (les os, le sol).

Déformations et contraintes

La figure de droite représente les courbes caractéristiques de la déformation de différents types de matériaux lorsque la force augmente. Il y a différentes façons d'exercer une force sur une structure. On peut tirer (traction), pousser (compression), tordre (torsion), cisailer (cisaillement). Les matériaux du fait de leur structure élémentaire peuvent alors réagir différemment à ces sollicitations. Les limites de résistances des matériaux avant rupture sont bien évidemment des données essentielles.

Ainsi beaucoup de structures anatomiques sont ainsi passées au « banc d'essai », soumise à des forces de plus en plus grandes jusqu'à rupture de la structure mais aussi pour déterminer les domaines de contraintes où la structure a un comportement élastique, avant que les contraintes n'occasionnent des déformations irréversibles. Dans ce domaine d'élasticité force et déformation sont bien souvent dans une dépendance linéaire.

Lorsque la force s'applique sur une surface, on parle de contrainte (mesurée en N/m², unité de pression le Pascal). Une augmentation élémentaire de la contrainte induit une déformation élémentaire. Le coefficient de proportionnalité entre contrainte et déformation (allongement relatif de la structure, sans unité) est appelé module d'élasticité. Dans le cas d'une traction on le nomme parfois module de Young et on le note E : c'est donc le rapport de la contrainte (exprimé dans l'unité de pression – le Pascal, noté Pa - divisée par l'allongement relatif de la structure (variation de longueur rapportée à la longueur au repos). Cet allongement relatif est donc adimensionnel et le module de Young a la dimension d'une unité de pression (Pa).

Mais bien souvent les contraintes auxquelles sont soumises les structures anatomiques sont multiples. Prenons l'exemple d'un os. Bien que rigide, il a une certaine élasticité. Si on exerce une force en flexion, comme si on voulait le couder, alors une partie extérieure de l'os est contrainte en traction alors que la partie intérieure est comprimée.

Lorsqu'une structure est étirée selon une direction, en général elle rétrécit selon les dimensions perpendiculaires. Si vous étirez un cylindre, son diamètre va diminuer. On pourrait penser que le volume lui reste globalement constant mais le plus souvent le volume de la structure change au cours de cette déformation.

Droite d'action d'une force

Lorsqu'une force est exercée sur un objet que peut-il se passer ?

L'objet se translate ou l'objet tourne. Une même force peut donc avoir deux effets distincts sur l'objet, un déplacement de son centre de gravité ou une rotation de l'objet autour de son centre de gravité. Ce qui va déterminer l'apparition de l'un ou l'autre des effets est la position relative de la droite d'action de la force (la droite qui porte la direction de la force) et du centre de masse.

1/ Ou bien cette droite d'action passe par le centre de masse et alors l'objet sera purement traduit

2/ Ou bien cette droite d'action passe à côté du centre de masse et alors l'objet pourra aussi tourner autour de son centre de masse.

On peut constater que cette propension à faire tourner l'objet sera à force égale d'autant plus forte que la droite d'action de la force sera éloignée du centre de masse.

Pour quantifier cette propension de la force à faire tourner l'objet on introduit le moment de la force et on le définit par

$$\mathbf{M}_{F/G} = \mathbf{GP} \wedge \mathbf{F} = \mathbf{GP} \cdot F \cdot \sin(\mathbf{GP}, \mathbf{F}) \quad \mathbf{k} = F \cdot GP \cdot \sin(\mathbf{GP}, \mathbf{F}) \quad \mathbf{k}$$

ici **G** représente le point par lequel passe l'axe de rotation de l'objet.

$GP \cdot \sin(\angle GP, F)$ représente géométriquement le bras de levier, la distance la plus courte du point G à la droite d'action de la force.

Équilibre **des moments de deux forces**

Les trois exemples ci contre présentent des structures incluant un pivot (A) et un muscle exerçant une force P luttant contre une force R, L'ordre des trois éléments diffèrent dans les trois cas RAP, ARP et RPA.

Dans la seconde figure, la patte antérieure d'un blaireau a été portée à l'échelle de celle d'un guépard. On constate que conformément au mode de vie, les os du blaireau utilisés aussi pour le fouissage sont plus épais et que l'insertion du triceps est plus lointaine de l'articulation de l'épaule que chez le guépard. Chez ce dernier, un court raccourcissement du triceps provoquera une rotation rapide de la patte, chez le blaireau c'est plutôt la puissance qui est recherchée. muscle plus épais et insertion plus lointaine, donc moment de la force important.

Équilibre statique

On a vu qu'un système pouvait voir son centre de masse être translaté et/ou qu'il pouvait tourner autour de celui-ci. Pour s'assurer de son immobilité on devra donc s'assurer de deux choses.

que la somme des forces extérieures s'exerçant sur le système soit nulle

et

que la somme des moments de ces forces soit nulle.

A ce stade, on peut donc commencer à résumer dans un petit mémo les variables qui se correspondent pour les deux types de mouvement : translation et de rotation. Nous le compléterons au fur et à mesure.

Le mémo

	Degrés de liberté	
	Translation	Rotation
Référentiel / syst. coord.	cartésienne	polaire, cylindrique
Description du système	Masse m	Moment d'inertie I
Action	Force F	Moment de la force $M_{F/G}$
Equilibre	$\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{0}$	et $\Sigma \mathbf{M}_{F/G} = \mathbf{0}$

Méthodologie

- Définition du système
- Inventaire des forces s'exerçant sur le système
- Ecriture des équations vectorielles de l'équilibre
- Projection des équations vectorielles sur les axes du repère
- Résolution du système d'équation / extraction de(s) l'inconnue(s)

2. Mouvement

Le mouvement est caractérisé par le déplacement d'un corps par rapport à un autre pris pour référentiel. Ce déplacement comme pour la position peut être représenté vectoriellement: il a un sens, une direction, une intensité (une longueur).

La suite des positions occupées par le système au cours de son déplacement est nommée trajectoire. Sa forme est naturellement dépendante du référentiel choisi.

Nous distinguerons deux niveaux d'étude du mouvement: le niveau cinématique et le niveau dynamique.

- La cinématique est une étude descriptive du mouvement qui ne nécessite pas de connaître les causes, ni les interactions du système avec son environnement. On cherche à décrire la forme des trajectoires de certains points et à quantifier cette géométrie et sa temporalité: amplitude des variations d'un angle, amplitude d'un mouvement, fréquence, vitesse, phase, enchaînement ...etc....
- L'étude dynamique vise à comprendre le mouvement observé. Elle nécessite de tenir compte des échanges avec l'environnement, notamment des forces.

Cinématique

On appelle **cinématique** cette branche de la mécanique qui s'attache à décrire le mouvement des corps (description géométrique en faisant abstraction de leur origine)

Étudier la cinématique d'un mouvement revient donc d'abord à capturer ce mouvement pour en extraire du signal à chaque instant les coordonnées de certains points choisis. On obtient ainsi les trajectoires spatiales de certains points représentatifs du mouvement d'une partie anatomique.

Partant on peut extraire de ces coordonnées les paramètres représentatifs du mouvement et les enchaînements (coordination)

Par exemple pour la marche : l'enjambée, la durée du poser et du lever, la fréquence de cycle, vitesse

Tout cela ne nécessite pas de connaître les forces échangées avec l'environnement.

Ces données peuvent servir à des fins diagnostique ou pour des études comparatives, entre espèces ou même intra-spécifique. Tous les homo sapiens ne marchent pas *dans le détail* de la même façon

car tous n'ont pas la même morphologie et il y a des aussi des dimensions culturelles dans la façon de marcher.

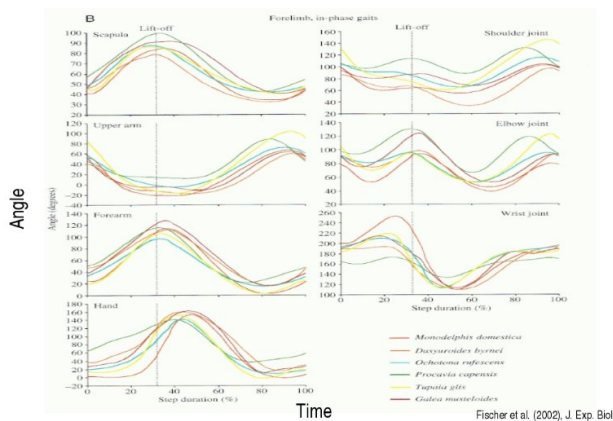


La prise de données nécessite donc des systèmes adaptés au mouvement étudié. Ici une chèvre est pourvue de marqueur réfléchissant pour étudier sa locomotion. Elle marchera sur un tapis roulant placé devant un appareil de ciné-radiographie qui filmera son omoplate. Objectif : savoir si le mouvement de l'omoplate peut être proprement mesuré grâce à l'utilisation de marqueurs externes placés sur la peau ?

Résultat : seul le mouvement des segments distaux est bien mesuré par les systèmes de marqueurs externes. Pour les segments proximaux comme l'omoplate d'autres méthodes comme la vidéo-radiographie sont nécessaires.

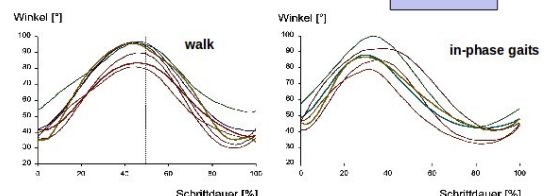
L'analyse des images au rayon X demande beaucoup de temps, car il faut y repérer à la main les points représentatifs choisis (articulations, ..., une 20taine de point par image). Un petit mammifère étant susceptible de réaliser 6 cycles locomoteurs à la seconde, il faut filmer le mouvement en haute vitesse (ordre de grandeur 200 images / seconde). L'analyse d'une simple séquence locomotrice de 10 secondes représente donc déjà un gros travail.

Etude comparative: Cinématique du membre antérieur des petits mammifères pendant la course



Rotation of the proximal segment (scapula, femur) makes half to three quarter of step length

Taxon	species	degree of rotation	effect
Marsupialia	<i>Monodelphis domestica</i> (Beutelratte)	59° ± 6°	53%
	<i>Dasyuroides byrnei</i> (Kowari)	44° ± 9°	58%
Rodentia	<i>Galea musteloides</i> (Wieselmeerschwein)	60° ± 4°	73%
	<i>Rattus norvegicus</i> (Ratte)	60° ± 5°	57%
Lagomorpha	<i>Acomys cahirinus</i> (Stachelmaus)	54° ± 5°	71%
	<i>Ochotona rufescens</i> (Pfeifhase)	37° ± 9°	66%
Scandentia	<i>Tupaia glis</i> (Spitzhörnchen)	59° ± 7°	43%
	<i>Microcebus murinus</i> (Mausmakil)	48° ± 5°	46%
Primates	<i>Eulemur fulvus</i> (Brauner Maki)	49° ± 9°	63%
	<i>Sagunus oedipus</i> (Lisztaffe)	49° ± 9°	63%
Artiodactyla	<i>Saimiri sciureus</i> (Totenkopffaffe)	56° ± 7°	52%
	<i>Capra hircus</i> (Hausziege)	41° ± 7°	73%
Hyracoidea	<i>Procavia capensis</i> (Klippschliefer)	53° ± 9°	63%



Appliquée à de nombreuses espèces animales, l'étude cinématique au moyen de la vidéo-radiographie a mis en évidence l'existence d'un patron locomoteur commun chez les petits mammifères (la diapo de gauche représente les variations des angles articulaires chez 6 espèces de mammifères pendant un cycle locomoteur). Plus spécifiquement, elle a par exemple permis de reconnaître le rôle majeur joué par l'omoplate chez les quadrupèdes dont la rotation contribue d'une façon prépondérante à l'avancée de la main depuis l'emplacement du lever jusqu'au poser. Pres de 75 % du mouvement de la main découle de la rotation de l'omoplate (diapo de droite). Longtemps pourtant les livres d'écoles faisait démarrer le membre antérieur à l'épaule et n'évoquait même pas cette omoplate !

Aujourd'hui l'étude de la cinématique a même pris une nouvelle dimension : On ne se contente plus d'étudier le mouvement lui-même, mais **sa variabilité**. L'étude mathématique de *la structure intime de cette variabilité* (par des méthodes non linéaires développées pour aborder les géométries fractales et les phénomènes chaotiques) permet de mettre en évidence des pathologies du système nerveux à des stades extrêmement précoces (dégénérescence). Avant même que les valeurs cinématiques n'en soient affectées, la structure de la variabilité est modifiée !

vitesse, accélération, loi de composition

La variation de la position rapportée au temps représente **la vitesse** (qui peut être négative si on se déplace vers la partie négative de l'axe)

Unité : m/s

La variation de la vitesse rapportée au temps représente **l'accélération** (qui peut être négative on a alors une décélération)

Unité : ms⁻²

Vitesse et accélération sont relatives à un référentiel.

La loi de composition des vitesses permet de passer d'un référentiel à l'autre si les deux référentiels sont galiléens.

Supposons l'un des référentiels fixe et l'autre en mouvement relatif par rapport au premier avec une vitesse d'entraînement V_e . Un corps en mouvement dans le second avec une vitesse V_r aura une vitesse absolue V_a dans le premier tel que $V_a = V_e + V_r$ C'est la loi de composition des vitesses.

Une loi identique existe pour les accélérations mais on doit alors tenir compte de la rotation de la terre et de l'accélération de Coriolis
 $A_a = A_e + A_r + A_{\text{coriolis}}$

On rappelle ici que l'on peut passer d'un référentiel galiléen à un autre : Un homme marche sur un tapis roulant : sa vitesse par rapport au sol peut être décomposée comme la somme de sa vitesse par rapport au tapis roulant et la vitesse du tapis roulant par rapport au référentiel du sol. Ceci est général et porte le nom de **loi de composition des vitesses**.

Le même raisonnement ne peut être tenu d'une façon aussi simple pour les accélérations. Il convient alors de tenir

compte de l'accélération de Coriolis, composante associée au mouvement de rotation de la Terre et la loi de composition est alors plus compliquée.

Dynamique

Modifier le mouvement

Pour modifier le mouvement d'un corps , on doit **agir** sur ce corps.

Cette **action** se traduit toujours par un **échange de forces**.

Ces forces peuvent être exercées à distance (par exemple la gravité) ou au contact de l'objet (par exemple des frottements)

Un corps dont le mouvement n'est pas modifié perdure dans son état.

Pas d'échange de force = je continue dans un mouvement rectiligne uniforme.

On ne peut pas « continuer a accélérer » sans qu'il y ait un échange de force.

Quelles variables pour quantifier le mouvement d'un corps ?

Notre expérience, nos sens :

Si on veut « compter le mouvement » on peut s'intéresser à son amplitude, à sa « force », à ce qui fait résistance au changement de ce mouvement

Plus un corps va vite , plus l'amplitude du mouvement est importante sur un temps donné. Plus un corps va vite, plus il est difficile de le faire dévier de sa trajectoire. La vitesse semble donc une première variable clé.

Et plus un corps est lourd plus il est difficile de le mettre en mouvement ou de l'écartier de sa trajectoire également.

Si on voulait quantifier le mouvement par une variable qu'on appellerait **quantité de mouvement** alors masse et vitesse joueraient un rôle « symétrique » par rapport à cette variable (masse et vitesse interviendraient par leur produit).

Faire varier la quantité de mouvement

Nous définirons la **quantité de mouvement** \mathbf{p} par le produit de la masse par le vecteur vitesse. $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ (\mathbf{p} est donc aussi un vecteur)

La quantité de mouvement peut varier au cours du mouvement lorsqu'on exerce des forces (par exemple le fait de pousser ou freiner un corps, modifie sa vitesse donc sa quantité de mouvement). Mais un corps qui tourne (même avec un module de la vitesse constant modifie \mathbf{p})

La vitesse de variation de la quantité de mouvement au cours du temps, sa dynamique temporelle, est l'objet d'un principe énoncé par Isaac Newton (et nommé **principe de la dynamique**):

La dérivée de la quantité de mouvement d'un corps se déplaçant dans un référentiel galiléen égale la somme (vectorielle) des forces extérieures s'exerçant sur ce corps.

Cas particulier où la masse reste constante

Si la masse du sujet reste constante- c'est le cas classique d'un sujet qui marche-, la variation de la quantité de mouvement du sujet est donc égale à sa masse multipliée par la variation de la vitesse.

$$dp = m \cdot dv$$

Et le premier principe s'écrit $m \cdot dv_G/dt = \sum F$

Ou encore $m \cdot a = \sum F$

Le produit de la masse par l'accélération du centre de gravité égale la somme des forces extérieures

Cette équation est une équation d'évolution. Elle permet de prédire la position du centre de gravité à un instant ultérieur.

Exemple trajectoire balistique (cf TD)

2 microcèbes A et B sautent de branche en branche. Ils ont des masses m_A et m_B avec $m_A > m_B$. Arrivé sur la dernière branche avant le sol situé à 1,50 m de hauteur, Ils démarrent tous les deux avec des vitesses initiales orientées horizontalement. Le microcèbe A saute avec une vitesse initiale horizontale de 2m/s, le microcèbe B, fatigué, se laisse tomber. A quels instants les microcèbes toucheront-ils le sol ? Lequel touche le sol le premier ?

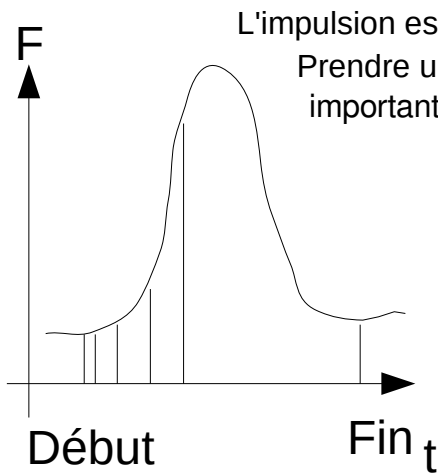
[Résolution en détaillant au tableau la démarche d'un problème (simple) de mécanique]

L'impulsion

Par l'exercice d'une force, on modifie la quantité de mouvement du système. Plus grande est la force, plus on modifie la quantité de mouvement. Mais plus l'exercice de cette force est long, plus on est susceptible de modifier cette quantité de mouvement significativement aussi.

On définit l'impulsion (ou percussion mécanique) comme l'intégration de la force pendant l'intervalle de temps où elle est exercée.





L'impulsion est donc représentée graphiquement par l'aire sous la courbe.
 Prendre une bonne impulsion pendant un saut, c'est exercer une force importante sur le court intervalle de temps du poser du pied mais aussi maximiser la durée de contact.
 Cette impulsion fait varier la quantité de mouvement.

L'impulsion se mesure en N.s

Or les Newton sont homogènes à des kg ms^{-2}
 (Penser au poids $P [N] = mg [\text{kg} \cdot \text{ms}^{-2}]$)

L'impulsion est donc homogène à des $\text{kg} \cdot \text{ms}^{-2}$ que multiplie des seconde i.e des $\text{kg} \cdot \text{m/s}$
 C'est aussi l'unité de la quantité de mouvement $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$.

Par conséquent impulsion et quantité de mouvement s'expriment dans la même unité.

La relation fondamentale de la dynamique nous dit $d\mathbf{p}/dt = \sum \mathbf{F}(t)$

Donc $d\mathbf{p} = \sum \mathbf{F}(t) dt$ et donc entre les instants t_1 et t_2

$$p_2 - p_1 = \sum \int_{t_1 \rightarrow t_2} \mathbf{F}(t) \cdot dt$$

La variation entre t_1 et t_2 de la quantité de mouvement est égale à la somme des Impulsions des forces s'appliquant entre t_1 et t_2

Dynamique de rotation

Les forces dont la droite d'action ne passe pas par le centre de gravité produisent une rotation du système autour de son centre de gravité.

Nous savons prédire le déplacement (translation) du centre de gravité lorsque les forces sont connues

Mais la question suivante demeure intacte : comment le système tournera-t-il autour de son centre de gravité ? Nous avons là aussi besoin d'outils.

Comment quantifier le mouvement de rotation ?

On introduit à cette fin la **quantité de mouvement angulaire** encore appelé **moment cinétique** $\sigma_{i/O}$

$$\sigma_{i/O} = \mathbf{OM}_i \wedge m_i \mathbf{v}_i \text{ pour l'élément de matière indicé } i.$$

$$\text{Pour notre système complet } \sigma_{/O} = \sum \mathbf{OM}_i \wedge m \mathbf{v}_i$$

La variation dans le temps de ce moment cinétique vaut (en dérivant le produit vectoriel)

$$\begin{aligned}
d\sigma_{/O}/dt &= \sum d(\mathbf{OM}_i)/dt \wedge m_i \mathbf{v}_i + \sum \mathbf{OM}_i \wedge m_i \cdot d\mathbf{v}_i/dt \\
&= \sum \mathbf{v}_i \wedge m_i \mathbf{v}_i + \sum \mathbf{OM}_i \wedge m_i \cdot d\mathbf{v}_i/dt \quad [\text{le produit vectoriel de } v_i \text{ par } v_i \text{ vaut } 0] \\
&= 0 + \sum \mathbf{OM}_i \wedge m_i \cdot d\mathbf{v}_i/dt \quad [m_i \cdot d\mathbf{v}_i/dt = \mathbf{F}_{\text{ext},i} \text{ d'après Newton }]
\end{aligned}$$

On reconnaît à droite le moment en O des forces extérieures et on retiendra

$$d\sigma_{/O}/dt = \sum_i \mathbf{M}_{/O}(\mathbf{F}_{\text{ext}})$$

Pendant la phase aérienne d'un saut, le sauteur n'ayant plus de contact avec le sol, le moment cinétique se conserve car le poids s'exerçant au centre de gravité, son moment est nul. La dérivée du moment cinétique par rapport au temps est donc nul ce qui signifie que le moment cinétique est constant.

Le sauteur peut néanmoins effectuer un transfert de moment cinétique d'une partie du corps sur une autre, et d'un axe de rotation vers un autre tout en maintenant constant le moment cinétique global du corps. On appelle cela la nutation. Une toupie subit la même chose lorsque sa vitesse de rotation ralentie : elle tourne sur son axe pendant que ce dernier décrit un cercle de plus en plus grand à mesure que la vitesse de rotation diminue.

Les gymnastes et sauteurs au plongeur sont experts de ce type de transfert.

Nous pouvons donc compléter notre mémo avec les variables « dynamiques »

Le mémo

(provisoire)

Degrés de liberté

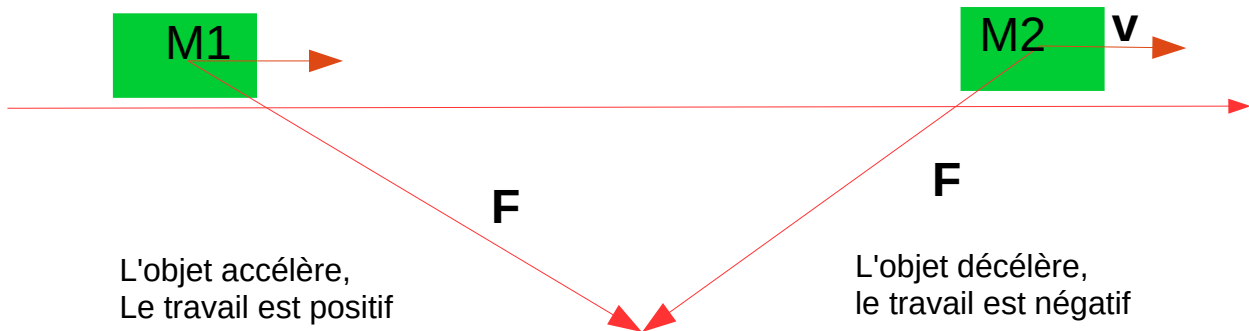
	Translation	Rotation
Référentiel / syst. coord.	cartésienne	polaire, cylindrique
Description du système	Masse m	moment d'inertie I
Action	Force F	Moment de la force $\mathbf{M}_{F/G}$
Equilibre	$\sum \mathbf{F} = \mathbf{0}$	$\sum \mathbf{M}_{F/G} = \mathbf{0}$
Quantité de mouvement	$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$	$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{OM} \wedge \mathbf{p}$
Equation du mouvement	$d\mathbf{p}/dt = \sum \mathbf{F}_{\text{ext}}$	$d\boldsymbol{\sigma}/dt = \mathbf{M}_{/O}(\mathbf{F}_{\text{ext}})$

Energie

Quantifier le travail associé à l'exercice d'une force

Le travail à fournir pour exercer une force dépend de l'intensité de la force exercée.

Il dépend aussi de la façon dont cette force est dirigée par rapport au déplacement de l'objet du point M_1 au point M_2



Il dépend naturellement aussi du déplacement de l'objet, plus j'accompagne l'objet sur une longue distance, plus je me fatigue.

D'où la définition

Travail de F entre 1 et 2 et on note $W_F = F \cdot M_1M_2 \cdot \cos(\angle F, M_1M_2) = F \cdot M_1M_2$
(produit scalaire de F et M_1M_2)

Unité : Le Joules, noté J

Forces conservatives et non conservatives

Une force est dite conservative si le travail de cette force ne dépend pas du chemin explicitement parcourus mais seulement des positions initiale et finale de l'objet

c'est le cas du poids et du champ électrique

[en fait à chaque force conservative on peut associer une énergie potentielle et le travail de la force conservative entre deux positions égale la variation d'énergie potentielle entre ces deux positions]

Dans le cas contraire c'est une force non conservative

C'est notamment le cas des frottements où le travail dépend explicitement du chemin parcouru.

Cas de nullité du travail d'une force

Si le chemin parcouru est cyclique **et** si la force est conservative le travail est nul : la force travaille positivement pendant une partie du trajet et négativement le reste. Il faut raisonner en terme de bilan pour l'objet qui subit la force. On lui fournit de l'énergie puis on lui en ôte.

Si la force reste perpendiculaire au déplacement de l'objet, le travail de la force est nul (cosinus est nul).

C'est le cas du poids : quand je glisse horizontalement sur mes patins ou si je marche sur terrain plat, mon centre de gravité oscille verticalement, donc le poids travaille tantôt positivement, tantôt négativement mais au final le travail du poids entre le point de départ et d'arrivée aura été nul.

Travail interne et travail externe

Le travail interne est le travail des forces internes au système

Le travail externe est le travail des forces extérieures au système

Toute la difficulté est donc de savoir quand une force est interne et quand elle est externe.

Pour cela il convient de définir soigneusement le système étudié.

Un homme qui marche est soumis à son poids et aux forces de réaction du sol. Ces forces sont externes.

Le travail musculaire pour ramener une jambe en avant pendant le lever est associé à une activité musculaire et est donc interne.

Puissance associée au travail d'une force

La puissance moyenne P mesure l'énergie fournie par unité de temps. La puissance est égale au travail W d'une force divisé par le temps δt mis pour effectuer ce travail .

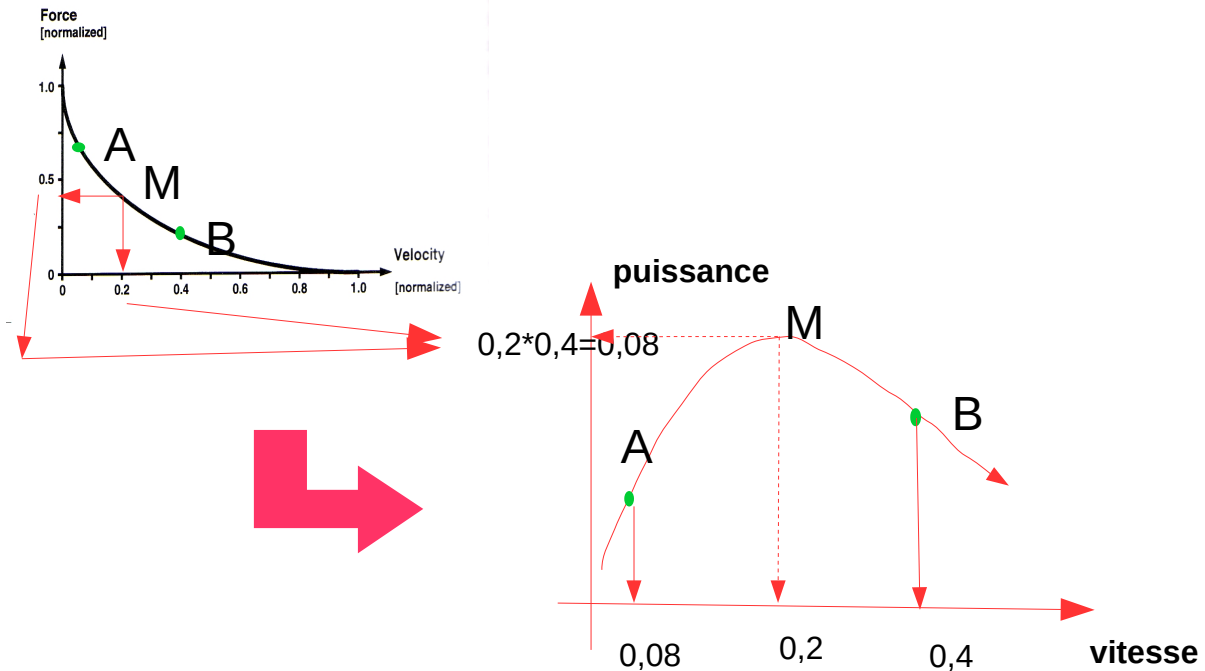
$$\text{Puissance moyenne} = W / \delta t = \mathbf{F} \cdot \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 / \delta t$$

Or $\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 / \delta t$ représente la vitesse de déplacement

et donc $P = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$ (produit scalaire du vecteur force par le vecteur vitesse)

Exemple relation force vitesse et puissance de la contraction musculaire

Plus une fibre musculaire se contracte rapidement, moins la force maximale qu'elle peut produire est importante. La puissance développée associée à cette contraction admet alors un maximum atteint pour une certaine valeur de la vitesse de contraction dépendant du type de fibre.



Existence d'une vitesse optimale de contraction qui maximise la puissance développée

Energie cinétique

C'est l'énergie liée au système en mouvement. Elle vaut $1/2 m v^2$

Cette expression ne tombe pas du ciel

Elle découle directement du premier principe de la dynamique

$F_{ext} = m \, dv/dt$ multiplions à droite et à gauche par v

Il vient $F_{ext} \cdot v \cdot dt = m \cdot v \cdot dv$ [$v \cdot dt$ représente un déplacement dM]

soit encore $F_{ext} \cdot dM = d(1/2 m v^2)$

A gauche apparaît le travail de F pendant le déplacement dM , à droite la variation d'une quantité homogène à une énergie qu'on décide d'appeler énergie cinétique car elle est liée au mouvement

D'où le théorème la variation d'énergie cinétique entre deux instants t_1 et t_2 égale le travail des forces extérieures exercées sur le système entre t_1 et t_2 .

L'énergie cinétique d'un système est égale à la somme de l'énergie cinétique du centre de masse affecté de toute la masse du système et de l'énergie cinétique du système correspondant dans le référentiel du centre de masse (CdM)

Autrement dit : énergie cinétique du système = énergie cinétique liée à la translation du CdM

+ énergie cinétique de déplacement des parties par rapport au CdM

En particulier l'énergie cinétique d'élément **en rotation** autour du CdM vaut

$$E_{C,rot} = \sum 1/2 m_i v_{i/G}^2 = \sum 1/2 m_i r_i^2 \omega^2 = 1/2 (\sum m_i r_i^2) \omega^2 = \mathbf{1/2 J \omega^2} \quad \text{avec } \omega$$

vitesse angulaire

Energie potentielle

L'énergie potentielle c'est l'énergie lié à l'existence d'un champ de force susceptible de mettre le système en mouvement

La gravitation est susceptible de mettre le système en mouvement si on le lâche

On parle de l'**énergie potentielle de pesanteur**

Une bille posée sur un ressort comprimé est susceptible d'être projetée en l'air si on relâche le ressort.

On parle d'**énergie potentielle élastique**

L'énergie potentielle égale en valeur absolue le travail qu'à du fournir un opérateur pour soulever le système au dessus du sol ou comprimer le ressort.

Energie potentielle de pesanteur à une altitude h = travail du poids le long d'un chemin vertical de longueur h = P.h = mg.h

Energie potentielle élastique après une compression du ressort de Δx à partir de sa position de repos $E_{pot,elast} = \int kx \cdot dx = k \int x dx = 1/2k \Delta x^2$

Energie mécanique

On appelle énergie mécanique E_m la somme de l'énergie cinétique E_c + les énergies potentielles E_{pot}

la variation de l'énergie mécanique

$$\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_{pot}$$

$$\text{or } \Delta E_c = W(F_{ext}) = W(F_{ext, cons}) + W(F_{ext, non cons})$$

La variation d'énergie potentielle est égale à l'opposé du travail des force conservatives

$$\Delta E_{pot} = - W(F_{ext, cons})$$

On a donc :

Que la variation d'énergie mécanique égale le travail des forces non conservatives. En particulier $E_m = Cte$ si les forces extérieures sont conservatives.

Energie potentielle et cinétique pendant la locomotion

Cavagna et Taylor fin des années 70 et début des années 80 ont fait courir toute une série d'animaux sur des plateformes dynamométriques.

A partir des forces ils ont pu accéder à la vitesse par intégration et donc à l'énergie cinétique

En intégrant une seconde fois ils obtiennent le déplacement et donc l'énergie potentielle

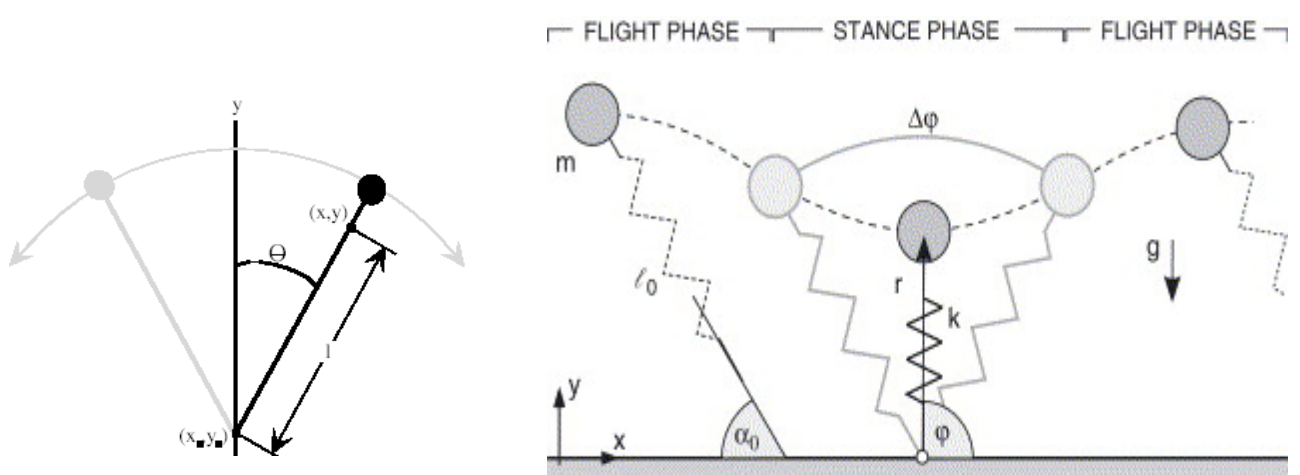
Que constatent-ils ?

Aux faibles vitesses il y a au cours du cycle locomoteur transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique et vice versa

Plus la vitesse augmente, moins cet échange est efficace car on constate que les variations des deux types d'énergie se font alors en phase.

Pendant la course il est alors proposé que les structures élastiques de l'organisme emmagasinent l'énergie sous forme d'énergie potentielle élastique pendant une phase du mouvement pour la restituer dans une seconde phase du cycle.

On a ainsi deux mécanismes de conservation d'énergie modélisés sous la forme du modèle du pendule inversé (marche) et du modèle masse ressort (course)



Flight phase = phase aeriene

Stance phase = phase du poser

Le mémo

Degrés de liberté

	Translation		Rotation
Référentiel / syst. coord.	cartésienne		polaire, cylindrique
Description du système	Masse m		moment d'inertie I
Action	Force F		Moment de la force $M_{F/G}$
Equilibre	$\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{0}$	et	$\Sigma M_{F/G} = 0$
Quantité de mouvement Moment cinétique	$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$		$\sigma = \mathbf{OM} \wedge \mathbf{p}$
Equations d'évolution	$d\mathbf{p}/dt = \Sigma \mathbf{F}_{ext}$		$d\sigma/dt = M_{/O}(F_{ext})$
Energie cinétique totale =	$1/2 m v_G^2$	+	$1/2 J \omega^2$

Loi de conservation

si pas d'échange de force
avec l'extérieur

Energie mécanique
constante

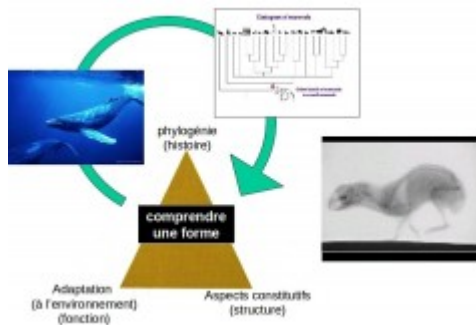
Moment cinétique total
constant

si pas de forces
non conservatives

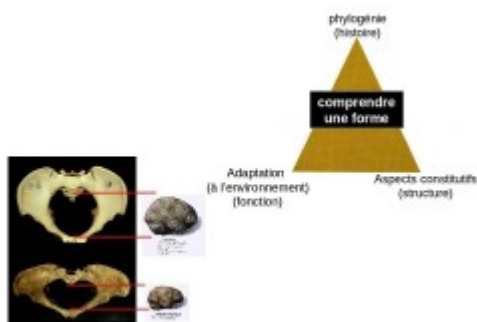
Energie mécanique
constante

ADERF cours n°2

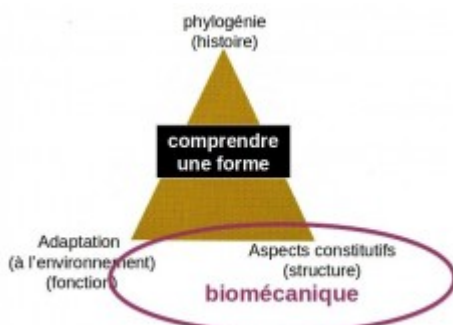
Nous avons évoqué lors du premier cours le cadre d'étude d'une structure biologique et dis qu'il fallait considérer au moins trois facteurs qui gouvernent la forme d'une structure biologique (Triangle de Seilacher):



La réponse tient entière dans l'histoire évolutive de cet animal: si on compare la baleine avec ses ancêtres c'est à dire les petits mammifères terrestres et qu'on s'intéresse à la locomotion des petits mammifères (actuel) on retrouvera alors les traces de ces oscillations sagittales dans la course.

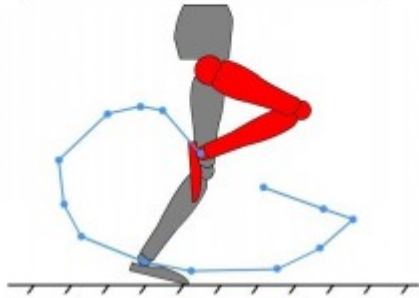
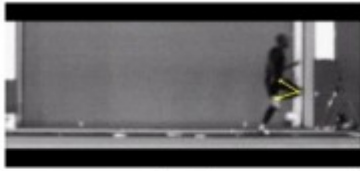


ce n'est pas le cas chez les grands singes. C'est que suite à notre station érigée, les viscères tombent vers le bas et que les ailes iliaques jouent aussi un rôle de support du système viscéral. Ce pôle fonctionnel traduit donc *les relations (au pluriel)* de la structure avec son environnement. Une forme est souvent le résultat d'un compromis.



- L'histoire évolutive du sujet d'étude. Le mouvement de nage d'une baleine avec ses oscillations dans le plan sagittal peut surprendre alors même que tous les poissons se déplaçant dans le même milieu oscillent dans un plan latéral. La réponse tient entière dans l'histoire évolutive de cet animal: si on compare la baleine avec ses ancêtres c'est à dire les petits mammifères terrestres et qu'on s'intéresse à la locomotion des petits mammifères (actuel) on retrouvera alors les traces de ces oscillations sagittales dans la course.
- Le deuxième pôle est fonctionnel. A quelle(s) fonction(s) participe la structure ? Étudions un bassin. Le bassin apparaît comme la clef de voûte qui relie deux chaînes segmentées, les jambes. Mais sa forme est aussi déterminée par son rôle dans la parturition - le corps du nouveau né mais surtout sa tête doivent encore pouvoir passer à travers le bassin. En outre chez l'homme, les ailes iliaques se sont ouvertes vers l'extérieur alors que ce n'est pas le cas chez les grands singes. C'est que suite à notre station érigée, les viscères tombent vers le bas et que les ailes iliaques jouent aussi un rôle de support du système viscéral. Ce pôle fonctionnel traduit donc *les relations (au pluriel)* de la structure avec son environnement. Une forme est souvent le résultat d'un compromis.
- Enfin le dernier pôle est structurel: la forme d'une structure dépend aussi des propriétés de la matière à partir de laquelle elle est façonnée. C'est par exemple l'orientation des microstructures osseuses qui détermine en partie la résistance d'un os aux contraintes. C'est la structuration interne du muscle et des tendons qui rend possible un stockage d'énergie au sein de ces structures...etc.

La biomécanique n'aura pas grand chose à dire sur le pôle 1. Elle pourra surtout apporter des informations sur les aspects de structure et sur sa relation au fonctionnel notamment en associant à une structure des mesures objectives de performance.



Exemple de forme dynamique: pendant la course la trajectoire de la cheville dessine une poulaine, ces chaussures du moyen-âge.

On notera que la forme étudiée n'est pas nécessairement statique comme l'est la forme d'un os, mais peut être dynamique comme l'est par exemple la trajectoire de la cheville lors du mouvement de course. Le cadre conceptuel pour l'étude des formes dynamiques reste le même.

Ce cadre d'étude d'une structure permet d'esquisser une compréhension synthétique de la structure. Les fonctions à prendre en considération dépendent naturellement de la structure étudiée. Pour le squelette appendiculaire, la locomotion paraît assez incontournable. Comme c'est elle qui permet l'accès à la nourriture, à la recherche du partenaire, et qui permet aussi la fuite, son efficacité est primordiale et une inadaptation à l'environnement liée à une mauvaise performance de la structure sera souvent fatale (manger par un prédateur, compétiteur plus fort lors de la reproduction...).

La locomotion est souvent présentée comme un comportement émergent résultant de l'interaction du système nerveux (capteurs sensoriels et commande, générateurs de rythmes spinaux (CPG)), du système musculo-squelettique (effecteur, retour proprioceptif) et de l'environnement, source de signaux et de force (de réaction sur le substrat). Le

1. Dans une première partie nous rappelons donc quelques étapes historiques en mettant en avant les innovations qui ont permis aux mammifères d'avoir les membres qu'ils ont.
2. Dans une seconde partie nous rappellerons , plus proche de nous, quelques marqueurs morphologiques de la bipédie humaine en comparaison de nos cousins proches.
3. Dans une troisième partie nous introduisons quelques arguments explicatifs sur le pourquoi de nos proportions. En quoi sommes nous des « bipèdes optimisés » ?

1. Nos origines, émergence du membre « tri-segmenté » (trois os long)

L'homme est un vertébré.

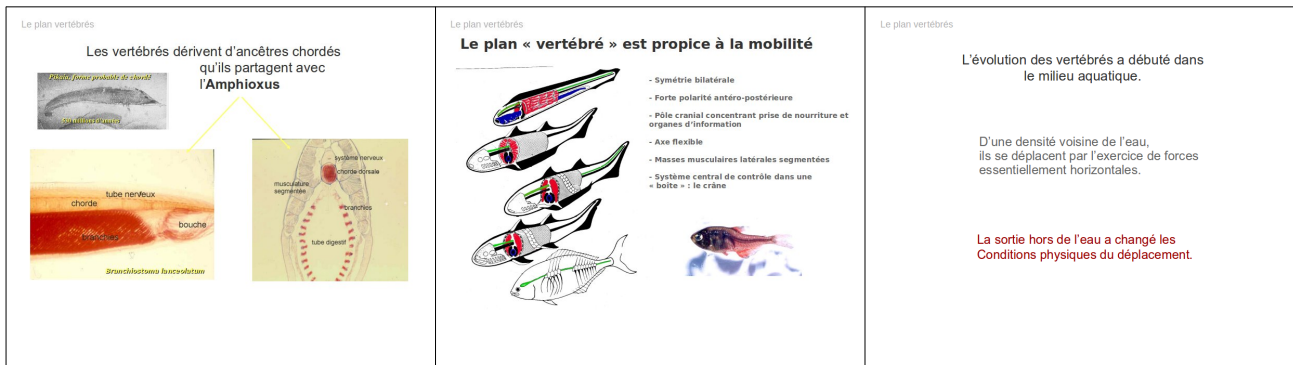
Les vertébrés sont des chordés c'est à dire des bilatériens (symétrie bilatérale) deuterostomien (au moment de la gastrulation la bouche est formée en second et l'anus en premier par opposition aux protostomiens où la bouche est formée en premier).

Chez les chordés, l'embryon a initialement trois feuillettes. (l'ectoderme, l'endoderme mais aussi un feuillet supplémentaire le mésoderme).

Tous les chordés ont: un tube neural en position dorsale, une corde c'est à dire une structure rigide, une queue au-delà de l'anus. Le long de cette corde et du tube neural, de part et d'autre, se rassemblent un certain nombre de cellules qui vont former des unités répétées : les somites. Chaque somite va fournir trois entités : le sclérotome, le myotome et le dermatome.

Le sclérotome est à l'origine des vertèbres, des côtes, des cartilages axiaux, des disques intervertébraux. Les myotomes donneront la musculature striée squelettique dorsale, ventrale, celle des

membres supérieurs et inférieurs. La corde se segmentera et deviendra le nucleus pulposus des disques fibreux intervertébraux.



Un représentant vivant des chordés (un bilateria deuterostomien) est l'amphioxus représenté ci contre. Dans cet exemple, la bouche est très rudimentaire, pas de mâchoire. Le développement cranio caudal de l'animal est régulé par des gènes HOX.

Comme eux ils présentent à l'état embryonnaire une tige rigide et élastique, renforcement longitudinale dans le plan de symétrie du corps, la corde, formée de cellules. Le tube neural deviendra le système nerveux central et se forme à partir de l'ectoderme dorsal (gouttière plurière qui se referme ensuite)

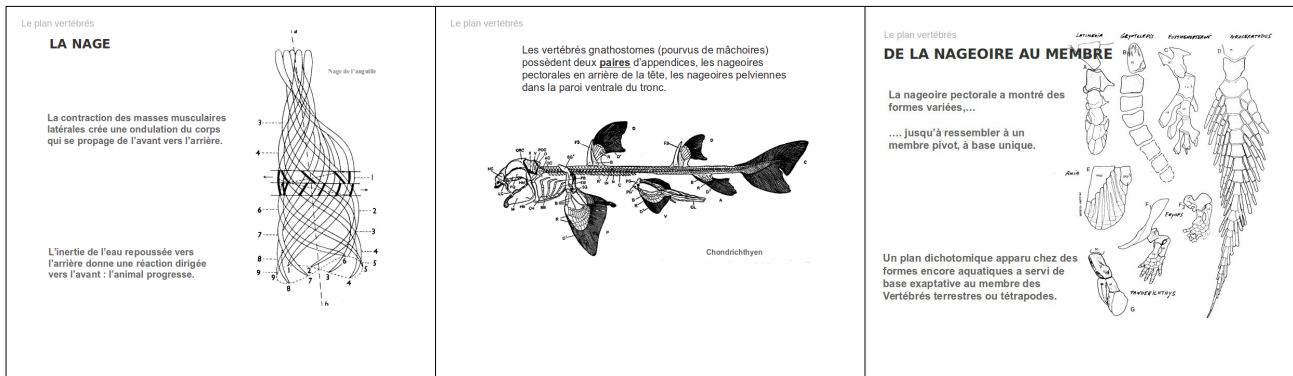
De part et d'autre le long de l'axe antéro postérieur se développera une musculature segmentée issue de somites. Ces fibres musculaires peuvent être de plusieurs types. Parmi les vertébrés actuels les plus primitifs, la musculature de la myxine présente déjà des fibres lente (type I) et rapide (type II).

Tous les vertébrés partagent un plan de construction commun avec les caractères suivants et qui est propice à la mobilité.

- À la symétrie bilatérale s'ajoute une forte polarité antéro-postérieur.
- Le pôle cranial concentre la prise de nourriture et les organes d'information (équilibre, visuel, olfactif, sonore).
- La partie postcraniale est un axe flexible le long duquel des masses musculaires segmentées prennent place et peuvent subir des ondes de contraction.
- Le système de contrôle est protégé par une boîte, le crâne.

L'origine des vertébrés est aquatique c'est-à-dire que les premiers vertébrés n'avaient pas trop à se soucier de supporter leur corps (densité du corps quasi identique à celle de l'eau) et pouvait concentrer leur effort sur la propulsion vers l'avant. La sortie des eaux a nécessité de pouvoir porter son corps. Et va demander un renforcement des ceintures et des membres mais donc aussi une augmentation des surfaces d'insertion musculaire.

Dans l'eau la propulsion est alors obtenue par des ondulations transversales de l'axe qui se propage selon une direction cranio-caudale. La position de biais d'une partie du corps pendant l'ondulation produit une force qui se projette selon deux composantes, une longitudinale et une transversale. La réaction à la composante longitudinale est une force de propulsion qui pousse le corps vers l'avant.



Chez les cyclostomes (bouche en forme de cercle) encore appelé agnathe (sans mâchoires) dont deux représentants célèbres sont la myxine et la lamproie) il n'y pas de nageoires paires. [Mais on a identifié les générateurs de rythmes spinal (CPG) chez la lamproie !].

Chez une partie des vertébrés, le premier arc branchial va devenir la mandibule. On les appellera alors les gnathostomes (vertébrés avec mâchoires). Ils ont également comme caractère commun d'avoir 3 canaux semi-circulaires au lieu de 2 dans l'oreille interne ainsi que la présence de gaines de myéline autour certaines fibres nerveuses. Enfin ils ont deux paires de nageoires (symétriques) et deux ceintures (pectorales ou scapulaire et pelvienne). A noter que la paire pelvienne n'est pas reliée au squelette axial.

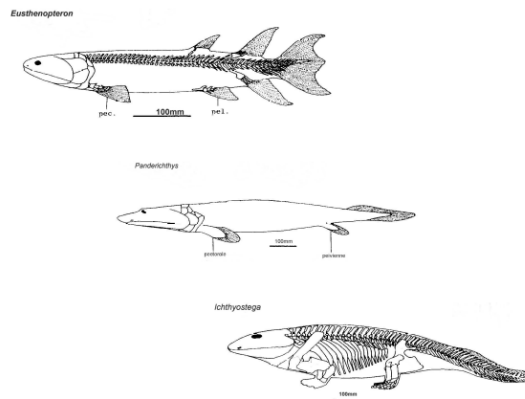
Des vertébrés avec mâchoires vont descendre deux groupes qui persistent aujourd'hui : les poissons cartilagineux (chondrichthyens, par ex. les requins) et les poissons osseux (ostéichthyens). Ce groupe des ostéichthyens donnera deux groupes de poissons : ceux à nageoire rayonnée (actinoptérygien) et ceux à nageoire charnue (sarcoptérygien).

C'est chez certains ostéichthyens (poissons osseux) du dévonien comme par exemple Eustheropteron que la nageoire aura un jour une structure qui se rapproche de celle du membre chiridien primitif car une partie basale unique articulée dans la cavité glénoïde (ou cotyloïde pour la ceinture pelvienne) et porte deux pièces osseuses sur lesquelles se disposent en éventail des rayons osseux puis des rayons souples. On assimile le premier « segment » basale à un stylo-pode (humérus ou fémur) et les suivant au zeugopode (radius ulna ou tibia fibula). Au delà les homologies sont plus hasardeuses.

Les positions des insertions musculaires, le type d'articulation de l'humérus chez Eustheropteron en font une structure très proches de celui des premiers tétrapodes comme les amphibiens dont un représentant est Eryops.

Le coude d' Eustheropteron était fonctionnel et il pouvait vraisemblablement s'appuyer sur le fond.

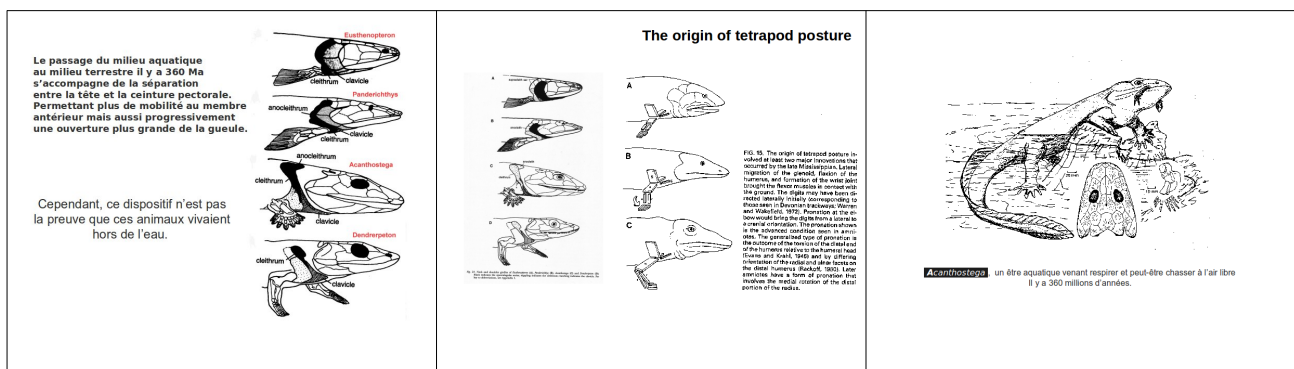
La ceinture pelvienne et le membre chiridien sont d'origine endosquelettique (ossification à partir des cartilages embryonnaire) tandis



que la ceinture pectorale (comme les nageoires paires) présente une double origine endosquelettique et exosquelettique (os d'origine dermique). A noter aussi que les poissons osseux ont une vessie natatoire, une poche qui peut se remplir d'une façon contrôlée de gaz, ce qui leur permet d'ajuster leur équilibre hydrostatique à différentes profondeurs.

Parmi ceux là, les dipneustes et les tétrapodes développeront une respiration pulmonée. Ce sont des poissons de faible profondeur fréquemment appuyés sur le fond et qui sont supposés être les premiers sortis des eaux.

Dans leur ceinture pectorale, on observe principalement un cléithrum, un supracléithrum, une clavicule et une inter-clavicule d'origine exosquelettique ainsi qu'un coracoïde et une scapula d'origine endosquelettique. Le passage du milieu aquatique au milieu terrestre il y a 360 Ma s'accompagne de la séparation entre la tête et la ceinture pectorale. Permettant plus de mobilité au membre antérieur mais aussi progressivement une ouverture plus grande de la gueule.



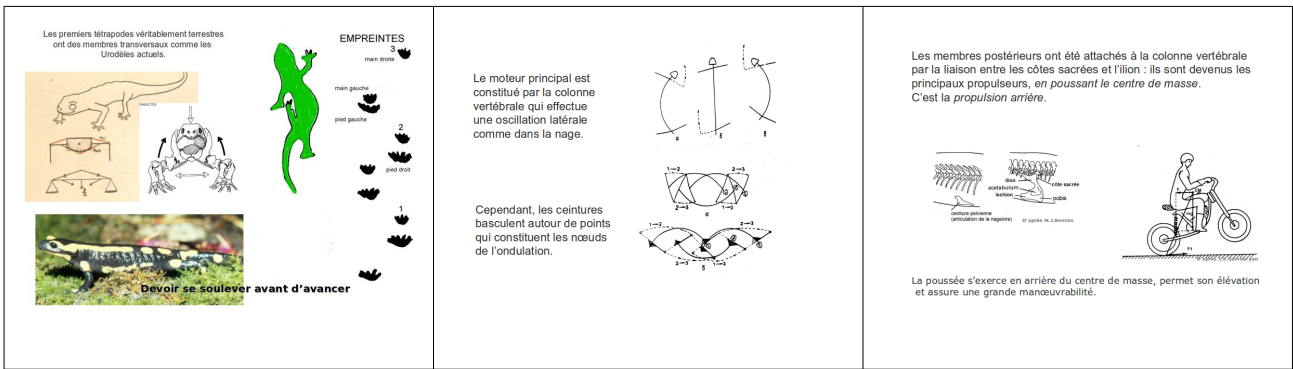
Au cours de l'évolution des vertébrés, on assiste au niveau des ceintures à une réduction progressive des pièces exosquelettiques au profit des formations endosquelettiques.

La ceinture pectorale n'a pas de relation directe avec la colonne vertébrale sauf chez les raies, elle est soit libre (amphibien, mammifère), soit reliée au crâne par une pièce d'origine exosquelettique, le supratemporal chez les ostéichthyens, soit liée à la cage thoracique (sauropside).

La ceinture pelvienne, elle, est très rudimentaire et libre chez les poissons alors qu'elle se renforce chez les tétrapodes, se complique et se lie à la colonne vertébrale.

L'émergence des tétrapodes nécessite au moins trois évolutions: une migration latérale des glénoïdes, une flexion de l'humérus, la formation du poignet ont amené les muscles fléchisseurs en contact avec le sol. Les doigts ont dû être orientés latéralement au début. Enfin une pronation du coude va amener les doigts d'une orientation latérale vers une orientation crâniale.

Il y a 420 millions d'années, au Dévonien, les conditions physico-chimiques ont permis la vie hors de l'eau sur les marges continentales, puis sur la terre ferme. Certains vertébrés qui vivaient en eau peu profonde possédaient déjà l'essentiel des appareils de survie : des poumons, des membres paires articulés.

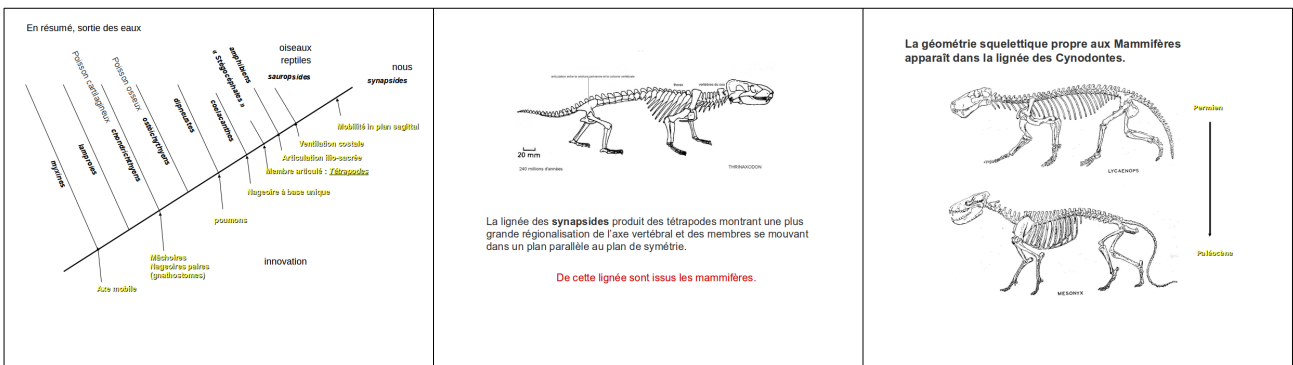


Les premiers tétrapodes véritablement terrestres ont des membres transversaux comme les Urodèles actuels. Ils doivent se soulever avant d'avancer.

La locomotion terrestre des tétrapodes s'est développée dès que le membre postérieur a remplacé le membre antérieur dans le rôle de propulseur. C'est l'articulation de l'ilion avec le sacrum qui marque ce changement radical.

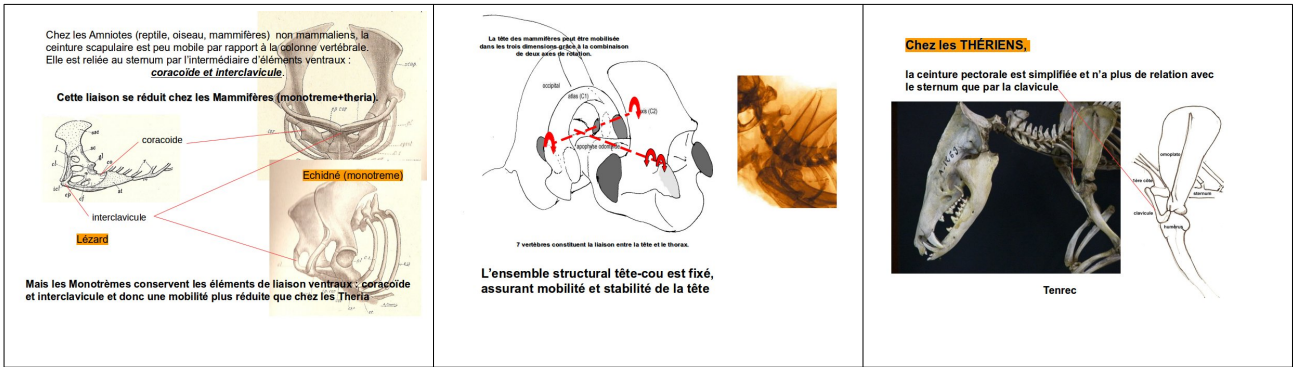
Les membres postérieurs ont été attachés à la colonne vertébrale par la liaison entre les côtes sacrées et l'ilion : ils sont devenus les principaux propulseurs, *en poussant le centre de masse*. C'est la *propulsion arrière*.

La poussée s'exerce en arrière du centre de masse, permet son élévation et assure une grande manœuvrabilité.



La lignée des synapsides produit des tétrapodes montrant une plus grande régionalisation de l'axe vertébral et des membres se mouvant dans un plan parallèle au plan de symétrie.

Chez les Amniotes (reptile, oiseau, et mammifères) non mammaliens, (donc chez les reptiles et oiseaux) la ceinture scapulaire est peu mobile par rapport à la colonne vertébrale. Elle est reliée au sternum par l'intermédiaire d'éléments ventraux : *coracoïde et interclavicule*.

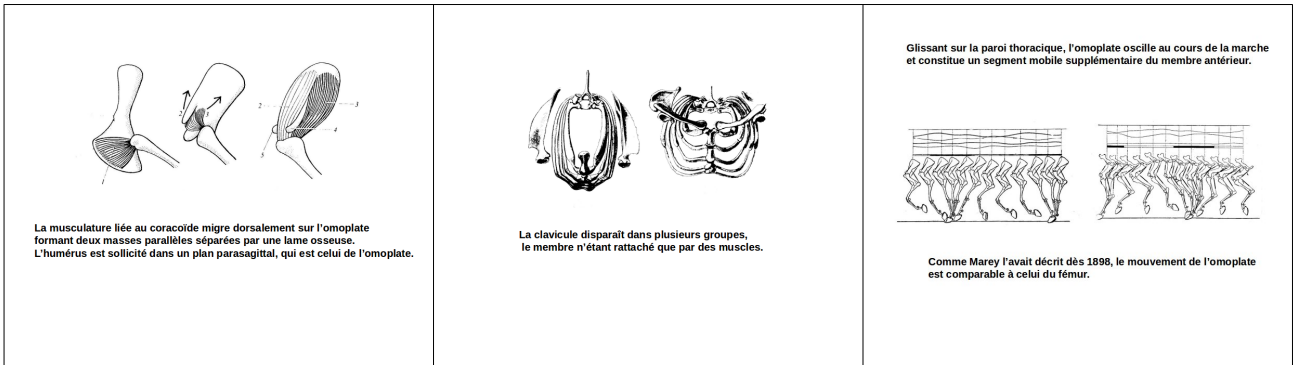


Cette liaison se réduit globalement chez les Mammifères (monotrème + theria).

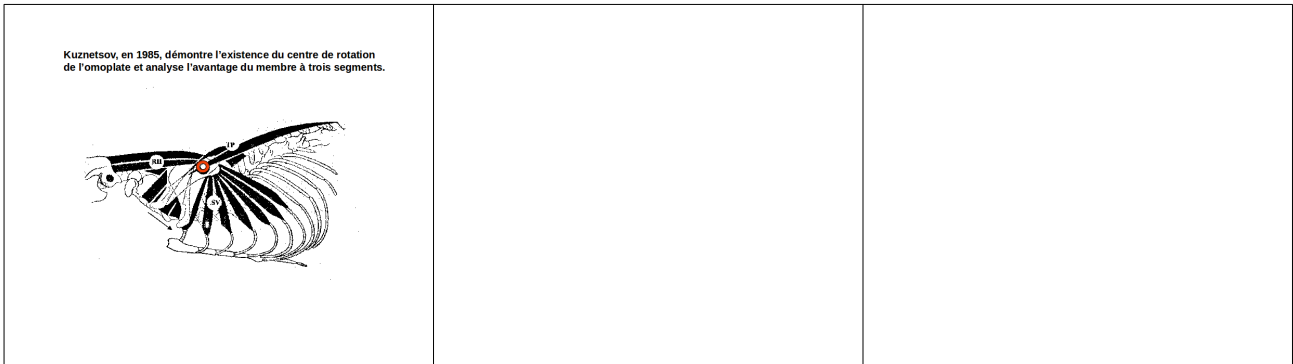
Mais les Monotrèmes conservent les éléments de liaison ventraux : coracoïde et inter-clavicule et donc une mobilité plus réduite que chez les Theria. Glissant sur la paroi thoracique, l'omoplate oscille au cours de la marche et constitue un segment mobile supplémentaire du membre antérieur.

Les autres mammifères, les Thériens, partagent exclusivement plusieurs caractères associés à la posture générale du corps et aux modalités de la locomotion :

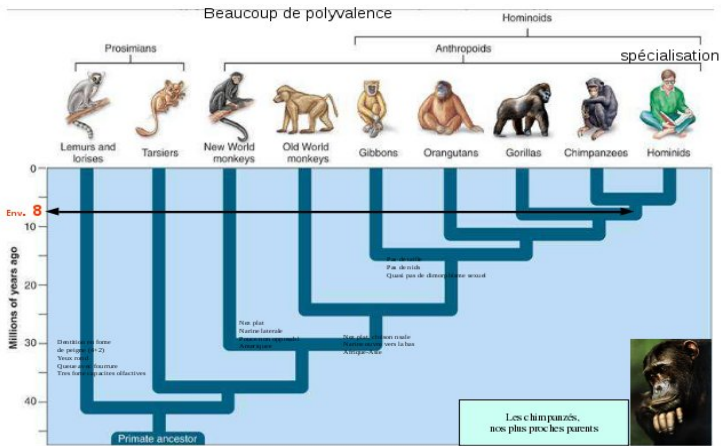
- la ceinture pectorale est simplifiée et n'a plus de relation avec le sternum que par la clavicule
- la musculature liée au coracoïde migre dorsalement sur l'omoplate formant deux masses parallèles séparées par une lame osseuse.
- l'humérus est sollicité dans un plan para-sagittal, qui est celui de l'omoplate.



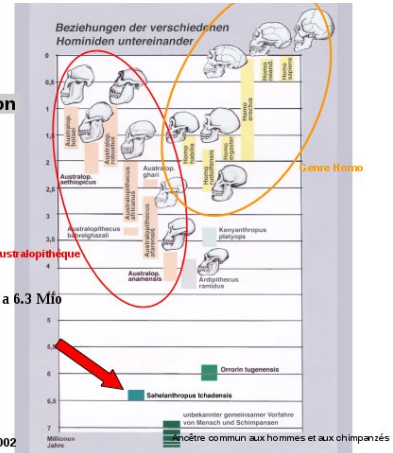
La clavicule disparaît même dans plusieurs groupes de Thérien, le membre n'étant rattaché que par des muscles.



2. Quelques marqueurs morphologiques de la bipédie humaine en comparaison de nos cousins proches.



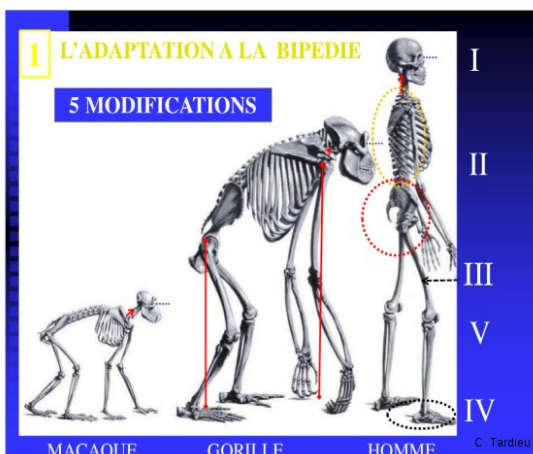
Nos ancêtres, depuis notre séparation d'avec le clade des Chimpanzés



L'homme apparaît après environ 40 millions d'année d'existence des primates. Il fait partie des catarhiniens (narines rapprochées séparées par une cloison nasale). Notre plus proche cousin est le chimpanzé.

Parmi les primates, les hominidés sont une lignée vieille d'au moins 6 millions d'année d'existence, de quoi peaufiner notre station érigée. Les fossiles sont actuellement classés en deux genres: Australopithecus et Homo. Leur plus vieil ancêtre commun connu remonte à environ 6.2 million d'années.

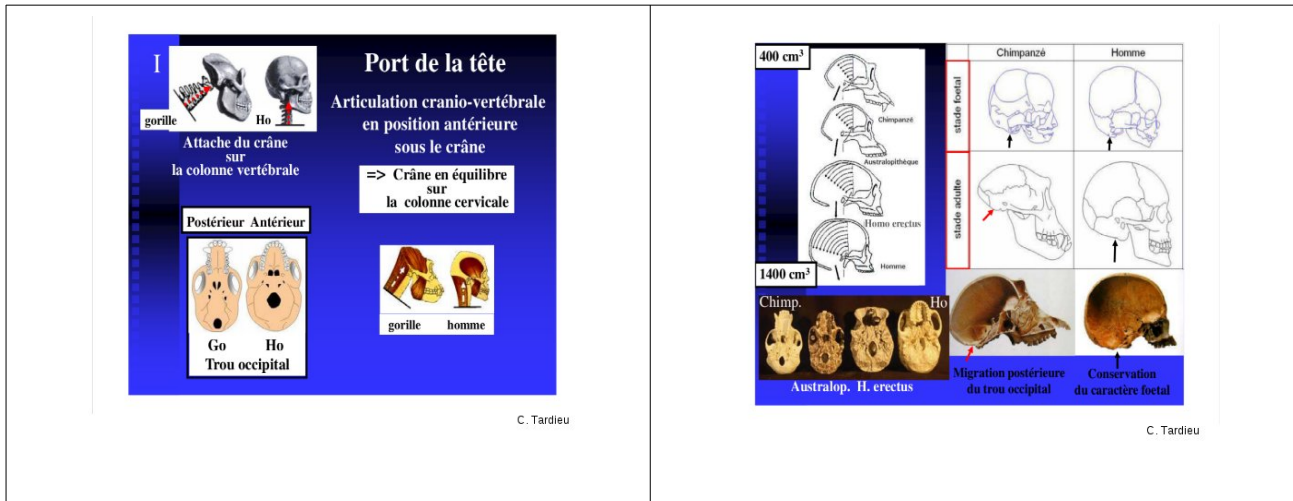
L'adaptation globale à la bipédie porte sur plusieurs grands caractères :



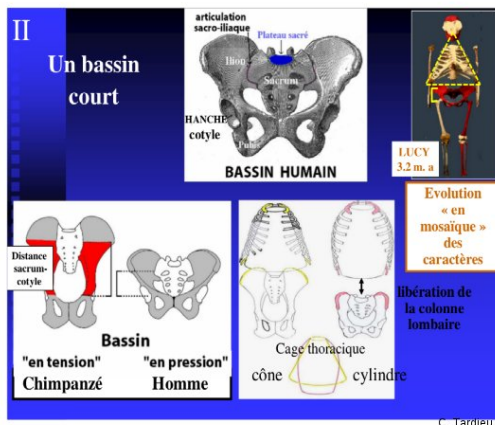
1. le port de la tête
2. la bassin
3. Le positionnement relatif des ceintures et la courbure lombaire
4. l'obliquité fémorale
5. le pied.
6. des proportions adaptées à une marche et une course économique

1. Le port de la tête

La tête est maintenant supportée, « à l'équilibre » sur la colonne cervicale quasi verticale. La réduction des moments du poids de la tête permet une réduction de la musculature du cou et aussi des zones d'insertion associées. Ceci est rendu possible grâce au maintien d'un caractère fœtal : le trou occipital est bien centré. Oui, il faut bien garder à l'esprit que le trou occipital est centré chez le fœtus humain ET chez le fœtus de nos cousins. C'est chez nos cousins qu'il migre durant la croissance, alors que nous conservons ce caractère en grandissant.

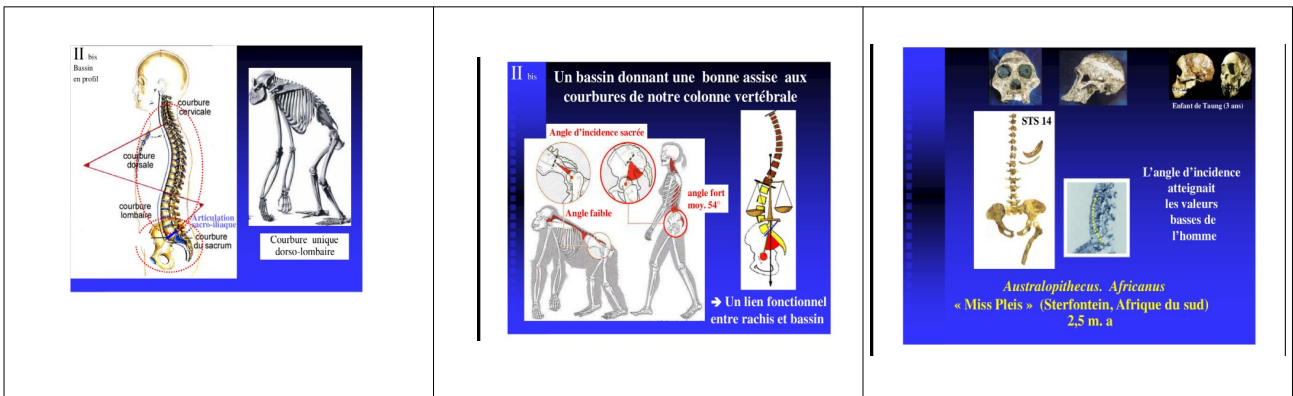


2. Le bassin



Le bassin devient plus court, les ailes iliaques plus ouvertes supportent mieux les masses viscérales. Les cotyles sont plus écartés. Le thorax change de forme et libère un peu plus la colonne lombaire. Mais c'est une évolution mosaïque comme en témoigne Lucie dont le bassin est « plus humain mais le thorax encore comme celui des grands singes.

3. Courbures lombaires

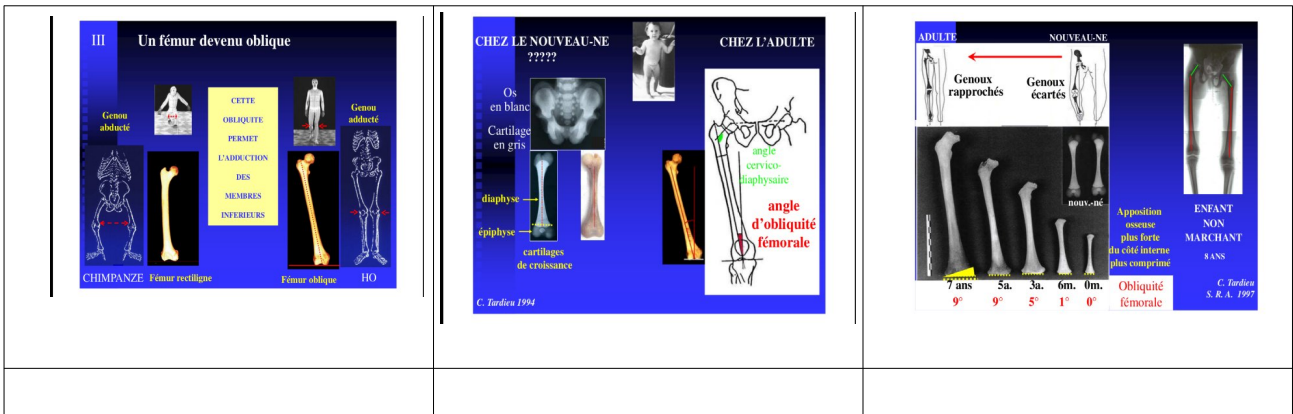


Avec la station érigée humaine, il y a introduction d'une triple courbure de la colonne lombaire, dorsale et cervicale, par opposition au grand singe où la courbure dorso lombaire est unique.

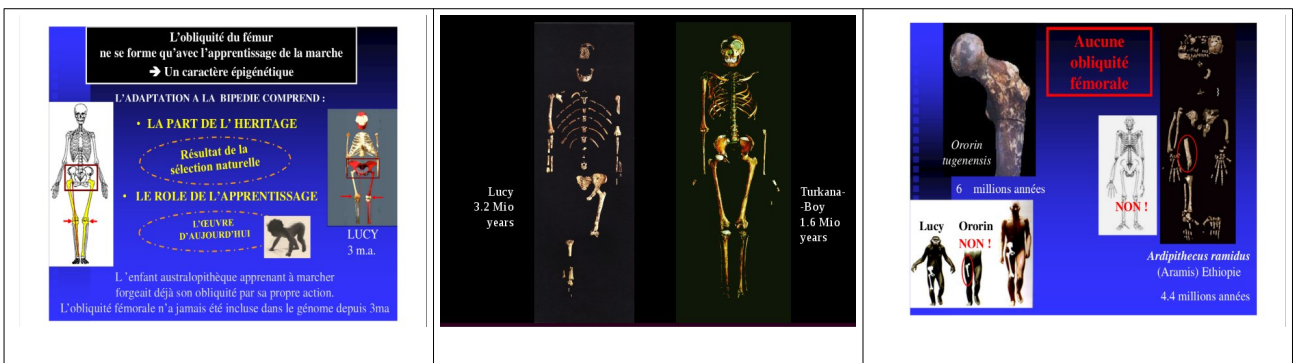
Ces courbures sont contrôlées par l'angle d'incidence du sacrum.

Ce dernier est défini comme l'angle que font le plan passant par le centre des cotyles et du plateau sacré et la perpendiculaire au plateau sacré. L'angle d'incidence sacrée est très faible chez les grands singes et fort chez l'humain. Ce sont donc des caractères qui permettent de se faire une idée de la droiture de nos ancêtres. Chez les australopithèques les valeurs de l'incidence sacrée atteignent les valeurs basses de l'homme.

4. L'obliquité fémorale



L'obliquité fémorale est propre à une bipédie efficace. Elle est faible chez le chimpanzé qui écarte les genoux lorsqu'il marche bipède. Absente chez les humains qui n'ont pas mis en charge leur squelette (exemple de famille en Turquie se déplaçant à « 4 pattes », à cause d'un problème congénital au cervelet - pas d'équilibre bipède possible).



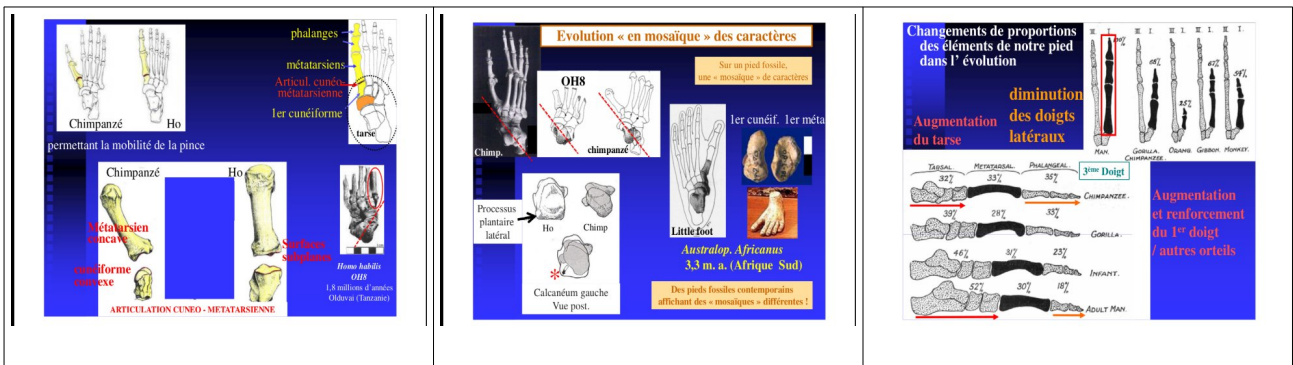
L'obliquité fémorale est bien liée à la mise en charge du squelette. Elle est absente chez le nouveau né. Un enfant non marchant ne développe pas d'obliquité fémorale. L'obliquité fémorale est donc un caractère épigénétique et n'est pas inclus dans le génome.

Là encore cela permet de dire que Lucy et le Turkana boy étaient déjà des bipède efficaces. Par contre Ororin tugenensis ne l'était vraisemblablement pas.

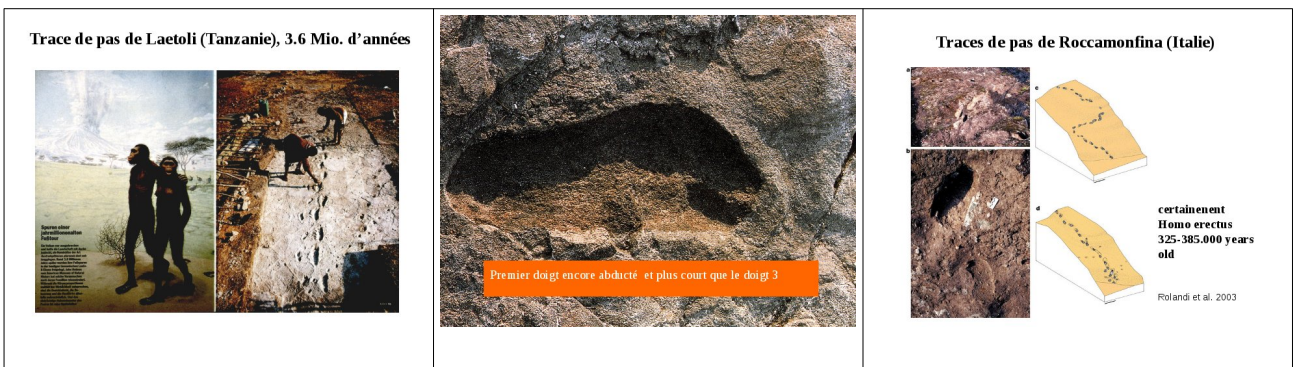
4. Modification du pied



La perte des qualités préhensiles du pied d'appui est un autre marqueur de la bipédie. Cette perte de mobilité du gros orteil s'accompagne d'une perte de courbure de l'articulation cuneo métatarsienne. Là encore les évolutions ne se réalisent pas toute d'un coup. Cet Australopithèque a encore l'orteil assez écarté.



Autres caractères humains : L'Allongement du tarse par rapport aux autres composantes du pied et un 1er orteil avec la même longueur que le second orteil. On peut confronter ces caractères aux empreintes fossiles retrouvées à Laetoli en Tanzanie et Roccamofina en Italie.

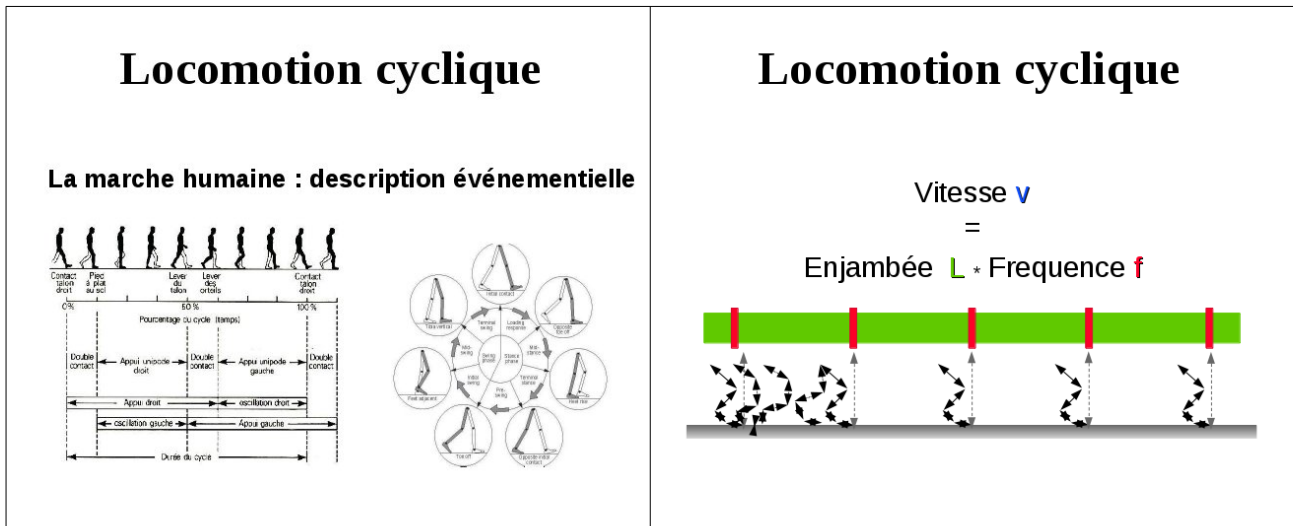


5. Notre morphologie est globalement optimisée pour la locomotion bipède et nos proportions sont adaptées à la marche et à la course. Nous allons chercher à préciser ce point.

Cavanagh en 1977 disait en décrivant notre locomotion qu'elle avait une haute efficacité mécanique à une vitesse optimale sur le plan énergétique

morphologie fonctionnelle : science qui étudie les relations forme-fonction

Notre forme : deux aspects : nos mensurations et la répartition des masses (que mesure le moment d'inertie). La fonction : (les contraintes sur la structure) une locomotion cyclique.



Cycle (stride) : Ensemble des phénomènes compris entre deux contacts successifs du même membre inférieur au sol.

Un pas (step) : Ensemble des phénomènes compris entre l'appui d'un talon au sol et l'appui du talon controlatéral.

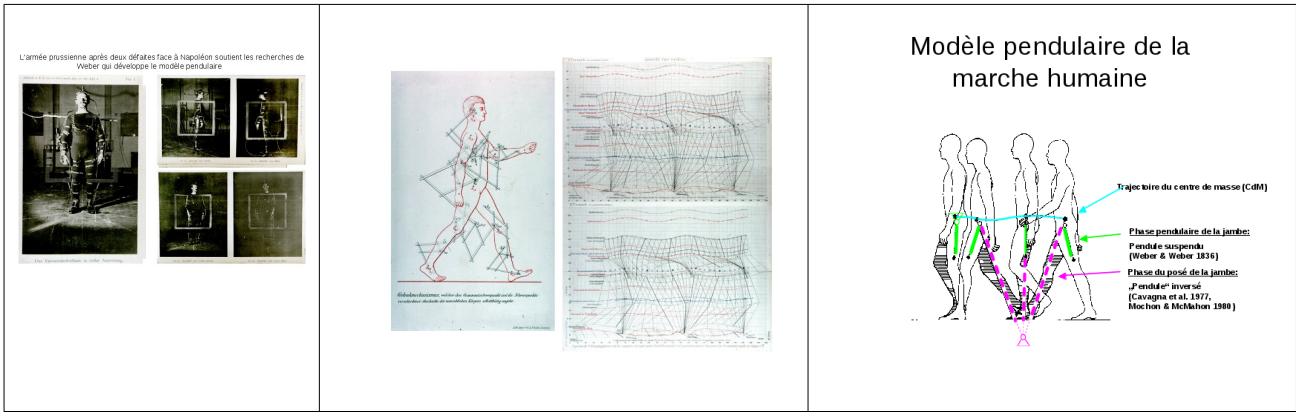
Longueur du cycle : distance parcourue entre un contact au sol avec un pied et le contact suivant du même pied au sol.

La vitesse de marche est égale à l'enjambée que multiplie la fréquence .

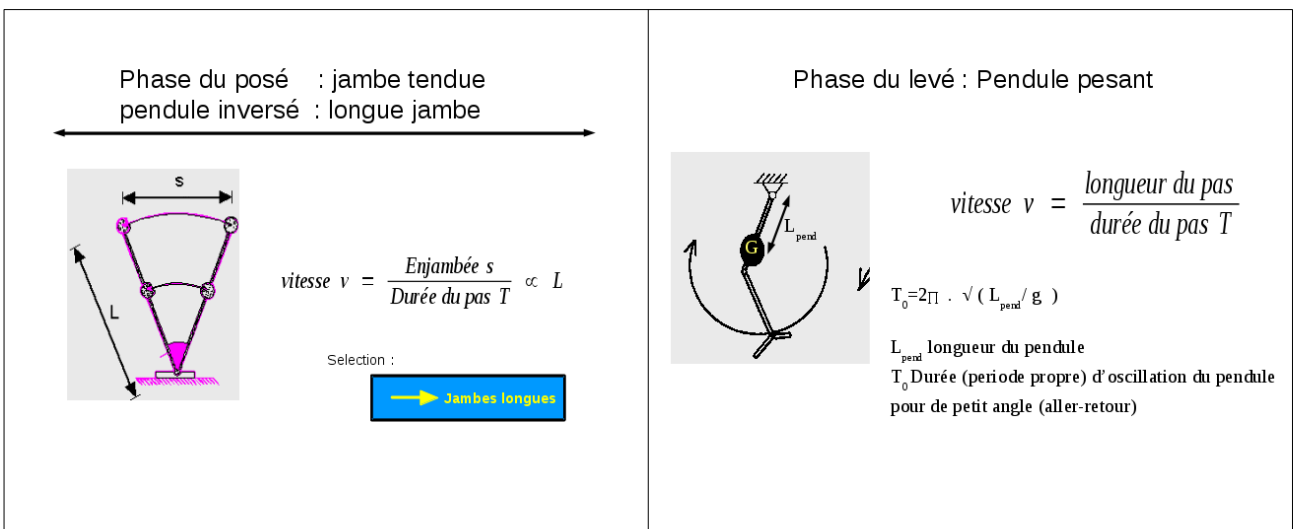
Nous avons vu en TD l'adéquation entre la vitesse de marche de confort et la fréquence propre d'oscillation du membre calculé sur la base de données morphologiques. Cette marche de confort tire profit de la dynamique passive du membre.

La locomotion cyclique repose sur des phénomènes résonnants : le pendule qui permet le stockage d'énergie potentielle gravitationnelle dans les masses en déplacement et l'élasticité des structures compliantes qui permet le stockage d'énergie potentielle élastiques pendant la course dans les structures élastiques du corps (tendons, mais aussi muscle / déformation de la macromolécule titine au sein des sarcomères)

Ce modèle pendulaire de la marche a largement profité des recherches financées par l'armée prussienne , à la recherche d'une façon d'optimiser le paquetage du soldat prussien. C'est Weber & Weber qui développent justement ce modèle de la marche pendulaire.



Ce modèle pendulaire intègre deux phases : Le retour « pendule » de la jambe suspendue pendant le lever, et pendant le poser un pendule dit inversé basculant sur un pivot : le pied.



Nous le savons: plus les jambes sont longues, plus - à fréquence égale - nous avancerons vite !

Pendant la phase du posé, jambe tendue, la vitesse de marche égale l'enjambée divisée par la durée du pas.

$$vitesse \ v = \frac{Enjambée \ s}{Durée \ du \ pas \ T} \propto L$$

La vitesse est donc proportionnelle à la longueur L de la jambe tendue. Et donc

pendant le posé :
marcher vite = avoir de longues jambes

Pendant la phase du lever nous avons un pendule pesant. La jambe est aussi légèrement fléchie. La période de pendulation passive (voir TD) est égale à

$$T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{(L_{pend} / g)}$$

L_{pend} longueur du pendule = distance hanche-centre de masse de la jambe

T_0 Durée (periode propre) d'oscillation du pendule pour de petit angle (aller-retour)

Phase du levé : Pendule pesant

$$\text{vitesse } v \downarrow = \frac{\text{enjambée}}{\text{demi période propre}} \quad \downarrow \uparrow$$

$$T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{pend}} / g}$$

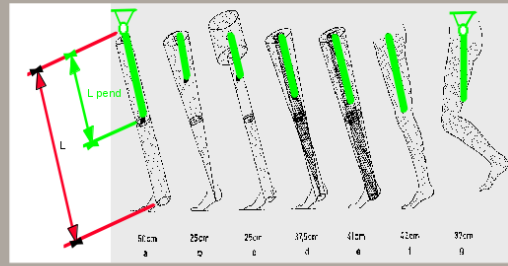
L_{pend} longueur du pendule

T_0 Durée (periode propre) d'oscillation du pendule pour de petit angle (aller-retour)

Phase du levé : Pendule pesant

Même longueur, même masse,

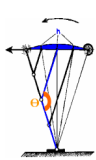
mais répartition différente ie moment d'inertie différent



La vitesse est alors égale à l'enjambée que divise la demi période d'oscillation, c'est à dire proportionnelle au rapport de la longueur du membre sur la racine de la longueur du pendule (distance entre la hanche et le centre de gravite de la jambe). Réduire L_{pend} va augmenter la vitesse de retour. Cela suppose d'avoir une concentration des masses de la jambe plutôt proximale. Et en même temps les jambes doivent rester longue car L grand favorise aussi la vitesse. C'est donc bien une forme conique qui convient.

Pouvons nous dire quelque chose au sujet des proportions relatives des segments de nos jambes ? Pourquoi les deux segments longs sont-ils plutôt identiques ?

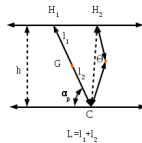
1:1- rapport des longueurs
cuisse : tibia



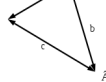
Un rapport des longueurs proche de 1:1 permet d'aplanir la trajectoire du CdM c'est à dire minimiser les variations de h pendant le posé.

Pour aplanir complètement la trajectoire, il y a nécessité de fléchir, mais fléchir pendant l'appui implique un travail musculaire qu'il convient de minimiser... en fléchissant le moins possible.

Il y a un compromis à trouver.



Rappel : $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos(\hat{A})$



Instant 1 poser $h = l_1 + l_2 \cdot \sin(\alpha)$ - $h^2 = (l_1 + l_2)^2 \cdot \sin^2(\alpha)$
Instant 2 plus tard avec flexion Θ angle interne

Pythagore généralisé au triangle quelconque (cf rappel)

$$h^2 = CH_1^2 \sin^2(\alpha) \text{ et } CH_2^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(\Theta) = (l_1 + l_2)^2 - 2l_1 l_2 (1 - \cos(\Theta))$$

On égalise les deux expressions de h^2 .

Il vient en introduisant $\tau_1 = l_1/l$ et $\tau_2 = l_2/l$

$$\cos(\Theta) = \frac{1 - \cos(\alpha) \sqrt{\cos^2(\alpha)}}{2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2} - 1$$

Si $\Theta = 180^\circ$ on a $\cos(\Theta) = -1$ et garder Θ proche de 180° c'est donc avoir le 1^{er} terme à droite de l'égalité le plus petit possible, et donc avoir un dénominateur le plus grand possible.

Or $0,1 \times 0,9 = 0,09$ $0,2 \times 0,8 = 0,16$... etc. $0,5 \times 0,5 = 0,25$

Avoir des longueurs de segments proches réduit le besoin de flexion.

Tentons une démonstration heuristiques : les variations verticales de la position du centre de masse ne nous font pas avancer. Moins il y en a, moins je consomme d'énergie inutilement. Réduire ces variations c'est chercher à minimiser les variations de h (la zone bleue). Nous partons de notre modèle de pendule inversé. A l'instant du poser la jambe est tendue et fait un angle α_p avec le sol, elle fléchit ensuite et l'angle au genou vaut Θ . Fléchir représente aussi une consommation d'énergie par travail musculaire. Réduire cette flexion est donc aussi un facteur d'économie d'énergie. Quelle morphologie serait la plus adaptée pour minimiser h et minimiser la flexion du genou ?

Il faut donc trouver un compromis entre le nécessaire fléchissement pour aplanir la trajectoire et fléchir le moins possible par souci d'économie.

Exprimons h la hauteur de centre de gravite en fonction des paramètres (théorème de Pythagore généralisé), avec les deux conformations, à l'instant du poser, jambe tendue, puis un instant plus tard fléchi au passage de la verticale de la cheville. Imposons de maintenir h constant entre ces deux instants, c'est à dire égalisons nos deux expressions de h et isolons $\cos(\Theta)$, Θ angle interne au

niveau du genou. τ_1 et τ_2 représentent l_1/l et l_2/l (l =longueur de la jambe tendue, l_1 longueur du fémur, l_2 longueur du tibia, donc $l=l_1+l_2$)

$$\cos(\Theta) = \frac{1 - \cos^2(\alpha_p)}{2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2} - 1$$

pour que Θ soit le plus proche de 180° , il faut que $\cos(\Theta)$ soit le plus proche de -1 . Pour cela il faut à droite de l'égalité que le premier membre soit le plus petit possible et donc que son dénominateur soit le plus grand possible. Or le produit $\tau_1 \cdot \tau_2$ ne peut prendre que des valeurs du type

$0.1 \cdot 0.9 = 0,09$; $0.2 \cdot 0.8 = 0,16$; $0.3 \cdot 0.7 = 0,21$; $0.4 \cdot 0.6 = 0,24$; $0.5 \cdot 0.5 = 0,25$ etc...

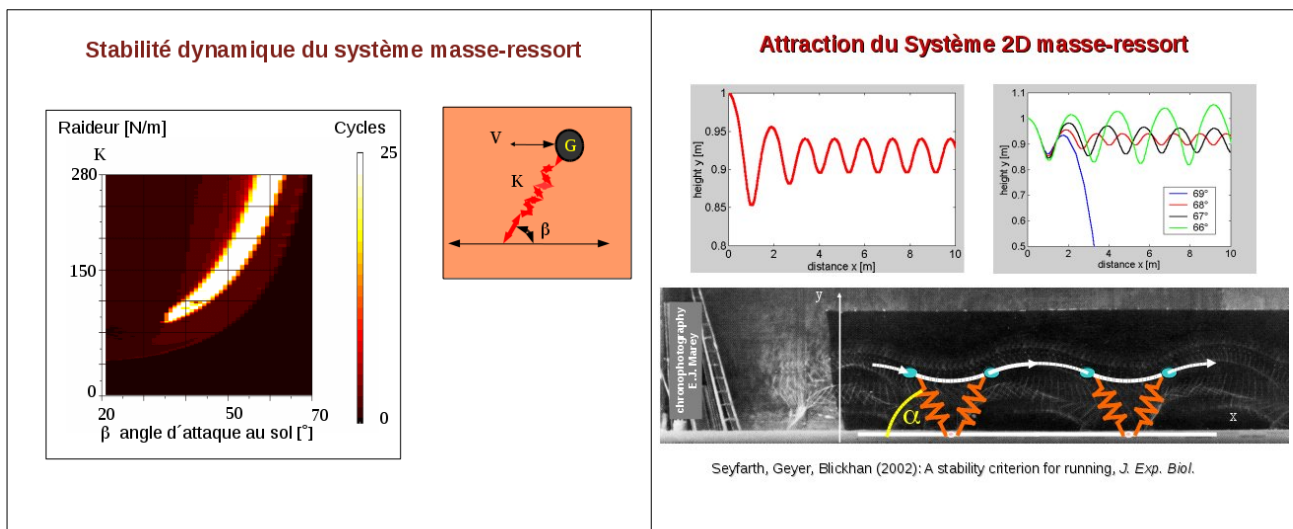
c'est donc à l'égalité des longueurs tibia et fémur que le dénominateur est le plus grand et que Θ reste le plus proche de 180° .

Quid de la longueur du pied par rapport aux autres segments ?

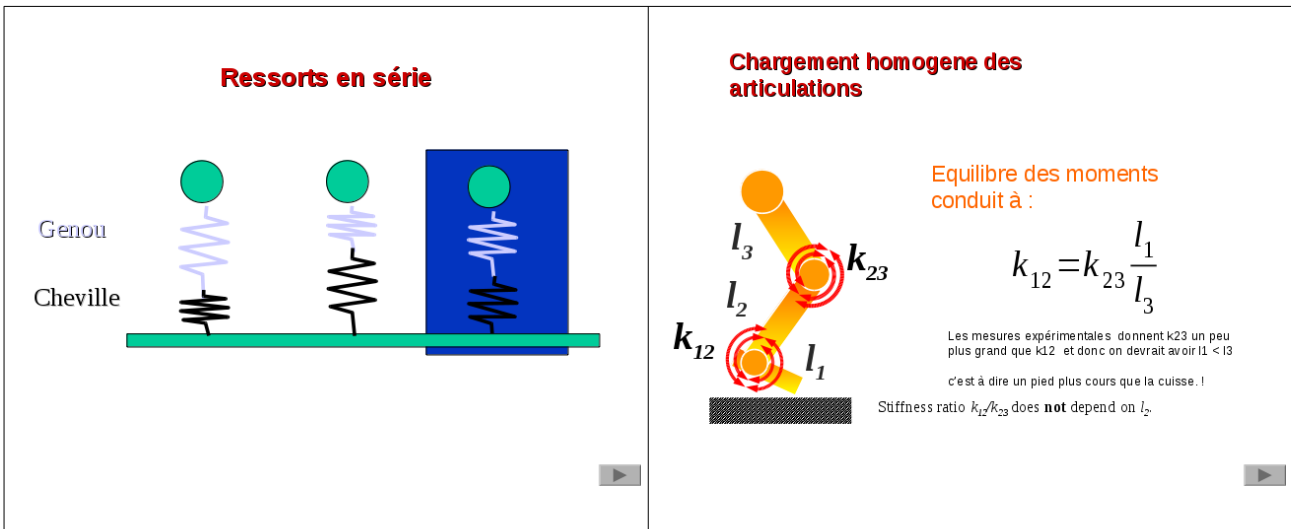
D'autres considérations sont nécessaires pour répondre à cette question.

Nous définissons la notion de stabilité dynamique.

Le mouvement d'un système est dit dynamiquement stable si le mouvement retrouve sa trajectoire initiale après avoir subi une perturbation.



Nous avons eu l'occasion de présenter en TD le système masse ressort de la course humaine (Blickhan, 1988). La stabilité dynamique du système masse ressort a été étudiée en 2002 via des simulation numérique. Pour cela on a appliqué la relation fondamentale de la dynamique à la masse et calculé sa trajectoire, ses rebonds. On peut alors explorer le comportement du système lorsqu'on fait varier les quelques paramètres : quels sont-ils: la vitesse horizontale , l'angle d'attaque au sol à l'instant du poser, la raideur du ressort. On observe alors que en général le système tombe, pique du nez. Mais pour certaine combinaison de valeur le système est capable de rebondir sans tomber. Il existe ainsi une zone (blanche sur le diagramme de gauche raideur VS angle d'attaque) pour laquelle le système est stable. On le voit cette zone a une certaine étendue. Une légère variation de la raideur ou de l'angle d'attaque ou de la hauteur est possible et le système restera stable.

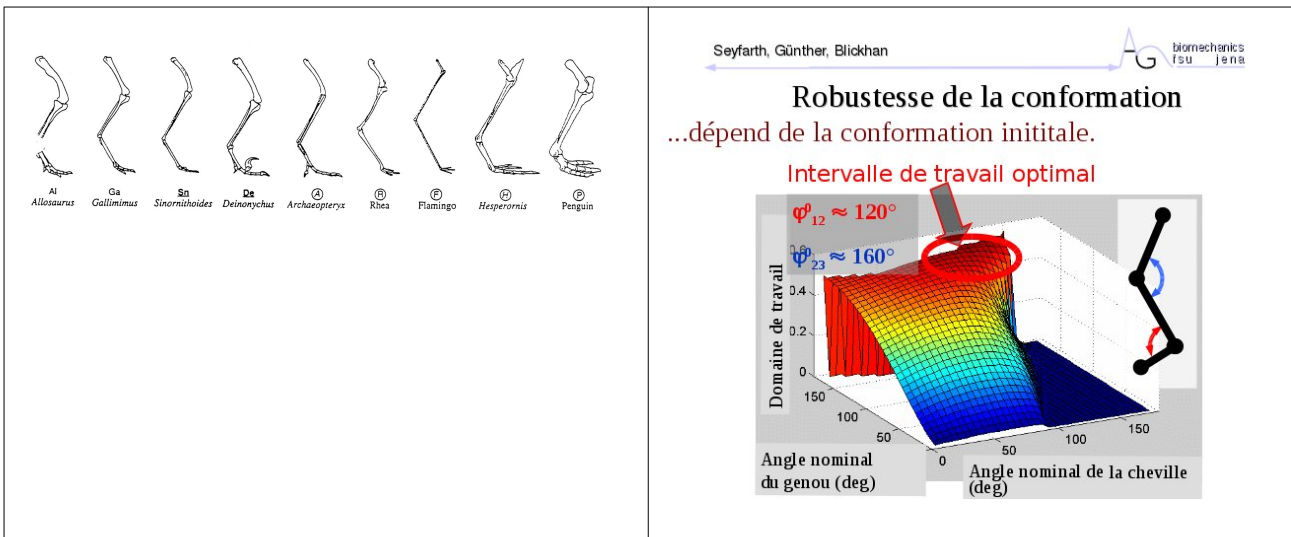


Ce faisant pour le cas d'un humain, on peut alors chercher à « distribuer » l'élasticité de la jambe ressort sur les articulations de la jambe en la segmentant. Plusieurs comportements peuvent alors être envisagés. Le genou est raide et la cheville moins raide, l'inverse, ou alors genou et cheville ont des raideurs assez semblables. Dans ce dernier cas les deux articulations s'ouvrent et se ferment en même temps et c'est ce qu'on observe sur les courbes cinématiques.

En représentant les ressorts par des ressorts de torsion, on peut alors introduire les longueurs des segments dans le modèle. L'hypothèse d'un chargement homogène des deux articulations (c'est à dire que le moment de la force de réaction au sol est identique au niveau du genou et de la cheville) impose une relation entre les raideurs au niveau du genou et de la cheville. Cette relation curieusement ne fait pas intervenir la longueur du second segment l_2 .

Expérimentalement on trouve que la raideur au niveau du genou est un peu plus grande que celle de la cheville, ce qui nous amène à avoir l_1 , le pied, plus petit que l_3 . Ce qui est bien vrai.

Si on réfléchit plus largement aux configurations observées dans le monde animal la relation précédente nous montre qu'en mode de fonctionnement élastique (sautillement ou course) et avec ce chargement homogène de la cheville et du genou, alors à un pied court correspond un fémur long ou l'inverse. Contempler à gauche ces pattes d'oiseaux vivants ou fossiles.



On peut chercher à optimiser la robustesse de la stabilité de ce modèle tri-segmenté en fonction des paramètres. C'est ce qu'on fait Seyfarth et al. (2005) en faisant sautiller ce système tri-segmenté et en faisant varier les valeurs des longueurs de segments et de la conformation au repos du membre. Il en ressort qu'un pied égalant 0,7 x la longueur des longs segments, un angle au genou de quelques

160° et à la cheville de 120° constitue une conformation de départ optimale maximisant la robustesse pour cet exercice de sautillerment sur place.

A noter que l'un des risques d'une conformation trop étendue en mode de travail élastique (angles de travail très ouverts), est que l'une des articulations plie mais du mauvais côté (genou retourné) lorsqu'on retombe sur le sol. Éviter d'être trop près de ces zones limites est donc une sécurité. Si le genou ou la cheville « se retourne », on passerait lors d'une jambe conformée en « zig zag » à une jambe conformée en « arc ». (La nature a aussi exploré ces conformations notamment dans le cas de l'exosquelette des araignées!)

Il semble donc bien qu'on ait des longueurs de segments optimisées pour la marche et la course, avec des proportions fémur : tibia : pied d'environ 1 : 1 : 0,7.

Maintenant que nos jambes sont longues, fines, plutôt conique et que les proportions sont comprises,

Que dire du reste de notre corps ?

Tentons une description de notre forme:

Jambe longue, fine, conique **c'est vu.**

Bras long, fin, cylindrique

Tronc long, droit, vertical avec une taille

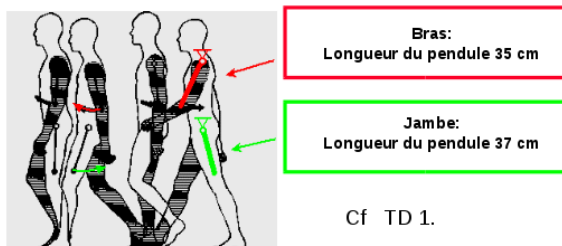
Section du corps elliptique

Largeur épaule = 2 x largeur bassin

Hauteur limitée

Bras long, fin, cylindrique

Pendules suspendus:
Longueurs des bras et jambes similaires



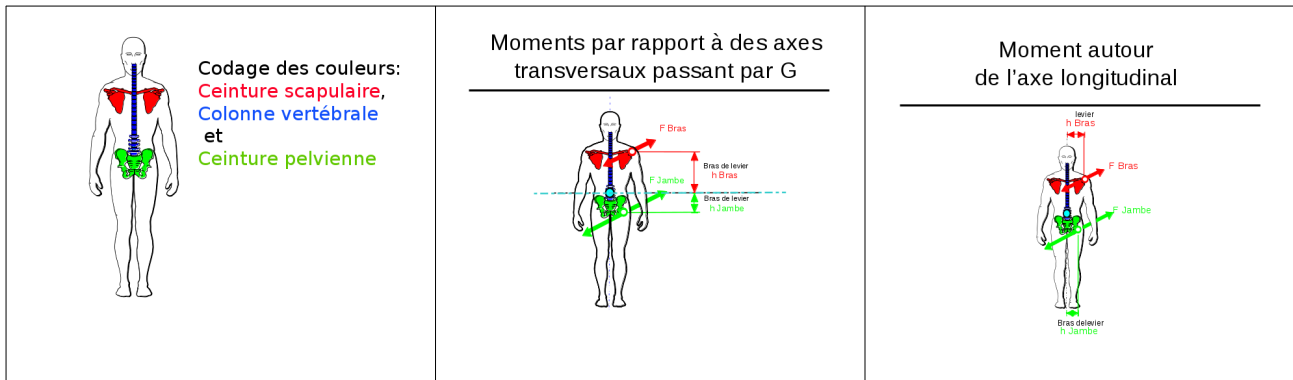
→ Bras longs et cylindriques

Le bras, autre pendule, doit avoir une fréquence propre identique à la jambe

Nos bras sont assimilables à des pendules suspendus. Pour optimiser notre marche leur mouvement doit pouvoir s'intégrer au mouvement cyclique de marche. Si le bras doit penduler avec la même période que la jambe, alors il est nécessaire (voir définition de la période propre d'oscillation) d'avoir une longueur de pendule (distance entre le centre de masse du bras et son pivot, l'articulation de l'épaule) similaire à celle de la jambe. Puisque la masse du bras est bien inférieure à celle de la jambe, les bras doivent donc être fins. Les calculs conduisent à $L_{bras} = 35$ cm proche des 37cm

trouvés en TD pour la jambe. Vous avez toutes les données sur la feuille de TD 1 pour retrouver ce résultat.

Tronc long, droit, vertical avec une taille



Dans une vue sagittale :

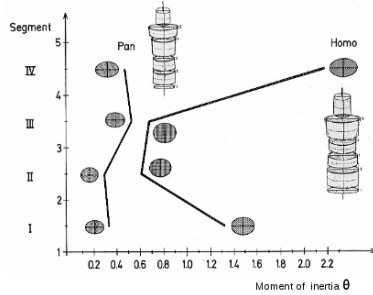
Quand le bras et la jambe contralatérale oscillent vers l'avant autour de deux pivots. Les forces de réactions au niveau des pivots produites par le balancement du bras et de la jambe contralatérale regarde dans la même direction. Ils induisent deux moments par rapport au centre de gravité du corps qui s'opposent mais devrait être inégaux puisque le bras est deux fois plus léger que la jambe. Mais voir schéma 2 ou sont repérées les distances des pivots au centre de gravité : Le bras de levier des bras est grossièrement 2 fois plus grand que celui de la jambe. Ainsi les moments des deux forces de réactions se compensent en projection sur un plan para-sagittal.

Dans une vue du dessus, sur un plan transversal : les choses sont semblables car la distance entre l'articulation de l'épaule jusqu'au plan sagittal (contenant le centre de masse) est environ deux fois celle de la hanche jusqu'au plan sagittal. [distance ente épaule = 2x distance entre hanche] . Les projections des moments du bras et de la jambe contralatéral se compensent la aussi assez bien.

Dans une vue du dessus : les choses sont semblables car la distance entre l'articulation de l'épaule jusqu'au plan sagittal (contenant le centre de masse) est environ deux fois celle de la hanche jusqu'au plan sagittal. [distance ente épaule = 2x distance entre hanche] . Les projections des moments du bras et de la jambe contralatéral se compensent la aussi assez bien.

Les masses de la ceinture scapulaire et pelvienne tournent aussi autour de l'axe longitudinal. Ces masses sont concentrées aux extrémités du tronc induisant l'existence d'une taille. Cette dernière est très « humaine ». Sur le graphique ci dessous sont comparés es moments d'inertie des portions de tronc d'un chimpanzé et de celui d'un humain. Si le tronc du chimpanzé est droit, celui de l'humain a clairement des moments d'inertie plus petit au niveau de la taille. La section transversale du tronc n'est pas un cercle mais plutôt elliptique, avec une petit axe et une grand axe transverse. Sur le plan locomoteur, et c'est certainement le plus important, cela permet de gagner un peu en longueur d'enjambée. Et sur le plan mécanique avoir un grand et un petit axe offre la c'est possibilité de compenser plus parfaitement les moments.

Section transverse du tronc



Compensation complète des moments par rapport à l'axe longitudinal

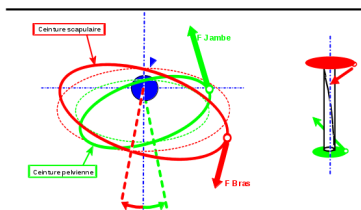
$$M = 0$$

$$h_{\text{Jambe}} \times F_{\text{Jambe}} = h_{\text{Bras}} \times F_{\text{Bras}}$$

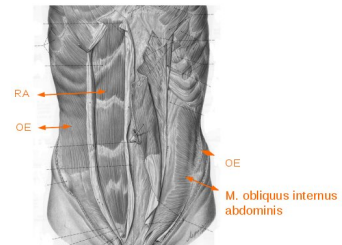
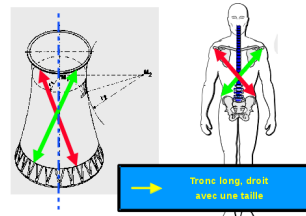
$$F_{\text{Jambe}} \approx 2 \times F_{\text{Bras}} \longrightarrow h_{\text{Bras}} \approx 2 \times h_{\text{Jambe}}$$

→ Largeur de la ceint. scapulaire > Largeur de la ceint. pelvienne

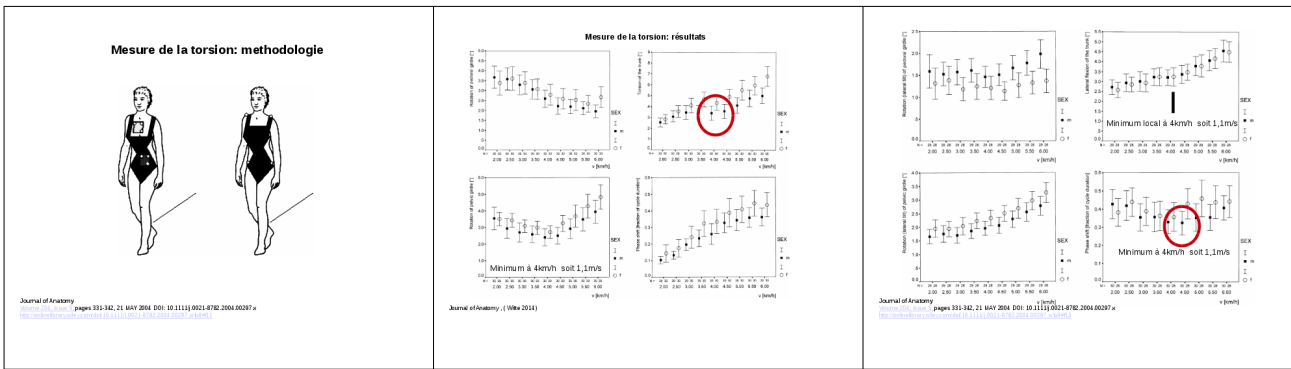
Le tronc une ressort de torsion



La taille humaine

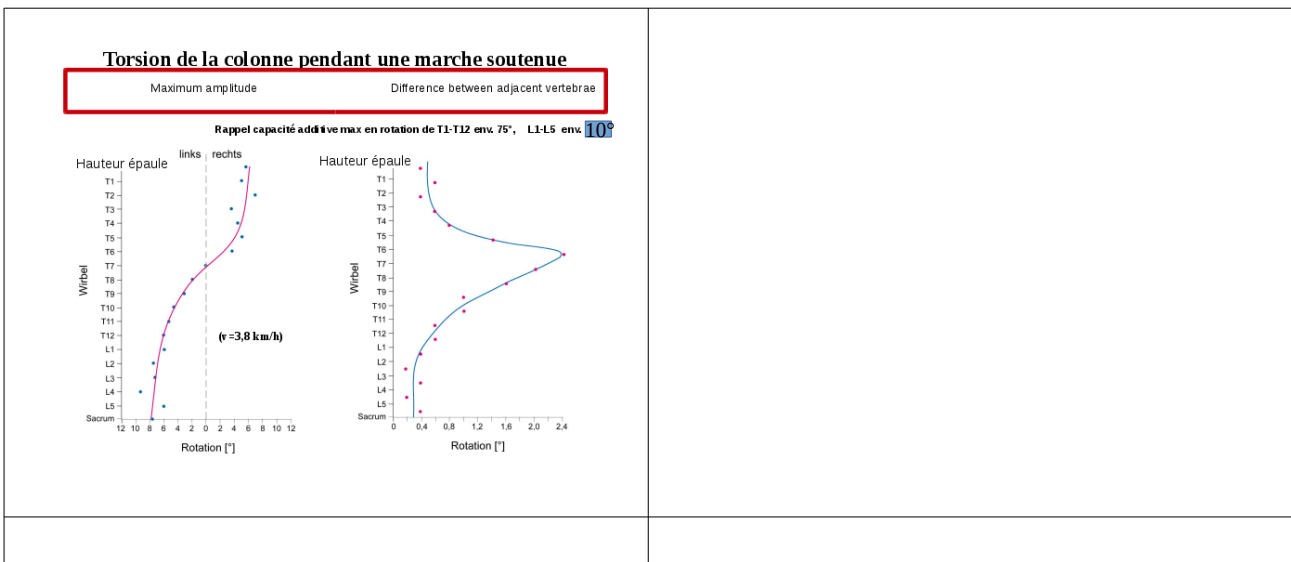


Le tronc se comporte comme un ressort de torsion. Les deux ceintures oscillent autour de l'axe longitudinal plus ou moins en opposition de phase suivant la vitesse de marche. La musculature oblique se comporte alors comme un ressort de rappel. De combien pivotent les deux ceintures ? On peut mesurer la rotation axiale des ceintures en positionnant sur chacune un repère sur le thorax, un autre sur le bassin/sacrum. Ici on a travaillé avec une cohorte de 30 personnes et les valeurs moyennes sont calculées. La colonne de gauche donne la rotation de la ceinture pectorale (en haut) et pelvienne (bas), en fonction de la vitesse de marche. Ces rotations sont relativement faibles quelques degrés. On voit que pour une vitesse de marche de 4 km/h environ 1.1 m/s, la rotation de la ceinture pelvienne atteint un minimum de sorte que l'addition des deux rotations qui donne la torsion du tronc atteint un minimum local pour cette valeur. Néanmoins la torsion n'est pas la somme des rotations de la ceinture scapulaire et de la rotation de la ceinture pelvienne car les deux ne tournent pas en phase mais avec un décalage variable avec la vitesse de marche. La torsion est représentée en haut à gauche. Sa valeur maximum est de 7°. Elle affiche néanmoins un minimum local pour une vitesse de 3.5-4 km/h. La flexion latérale du tronc peut aussi être mesurée cette fois grâce aux paires de marqueurs des épaules et des hanches. Elle montre aussi un minimum local de la flexion latérale pour environ 4 km/h qui constitue une sorte de vitesse énergétiquement optimale.



La torsion de la colonne pendant une marche soutenue. L'amplitude maximum de torsion mesurée pendant la marche est de l'ordre de 14-15° (de -7° à +7°), avec des angles de torsion plus faible entre vertèbres consécutives au niveau lombaire que sur la partie thoracique (wirbel= vertèbre en allemand) différent niveau de la colonne.


On rappelle les capacités additives globale en torsion de l'ordre de -37° à +37° pour la partie thoracique et de -5 à +5 pour la partie lombaire soit des amplitudes de 75° pour la partie thoracique et 10° pour la partie lombaire.


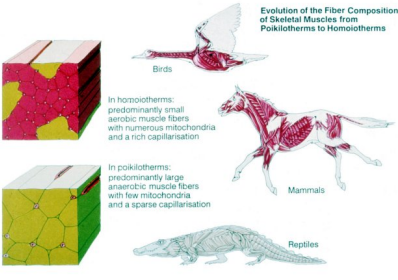
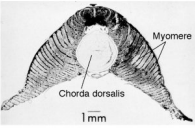
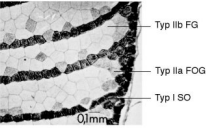


La diapo de gauche synthétise les types de mouvements de la colonne observés pendant la locomotion chez les tétrapodes non mammalien, chez les mammifère quadrupèdes et chez l'homme pendant la locomotion. L'homme a principalement un mouvement de torsion autour de l'axe longitudinal quand ces ancêtres lointains utilisaient, eux, les mouvements autour de tous les axes. Sur le plan musculaire, quels sont les implications pour les types de fibres qui composent la musculature para-vertébrale ?

On sait encore peu de choses.

L'étude de la typologie des fibres musculaires dans la musculature para-vertébrale a été rendue possible par l'immunohistochimie qui permet la coloration des fibres en fonction de la présence ou non de certaines protéines. On rappelle l'existence de deux grands types de fibres, lentes et rapides, les premières plus petites que les secondes mais travaillant en régime oxydatif, donc avec apport d'oxygène et donc via une vascularisation abondante, et un appareil mitochondrial abondant. Ces fibres sont capables d'un travail prolongé. Les secondes plus grosses moins vascularisées, pas de myoglobine (fibre blanche) mais munies d'enzyme pour la glycolyse anaérobie, et qui sont capables de contraction brèves, elles sont fatigables.

Mouvements de la colonne pendant la locomotion				Types de fibre musculaire		Comparaison des fibres musculaires lentes et rapides	
	horizontal plane 'lateral bending'	transversal plane 'tilt'	sagittal plane 'sagittal bending'				
tétrapode non mammaliens	+	+	-		Fibres lentes = type I Dimètre plus petit (20-50% of fast fibres) Bien vascularisé myoglobine abondante, rouge (!) mitochondrie abondante système enzymatique oxydatif innervation parallèle des fibres long-lasting contractions prolongées résistant contre la fatigue	Fibres rapides = type II gros diamètre (jusqu'à 300µm) faiblement vascularisé pas de myoglobine, white (!) quelques petites mitochondries enzymes pour la glycolyse anaérobie innervation des fibres à angle droit contractions brèves fatiguables	
Mammifères quadrupèdes	+	+	+				
Mammifères bipèdes	(-)	+	-				

Muscle fibre types		Sources d'énergie pour l'activité musculaire	
	Myxine, the most primitive living vertebrate Flood & Mathiassen 1962		Evolution of the Fiber Composition of Skeletal Muscles from Poikilotherms to Homoiotherms Birds Mammals Reptiles In homoiotherms: predominantly small aerobic muscle fibers with numerous mitochondria and a rich capillarisation In poikilotherms: predominantly large anaerobic muscle fibers with few mitochondria and a sparse capillarisation
	Myomere Chorda dorsalis 1mm		Sources d'énergie pour l'activité musculaire Contraction forte et rapide (e.g. Komi 1992): • ATP - reserve for the first 2-4s • next 20-30s: ATP - synthesis from phosphocreatin • starting at about 7s: ATP - production from anaerobic glycolysis (less efficient)

L'existence de plusieurs type de fibres est très anciennes ! La myxine qui est le vertébrés le plus primitif actuellement vivant, a déjà plusieurs types de fibres. Les animaux homéothermes (avec une température interne constante et dépendante de l'activité métabolique cellulaire) ont une vascularisation importante et ont donc un système musculaire travaillant largement en régime oxydatif, c-a-d aérobie. Les animaux poïkilothermes (qui ont besoin de la chaleur du soleil pour se réchauffer) ont une musculature travaillant en régime anaérobie avec peu de mitochondries et principalement des fibres rapides travaillant en régime anaérobie.

Avec l'immunohistochimie, on peut donc entreprendre de cartographier la distribution des types de fibres dans la musculature para vertébrales. Ici apparaissent en bleu les fibres oxydatives. Même dans les régions oxydatives, il reste toujours une part de fibres rapides (voir agrandissement) , mais les zone proche des vertèbres (ici de l' ochotone afghan) montre un fonctionnement oxydatif majoritaire.

Au final chez l' ochotone, on peut classifier la musculature lombaire para vertébrale des petits mammifères en muscles stabilisateurs plutôt profonds, assurant la stabilité de vertèbres voisines, ils sont majoritairement de type 1, et en muscles mobilisateurs, plus longs et superficiels, ils sont majoritairement de types 2.

Reconnaitre les fibres en utilisant des réactions enzymatiques

Caractérisation de la musculature paravertébrale

Characterisation of paravertebral muscles

Homogeneous distribution of fibre types

glycolytic fibres

- M. longissimus lumborum
- M. iliocostalis

oxidative fibres

- Mm. rotatores
- Mm. multiaxiales
- Mm. interspinales

Inhomogeneous distribution of fibre types

- M. semispinalis
- M. quadratus lumborum

Stabilité de la partie lombaire chez les petits mammifères

Local (stabilising)

Stabilité entre les segments musculés courts et profonds fibres musculaires du type I

Actions soutenues

exemples:

- M. multifidus
- M. transversus abdominis

Global (mobilising)

Maintien de l'équilibre muscles longs et superficiels fibres musculaires principalement du type II

action courte et puissante

exemples:

- M. rectus abdominis
- M. longissimus thoracis pars thoracica

Distribution des fibres de type 1 et 2 dans la musculature paravertébrale lombaire des tout petits mammifères

Pour les très très petits : persistences de régions oxydative spécialisées et profondes Mais globalement type IIa ultra-majitaire. → rôle dans la production de chaleur Or plus je suis petit plus j'ai besoin de produire de la chaleur.

C'est une distribution retrouvée chez plusieurs petits mammifères. Chez les très très petits néanmoins on remarque la persistance de la présence de fibre de type 2 même dans les régions profondes. On explique cette singularité par le besoin de production de chaleur dans laquelle les fibres de type 2a sont impliquées. Or plus je suis petit, plus je perds facilement ma chaleur et donc plus je dois en produire.

Chez l'homme la composition en fibre de la musculature lombaire, étudiée seulement récemment sur des cadavres (encore peu nombreux) est environ 50-50, plus homogène (très mixée) dorsalement, un peu plus répartie ventralement mais globalement toujours 50-50. Une petite accumulation de fibres lentes dans la musculature dorso latérale aussi présente chez les petits mammifères et qui croît dans un gradient caudo-cranial. Pas de changement dans la composition en fonction de la distance à la vertèbre.

On peut dire que le rôle fonctionnel n'est pas inscrit dans la composition en fibre. Comparer à ces cousins proches, les grands singes, on retrouve chez l'homme une distribution en fibre à l'identique (!), alors que les modes de déplacement sont assez différents. Depuis 6 millions d'années que l'homme marche debout, l'évolution n'a rien sectionné de particulier pour l'homme. On dira donc que les demandes antérieures (temps de l'évolution) ont permis d'arriver à un mix de fibre qui permet de répondre à la très grande versatilité des demandes fonctionnelles (grimper marcher...).

Distribution des fibres de type 1 et 2 dans la musculature paravertébrale lombaire des petits mammifères

N. Schilling (2009)

Deep and short, mono- or multi-segmental muscles (i.e., mm. interspinales, intermamillares, rotatores et intra-aversarii) consistently showed the highest percentage of slow, oxidative fibers implying a function as local stabilizers of the vertebral column. Superficial and large, polysegmental muscles (i.e., mm. multifidus, sacrospinalis, iliopsoas et psoas minor) were predominantly composed of fast, glycolytic fibers suggesting they function to both globally stabilize and mobilize the spine during sagittal, non-locomotor and locomotor activities. Some muscles contained strong accumulations of oxidative fibers in specific regions (mm. longissimus et quadratus lumborum). These regions are hypothesized to function independently from the rest of the muscle belly and may be comparable in their functionality to regionalized limb muscles. The deep, central oxidative region in the m. longissimus lumborum appears to be a general feature of mammals and likely serves a proprioceptive function to control the postural equilibrium of the pelvic girdle and lumbar spine.

Because this novel muscle mass is mainly composed of fast, glycolytic fibers in extant species, it is plausible that these changes were associated with the evolution of increased sagittal mobility in the posterior trunk region in the therapsid ancestors of mammals. The causally increasing role of sagittal bending in body propulsion is consistent with the overall increase in the percentage of glycolytic fibers in the cranio-caudal direction.

The evolution of mammals was also associated with a loss of ribs in the posterior region of the trunk. It is thought to have decreased the ability of the posterior trunk to stabilize the spine. The observed greater oxidative capacity of the caudal local stabilizers (the increased need for postural feedback in the more mobile lumbar region) may also explain the evolution of the proprioceptive system in the m. longissimus lumborum.

Distribution des fibres de type 1 et 2 dans la musculature paravertébrale lombaire de l'homme

Hesse and Schilling (2012)
 Première étude complète toute la section observée et pas seulement des sports
 Étude sur 2 cadavres.

- composition en fibre : fifty-fifty, distribution plus centrée sur 50-50 dorsalement que ventralement ou elle est un peu plus répartie

- distribution des fibres : section homogène à l'échelle macro, quasi aucune différence de début à la fin de la zone lombaire. Petite zone d'accumulation de fibres lentes dans la musculature dorso latérale présente aussi chez les petits mammifères mais qui croît en dimension dans un gradient caudo-cranial. Grande inhomogénéité locale de la distribution. Pas de variation en fonction de la distance à la vertèbre.

CI : le rôle fonctionnel n'est pas inscrit dans la composition en fibre. Sur le plan évolutif les demandes antérieures (grimper, etc...) ont du conduire à ce mix qui permet donc une grande versatilité fonctionnelle

Distribution des fibres de type 1 et 2 dans la musculature paravertébrale lombaire des grands singes

Distribution en fibre lente et rapide mixte

Cela peut paraître surprenant mais

la musculature para-vertébrale de l'homme et des grands singes est identique jusque dans la répartition des types de fibres musculaires

Il n'y donc pas eu d'adaptation de ce côté ces 6 derniers millions d'années alors même qu'on pourrait penser que sur le plan de la demande fonctionnelle il y a eu de fortes évolutions

CI : le rôle fonctionnel n'est pas inscrit dans la composition en fibre. Sur le plan évolutif les demandes antérieures (grimper, etc...) ont du conduire à ce mix qui permet donc une grande versatilité fonctionnelle