

# BIOMECHANIQUE FONCTIONNELLE

Bases fondamentales

Issu du livre de Dufour M. et Pillu M.



# Introduction

- Biomécanique
  - exploration des propriétés mécaniques des organismes vivants
  - analyse des principes d'ingénierie faisant fonctionner les systèmes biologiques :
    - Ostéo-articulaire
    - Fluidique
    - Neurologique
    - Cardiopulmonaire



# Appareil musculo-squelettique

- Ensemble des connaissances issues de :
  - Anatomie
  - Physiologie articulaire
  - Physiologie musculaire
  - Mécanique
  - Cinésiologie



# Appareil musculo-squelettique

- Permet d'expliquer le socle des connaissances nécessaires à les postures et gestes de l'homme sain
- Facilite la compréhension des dysfonctionnements et pathologies en lien avec les modifications de contrainte générées par les pathologies.



# Caractéristiques humaines

- Sommet du règne animal
- Forme la plus performante et la plus sophistiquée
- « Spécialiste de la non spécialisation »  
Il y a toujours un animal qui fait mieux à l'exception du plan intellectuel

# Éléments interférents sur la posture

- Le psychisme
- Données ethnoculturelles
- Milieu socioprofessionne
- Le sexe
- Les données morphologiques
- L'âge
- Données ethnographiques



# Données fondamentales

- Mise en lien permanente de la statique et de la dynamique ayant pour corollaire la stabilité et la mobilité



# Solide

- Corps caractérisé par une forme et des dimensions
  - Solide indéformable : abstraction théorique, appelé solide d'Euclide, corps qui ne se déforme pas
  - Solide déformable : solide courant appelé solide de Hooke, car tout corps est déformable même de façon minime, dit viscoélastique



# Solide

- Nécessite des simplifications car :
  - L'hétérogénéité est constante contrairement aux modèles théoriques
  - Les conditions expérimentales sont aléatoires
  - La multiplicité des données oblige à étudier un paramètre à la fois
  - Difficulté à établir une norme précise pour l'ensemble des individus

# Force

- Toute cause capable de modifier la vitesse d'un corps ou de provoquer sa déformation
- Si un corps soumis à des forces externes (pesanteur, action des muscles, résistance du milieu ambiant aérien ou liquide) et à des forces internes (résistance du matériau) est à l'état d'équilibre, ces deux types de forces s'annulent

# Force

- Elle peut être représentée par un vecteur dont l'unité est le Newton (N) :
  - Direction
  - Sens
  - Point d'application
  - Norme ou intensité

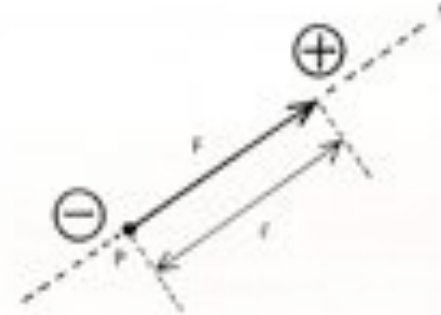


Fig. 1-2 – La force  $F$ , son point d'application  $P$ , son support  $s$ , sa direction (+ ou -) et sa valeur, représentée par la longueur  $l$  du vecteur.

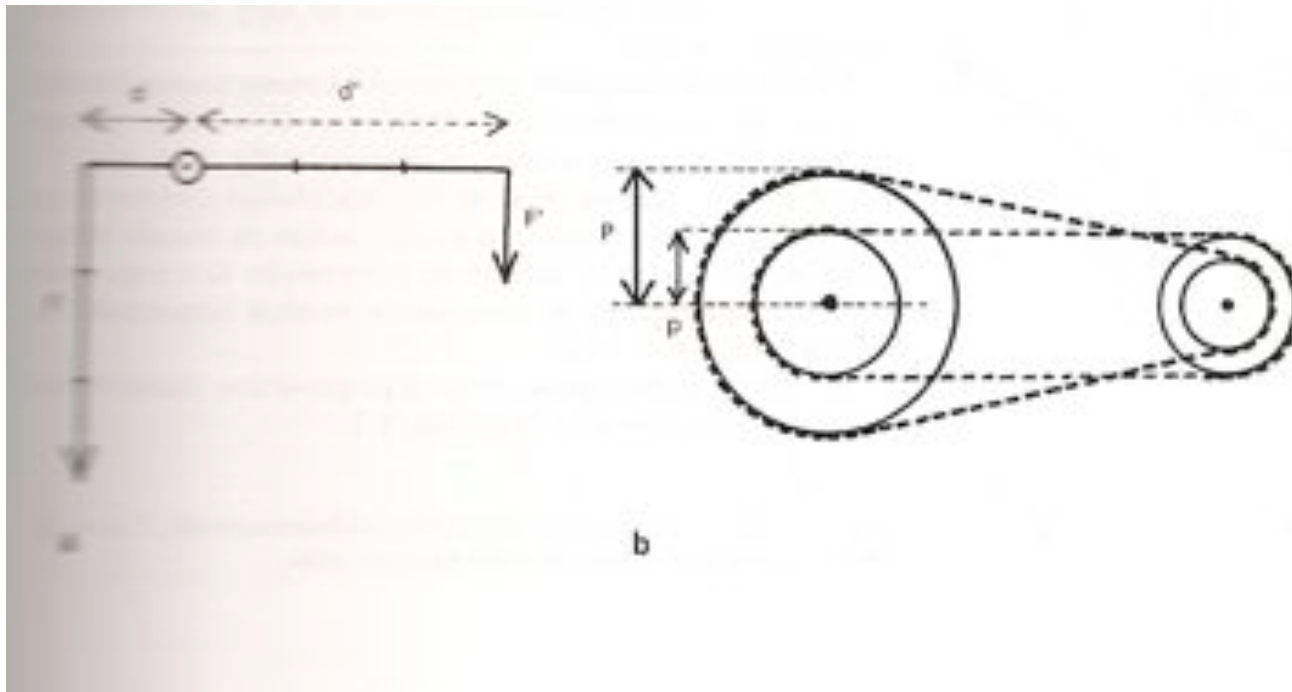
# Force

- Forces externes : force gravitaire, poussé d'Archimède, forces appliquées au corps par contact direct ou par action indirect
- Forces internes :
  - Actives : produites par les muscles
  - Passives : mise en tension des structures passives

# Efficacité d'une force

- Orientation  $F_e = F \times \cos \alpha$
- Bras de levier : distance entre la ligne de force et le pivot
- Moment : produit de l'intensité de la force et du bras de levier

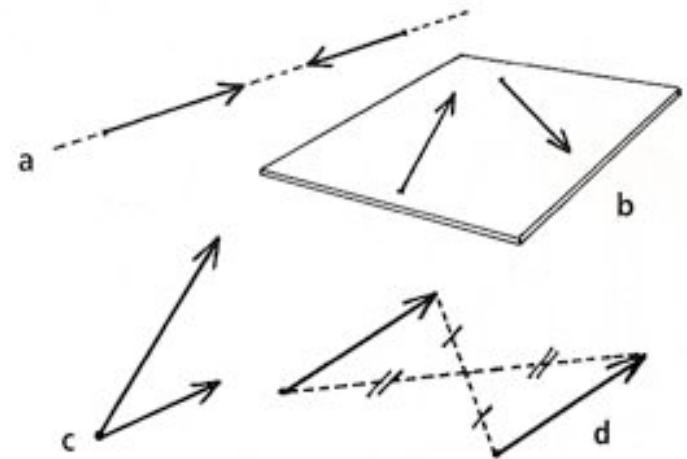




**Fig. 1-6** – (a) Le moment d'une force est représenté par le produit  $F \times d$ . Dans cet exemple, les deux moments sont égaux ( $F \times d = F' \times d'$ ). (b) Le grand plateau (P) du pédalier est moins efficace que le petit (p) pour monter une côte.

# Rapport entre plusieurs forces

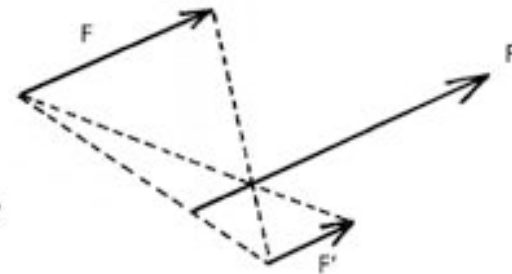
- Colinéaires : même direction
- Coplanaires : même plan
- Concourantes : même point d'application
- Equipollentes : parallèles et même norme



**Fig. 1-7** – Forces colinéaires (a), coplanaires (b), concourantes (c), équipollentes (d).

# Rapport entre plusieurs forces

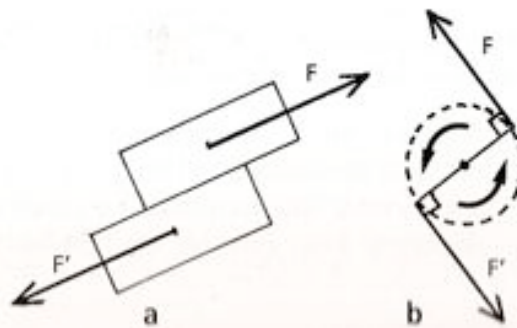
- Parallèles



**Fig. 1-8** – Forces parallèles,  $F$  et  $F'$ , et leur résultante  $R$ .

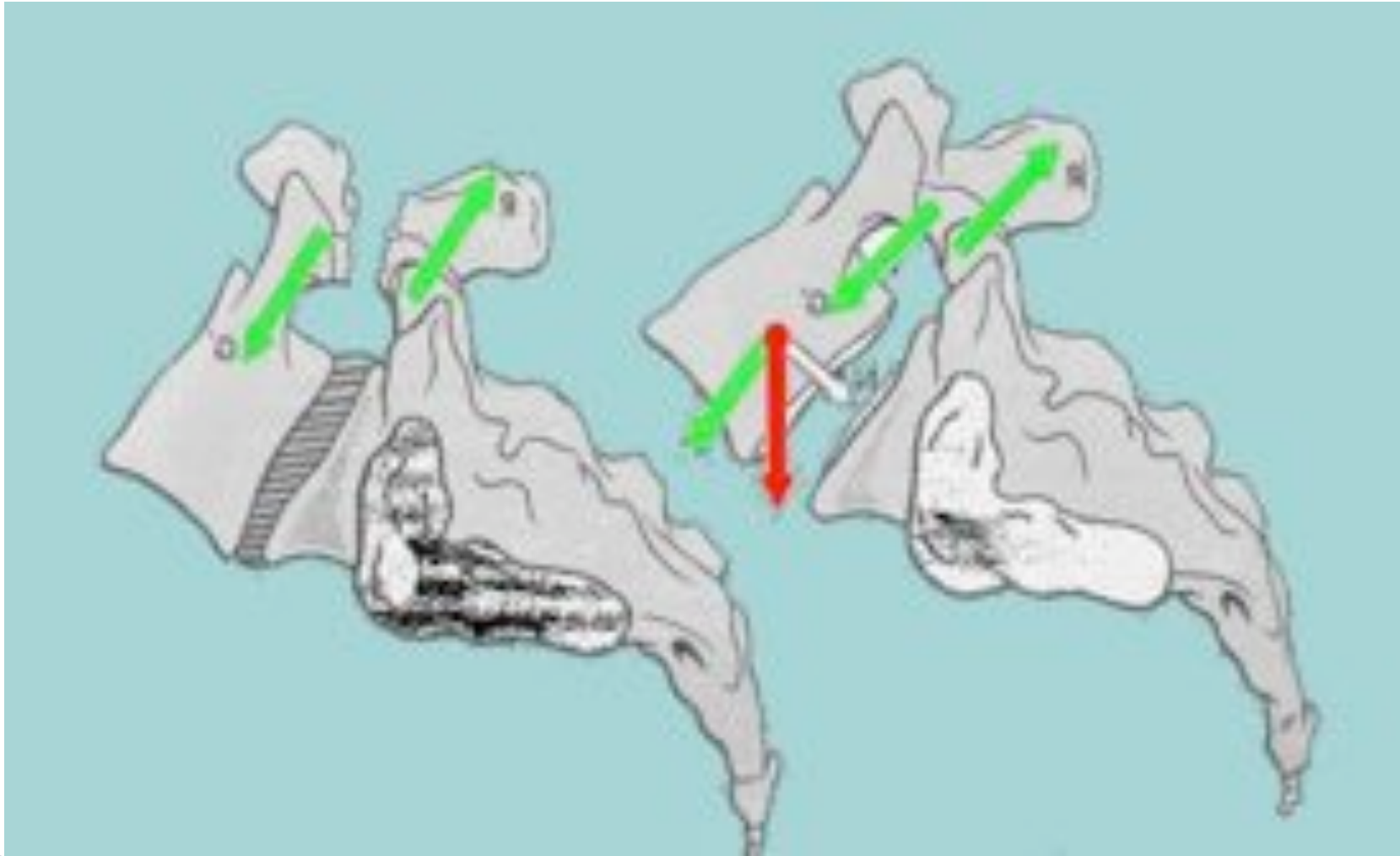
- Couple de force : système de 2 forces appliquées à un même solide

**Fig. 1-9** – Forces parallèles de sens contraires,  $F$  et  $F'$ , agissant en glissement, provoquant un cisaillement (a), ou en rotation, provoquant un couple (b).





# Décomposition d'une force



# Composition d'une force

- $R = \sqrt{F^2 + F'^2 - 2F \times F' \cos \alpha}$

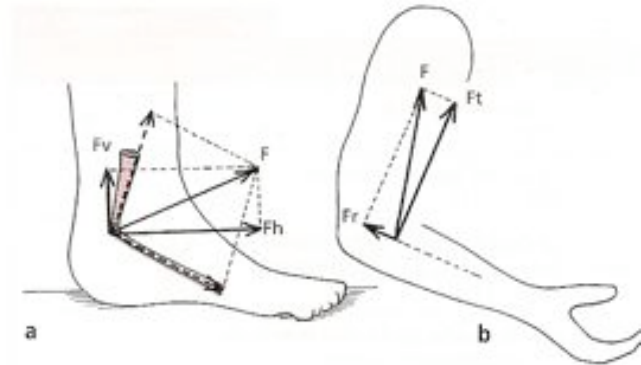


Fig. 1-11 - La décomposition d'une force  $F$  peut choisir la référence à la pesanteur (verticale :  $F_v$ , horizontale :  $F_h$ ), ou à un axe de rotation ( $F_r$ ) et à l'efficacité de sa tangentielle ( $F_t$ ).

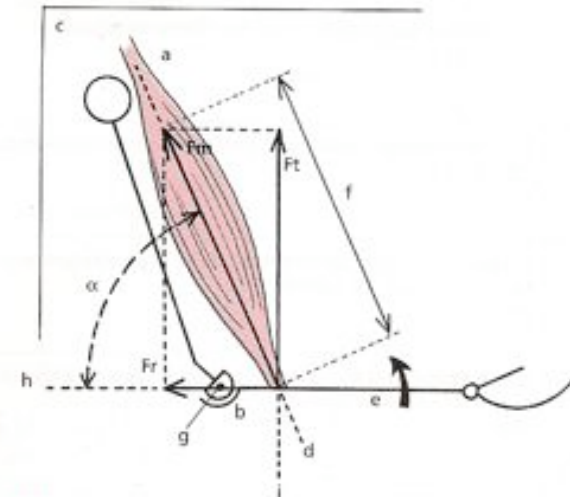


Fig. 1-12 - Démarche en dix points. Choix : du muscle (a), de l'articulation (b), du plan (c), de la ligne d'action (d), du segment mobile (e), du vecteur ( $F_m$ ), de l'axe de rotation (g), de l'axe radial (h), de l'axe tangentiel (i), et déduction de forces radiale ( $F_r$ ) et tangentielle ( $F_t$ ).



# Travail, Energie

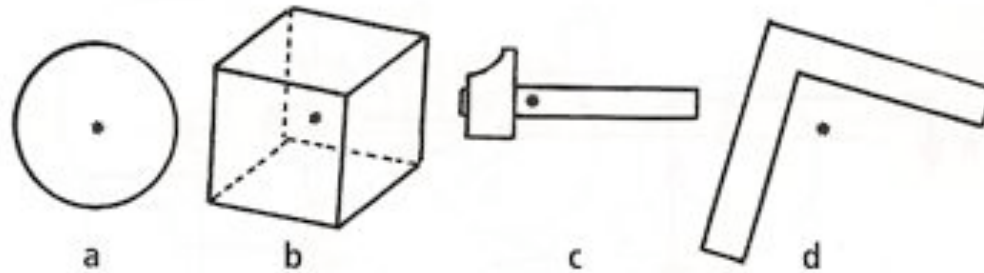
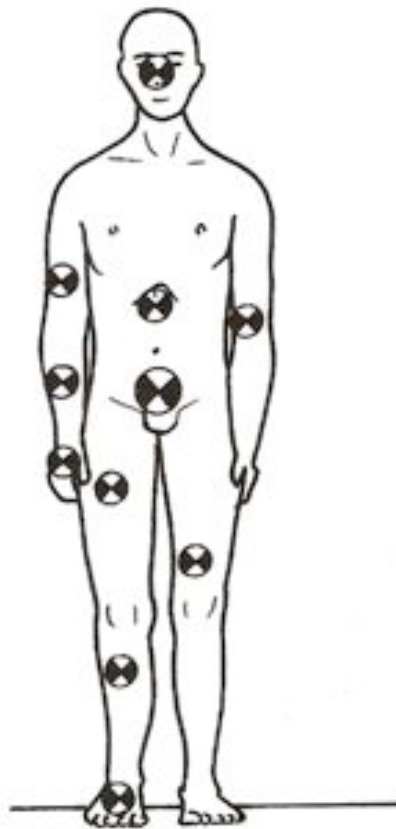
- Travail : produit d'une force et d'une distance, exprimé en Joule
- Energie potentielle =  $mgh$
- Energie cinétique =  $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} I W^2$
- Puissance : Quantité de travail par unité de temps en Watts W



# Centre de gravité

- Point fictif qui permet de regrouper l'ensemble des forces liées à l'attraction terrestre
- $P = m g$
- Chaque segment du corps humain peut être exprimé en pourcentages du poids du corps
- Le centre global est situé au niveau de S2

# Centre de gravité



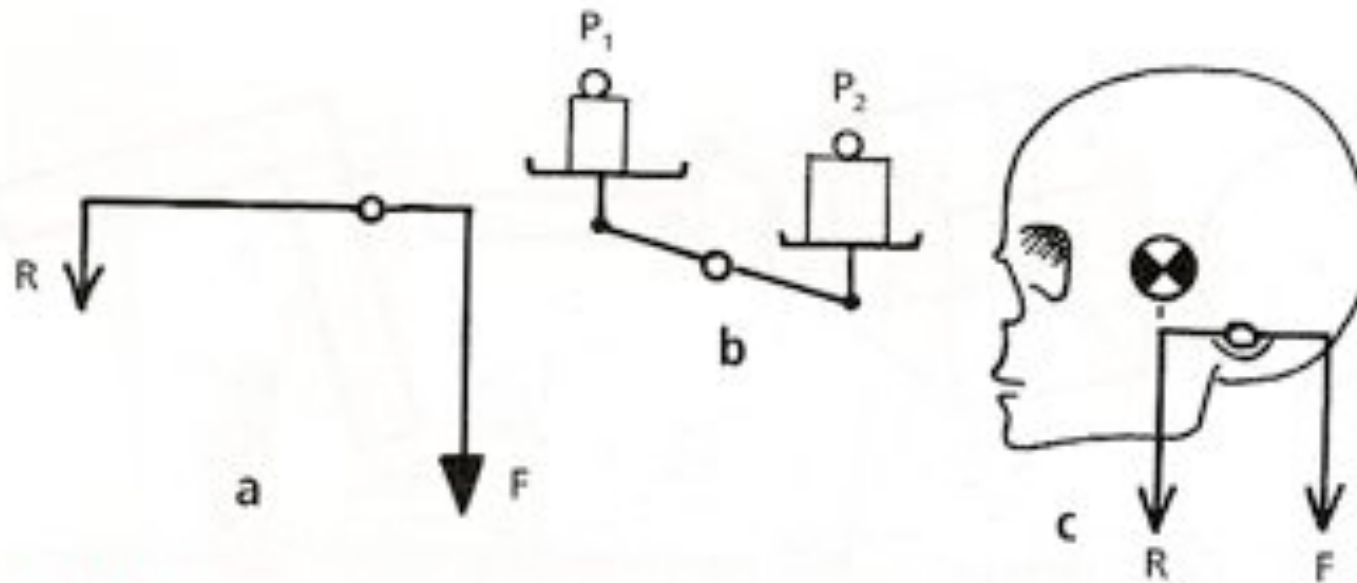
**Fig. 1-15** – Centre de gravité (\*) d'un objet homogène, régulier et symétrique (a et b), d'un objet asymétrique : marteau (c) ou équerre (d).

**Fig. 1-16** – Centres de gravité (CG) selon Dempster (à gauche : CG segmentaires ; à droite : CG des membres).

# Leviers

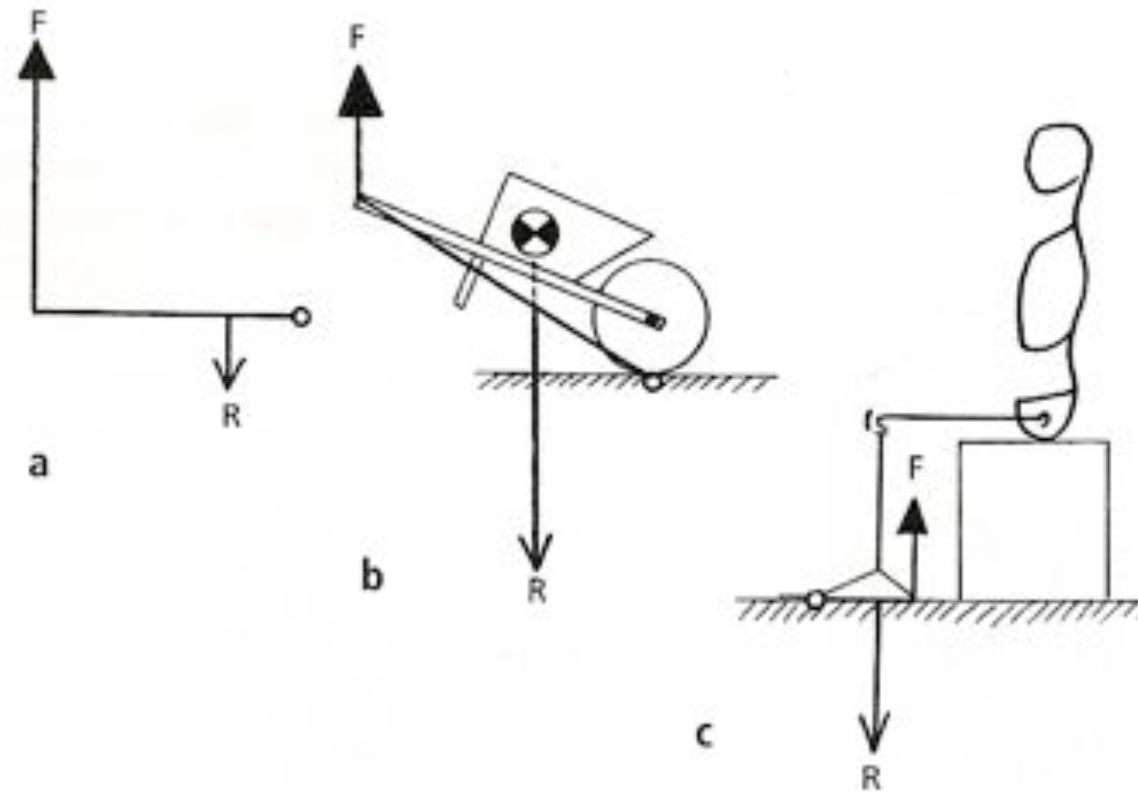
- Archimède
- Système mécanique destiné à augmenter l'effet d'une force grâce à un moment favorable

# Levier inter-appui



**Fig. 1-17** – Levier inter-appui (a), exemple de la balance à deux plateaux (b) et exemple humain (c) (R = résistance, F = force).

# Levier inter-résistant



**Fig. 1-18** – Levier inter-résistant (a), exemple de la brouette (b) et exemple du soléaire (c), le sujet étant assis.



# Levier inter- moteur

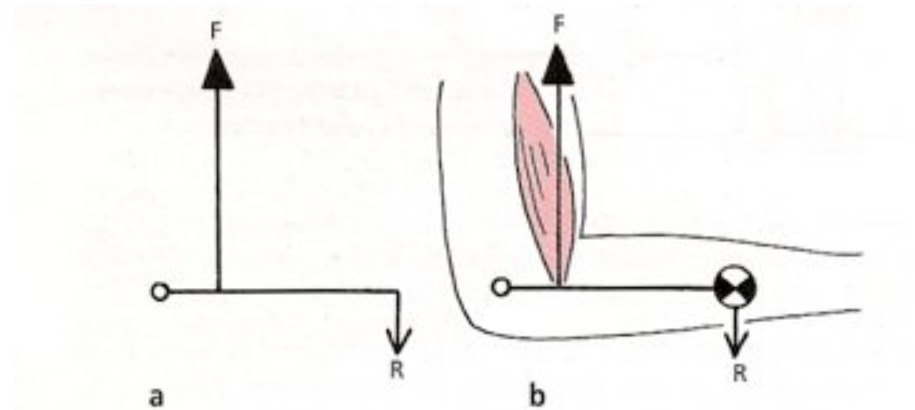


Fig. 1-19 – Levier inter-force (a), coûteux, et son exemple humain (b).

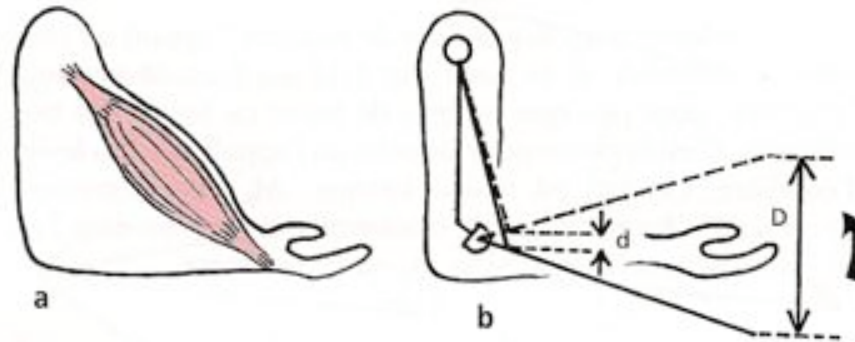
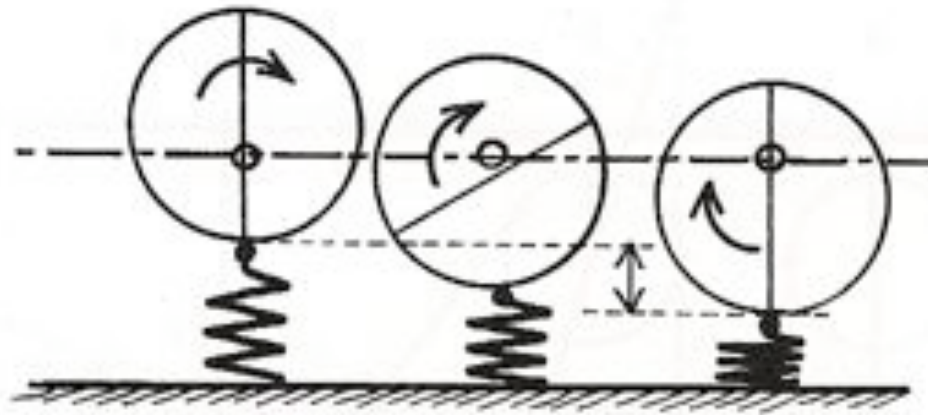


Fig. 1-20 – Sur le plan humain, un levier inter-résistant créerait des volumes musculaires imposants (a) ; le choix d'un levier inter-force minimise la course musculaire et favorise la vitesse distale (b).

# Effet came

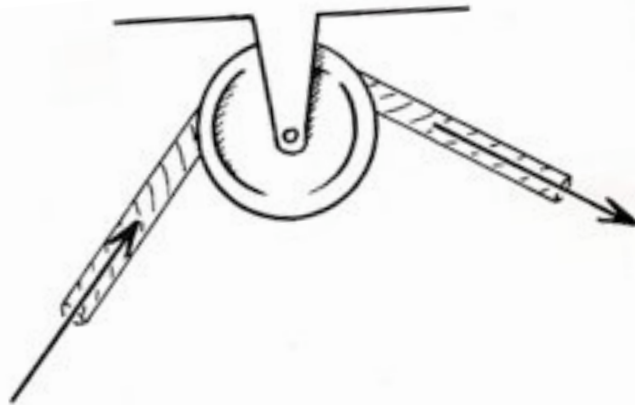
- Arbre à came ?



**Fig. 1-21** – Effet came dû à la rotation d'une surface à axe excentré.

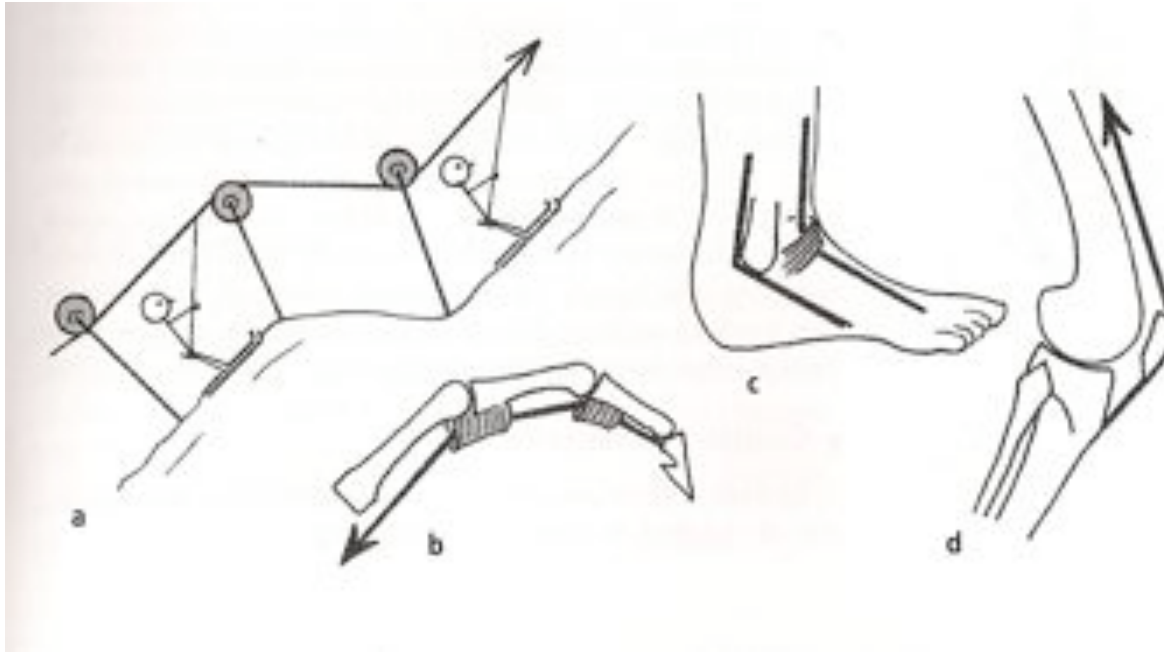
# Poulie

- Machine simple destinée à modifier le sens d'une force, sans en changer l'intensité
- Composée d'un axe et d'une roue au bord épais creusé d'une gorge pour passer un câble



**Fig. 1-22** – Poulie : modification de la direction d'une force sans changer sa valeur.

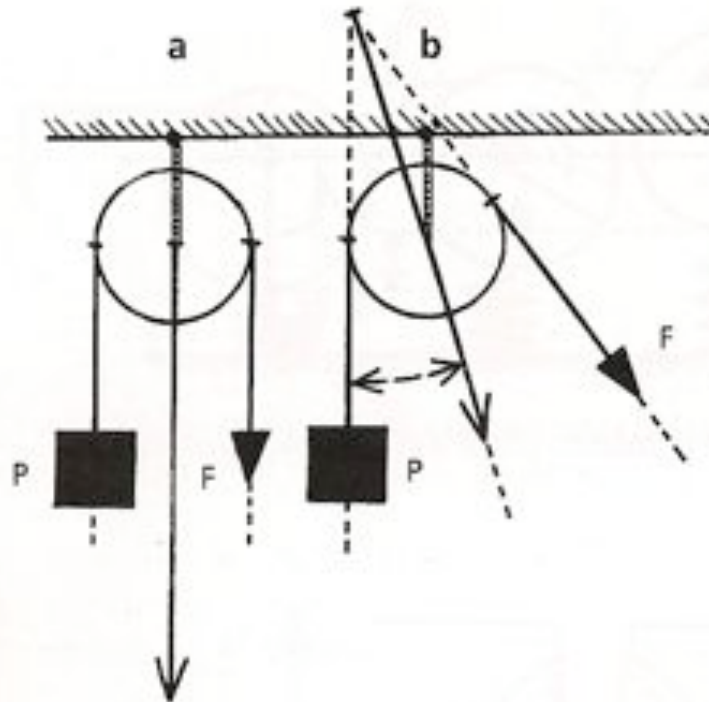
# Poulie



**Fig. 1-23** – Utilisation d'un système de poulies : pour un téléski (a), pour les coulisses fibreuses des doigts (b), pour une réflexion osseuse ou sur un rétinaculum (c), ou pour une réflexion de type sémoïde (d).

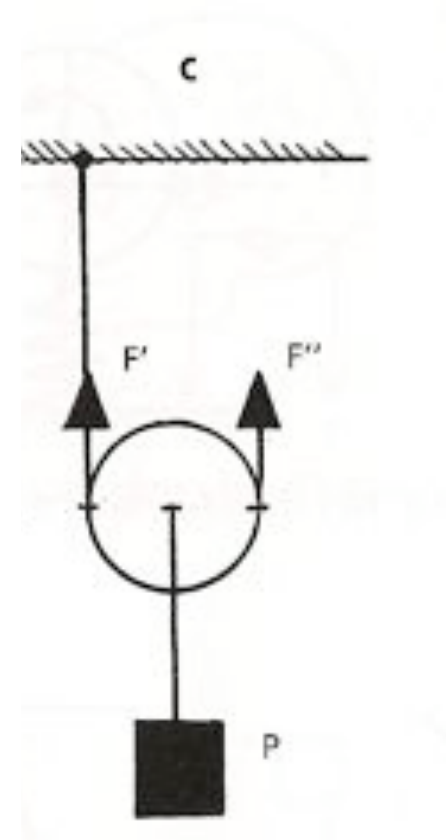
# Poulie Fixe

- Permet de renvoyer une force de traction dans une autre direction
- La force exercée sur la poulie correspond donc à  $2F$



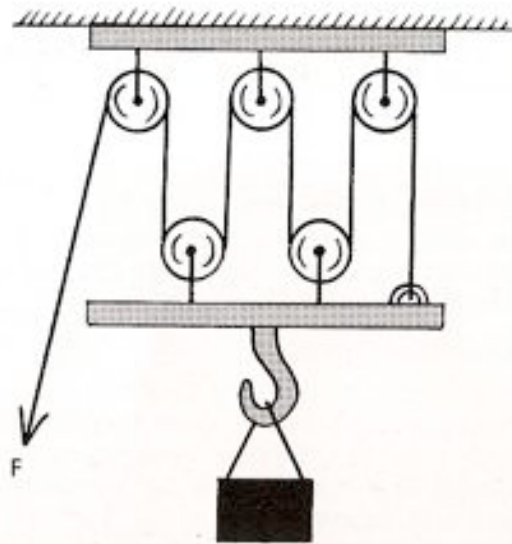
# Poulie Mobile

- Système où le filin est fixé et l'autre mu par une force  $F$
- Le poids  $P$  est équilibré par  $2F$
- La force nécessaire pour soulever  $P$  est divisée par 2



# Systeme moufle

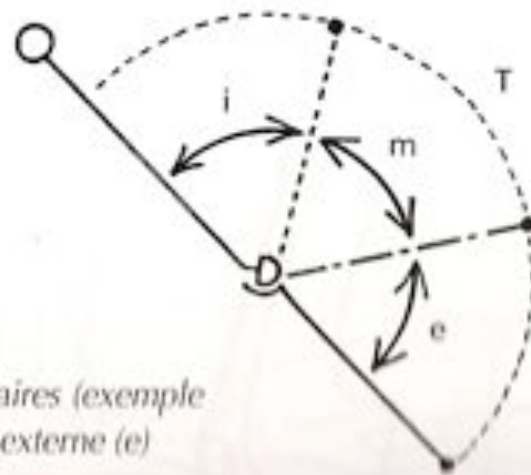
- Assemblage de plusieurs poulies permettant de créer un palan réduisant l'effort
- Nécessite un grand déplacement du filin



**Fig. 1-25** – Systeme palan.  
La force  $F$  est divisée par le  
nombre de brins sur les  
poulies mobiles (ici quatre).

# Courses

- Débattement parcouru lors d'un mouvement
  - L'articulation réalise un déplacement angulaire
  - Le muscle un déplacement centimétrique (mono ou poly articulaire)



**Fig. 1-26** – Courses angulaires articulaires (exemple du coude) : interne (i), moyenne (m), externe (e) et totale (T).



# Chaines

- Successions d'éléments, intérêt ?
- Chaine articulée
- Chaine musculaire
  - Ouverte – fermée
  - Série - parallèle

# Notions de contraintes

- Les différents éléments de la triade cinétique sont soumis à des contraintes
- Chacun des tissus réagit à ces contraintes en fonction de ses constituants propres
- Néanmoins les tissus suivent les mêmes lois face aux contraintes

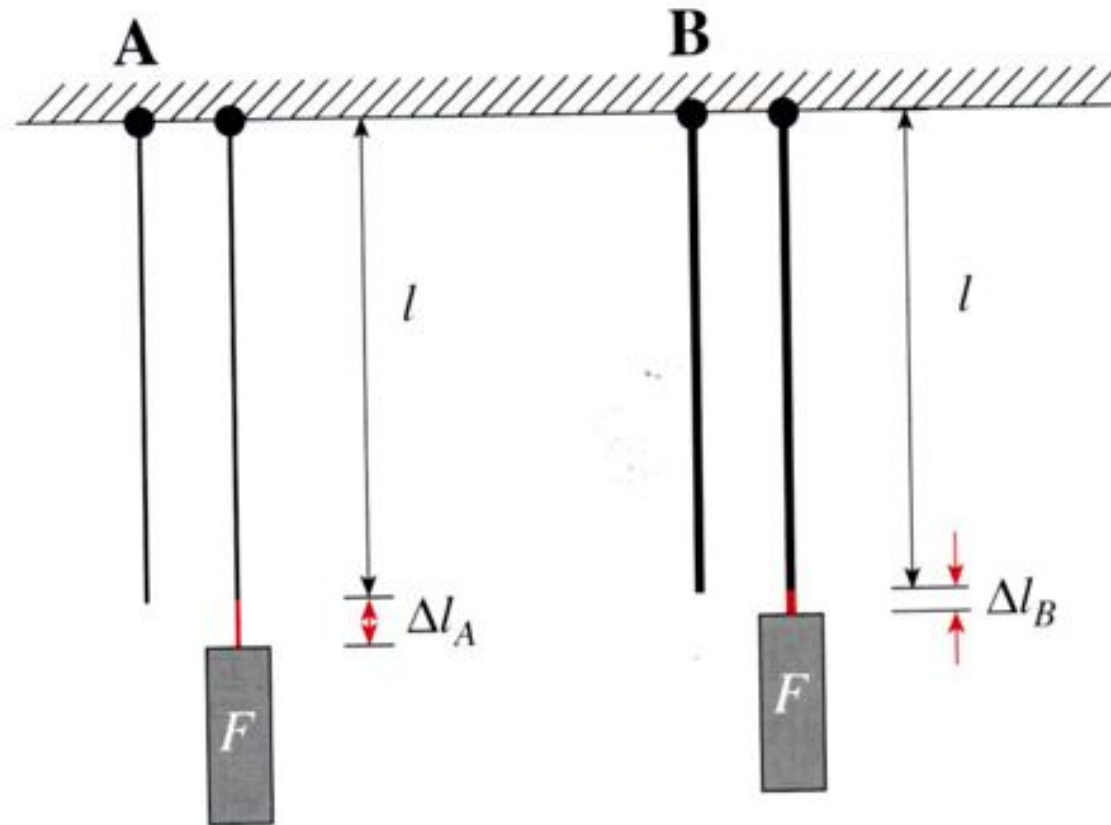
# Contrainte

- La contrainte est égale à la force ramenée à la surface sur laquelle elle s'exerce
- Unité: N/m<sup>2</sup>
- Les contraintes se présentent sous trois formes élémentaires
  - Traction, compression, cisaillement
  - Formule de la contrainte
    - $\sigma = F/S$

# Les contraintes

- Elles vont entraîner des déformations
- Ces déformations se traduisent par une modification de l'allongement du tissu sollicité
- Nous aurons donc  $\varepsilon = \Delta l / l$ 
  - La déformation est sans unité puisqu'elle correspond à une variation de longueur
  - (soit allongement, soit raccourcissement)

# Notion d'allongement



La section de l'élastique a doublé entre A et B

schémas tirés de biomécanique  
fonctionnelle Dufour, Pillu

# Diagramme contrainte-déformation

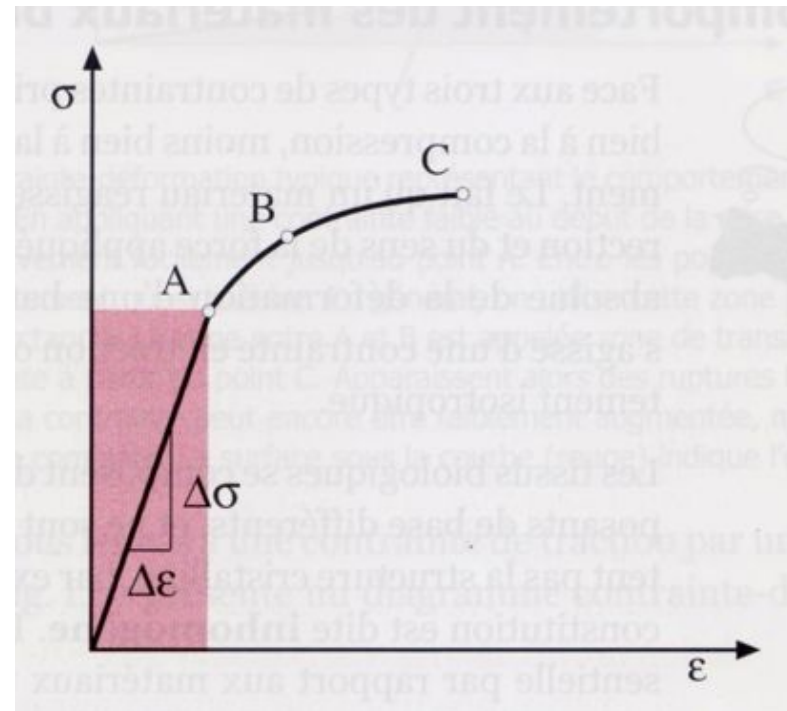
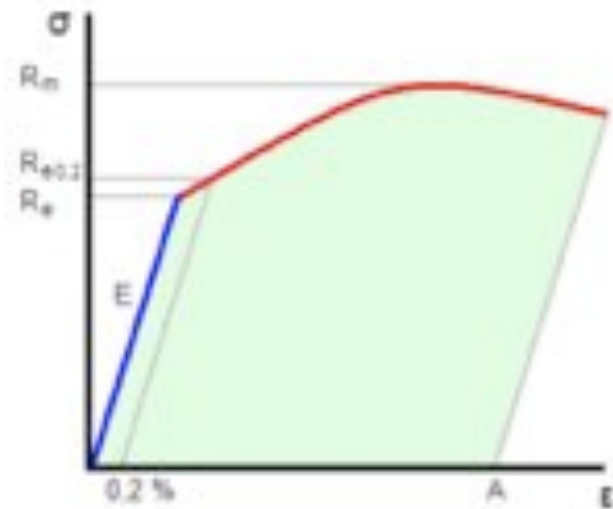
- La relation entre la contrainte et la déformation est représentée par le diagramme contrainte-déformation
- Un solide a d'abord une déformation de type linéaire ou il y a un rapport de proportionnalité entre la contrainte et la déformation
- Ce comportement est nommé module d'élasticité ou module de Young

- 

$$E = \sigma / \varepsilon$$

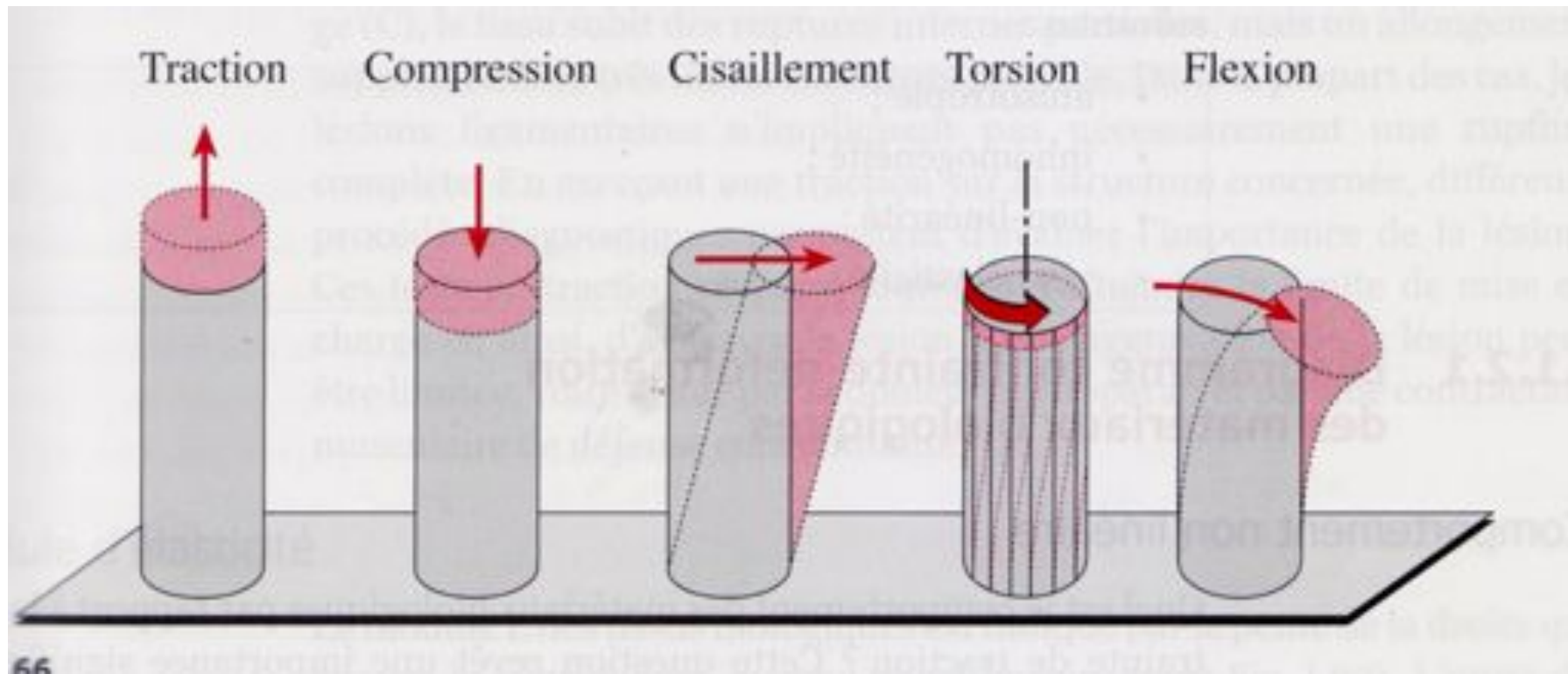


# Module de Young



A: limite de proportionnalité, B: limite d'élasticité, C: point de rupture

# Différentes formes de contraintes





# Différentes réactions à la déformation

- **Elasticité**: correspond à la propriété qu'à un corps à reprendre sa forme initiale lorsque la force a été supprimée (relaxation)
- **Plasticité** : correspond à la propriété qu'à un corps à conserver la forme obtenue (allongement) une fois que la force a été supprimée
  - La déformation plastique s'obtient lorsque la limite d'élasticité est atteinte
  - Si la contrainte continue, on arrive à la charge de rupture

# Comportement des tissus biologiques

- Une barre métallique réagit bien aux trois types de contrainte fondamentale. C'est un comportement isotropique
- Un os réagit bien à la compression, moins bien à la traction et encore moins bien à la torsion
- L'os réagit donc différemment en fonction de la direction et du sens de la force appliquée appelée comportement anisotropique
- Il en est de même pour les autres tissus humains

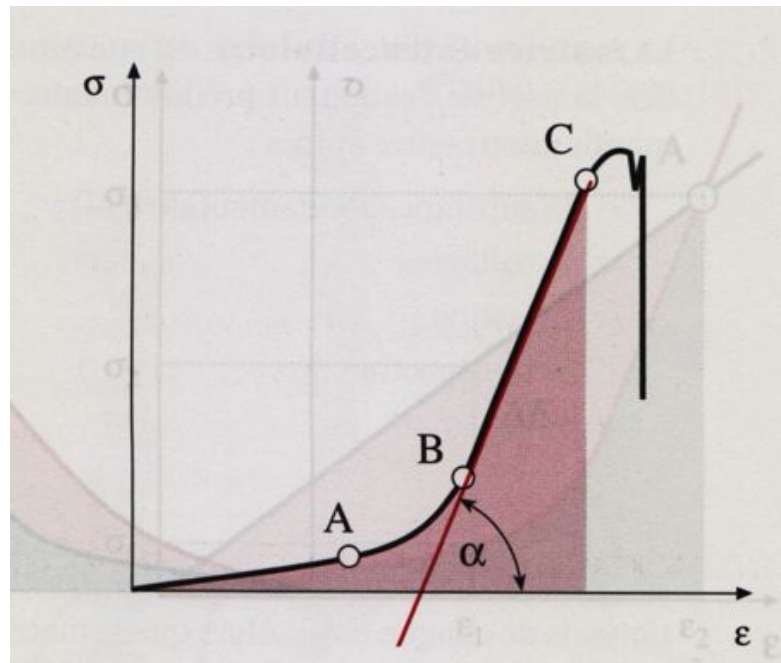


# Comportement des tissus biologiques

- Ils sont aussi des tissus de constitution inhomogène
- La déformation que subit les matériaux biologiques est dite de type déformation non-linéaire
- On parlera aussi de visco-élasticité des tissus biologiques

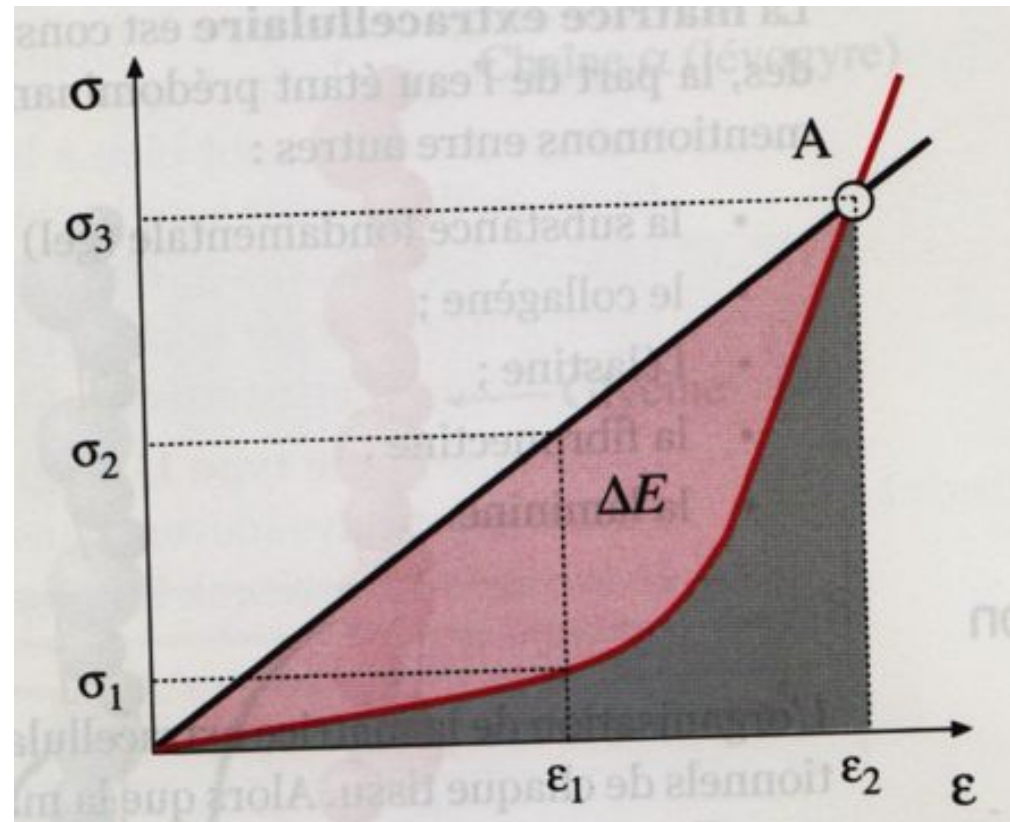


# Diagramme contrainte- déformation appliqué au tissu biologique



- A: allongement progressif, entre B et C déformation linéaire (module E), charge de rupture atteinte en C, d'abord partielle, puis complète
- En rouge: énergie absorbée

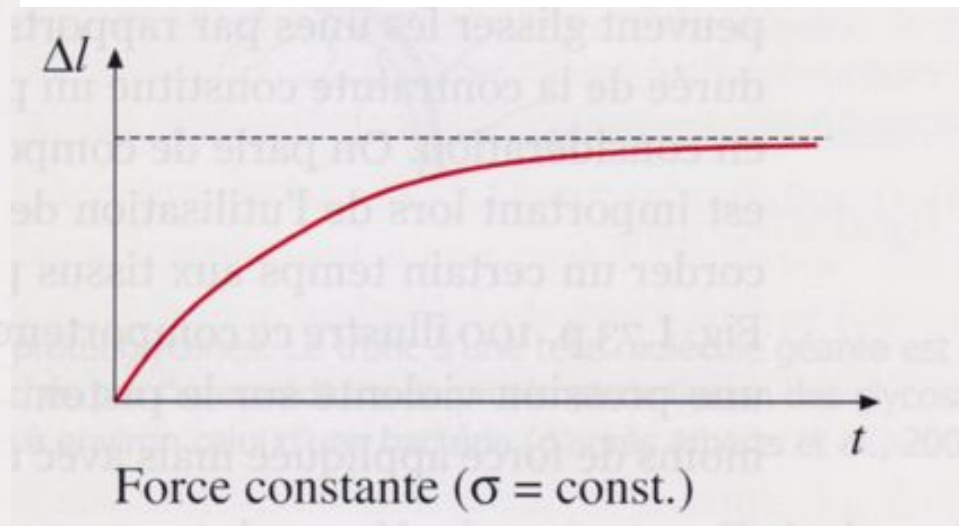
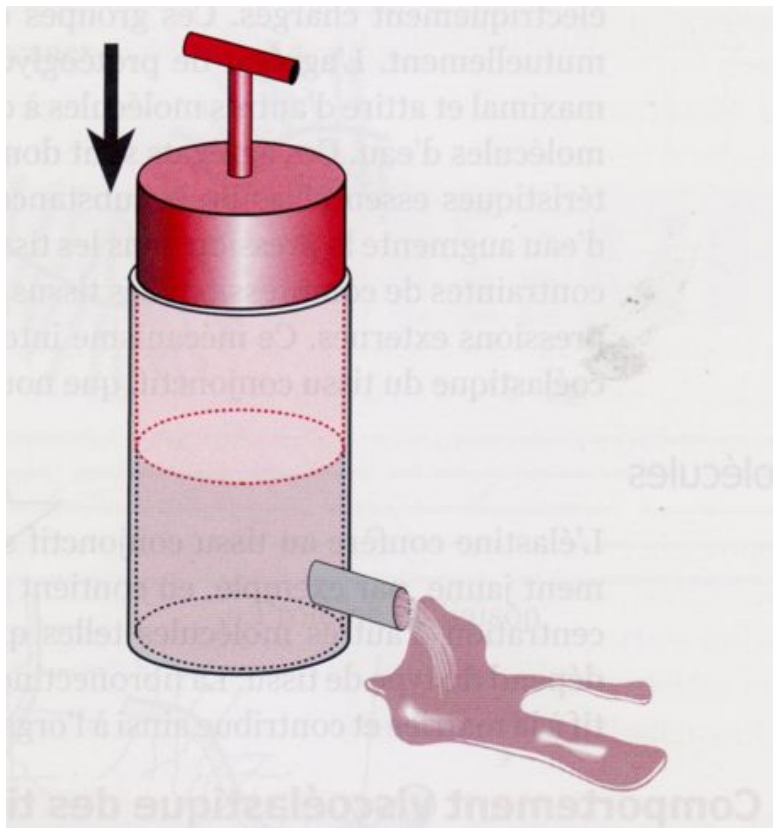
# Comportement entre matériau linéaire et non linéaire



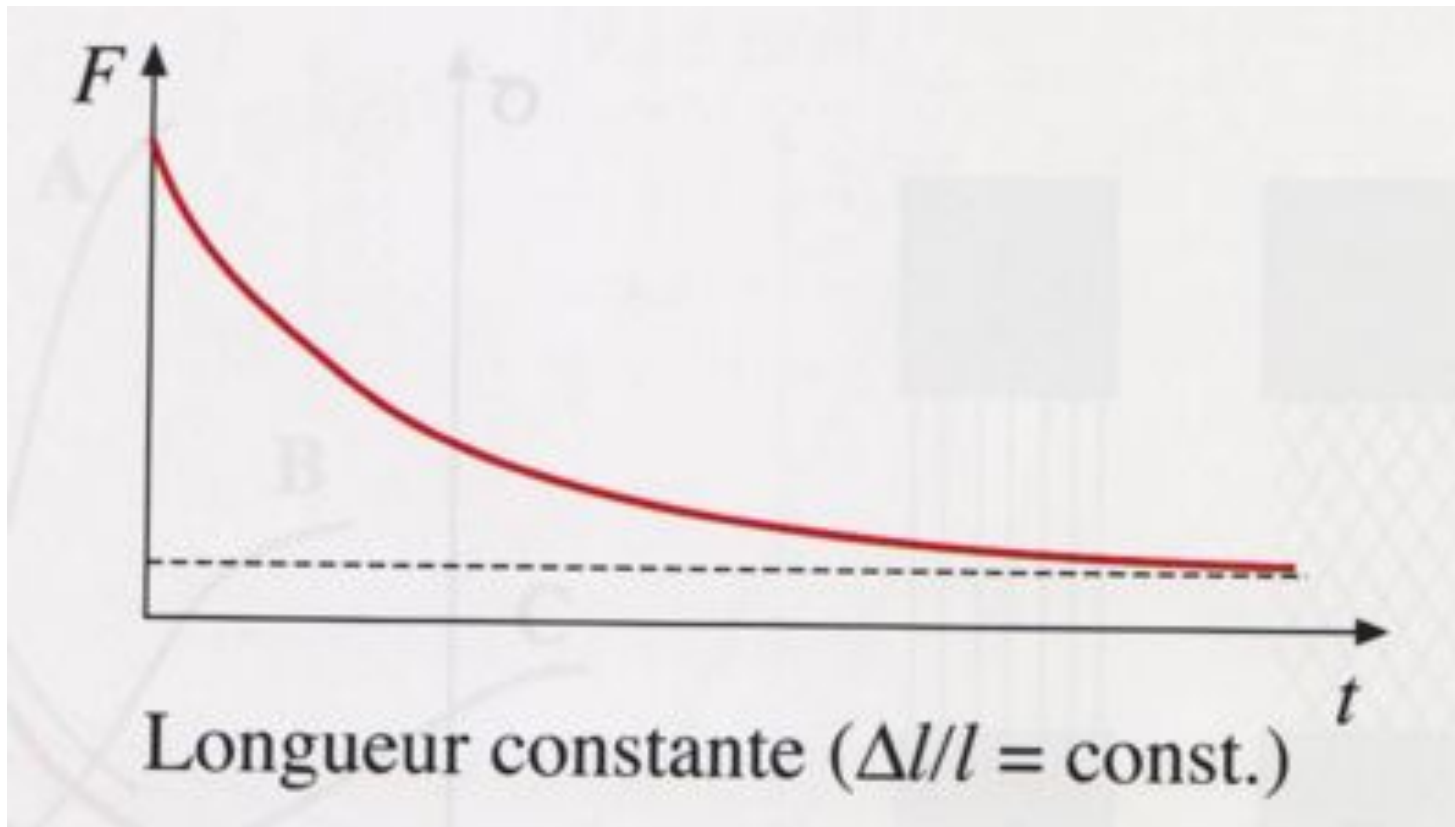
# Comportement visco-élastique

- Introduction de la notion de temps
  - Les tissus conjonctifs s'allongent d'une certaine valeur et quelque soit la durée
  - Les tissus éliminent progressivement l'eau, les molécules glissent l'une par rapport à l'autre
  - On parle de comportement visco-élastique
    - Application kinésithérapique: il faut laisser un certain temps d'étirement pour que le tissu s'allonge

# Visco-élasticité



# Visco-élasticité



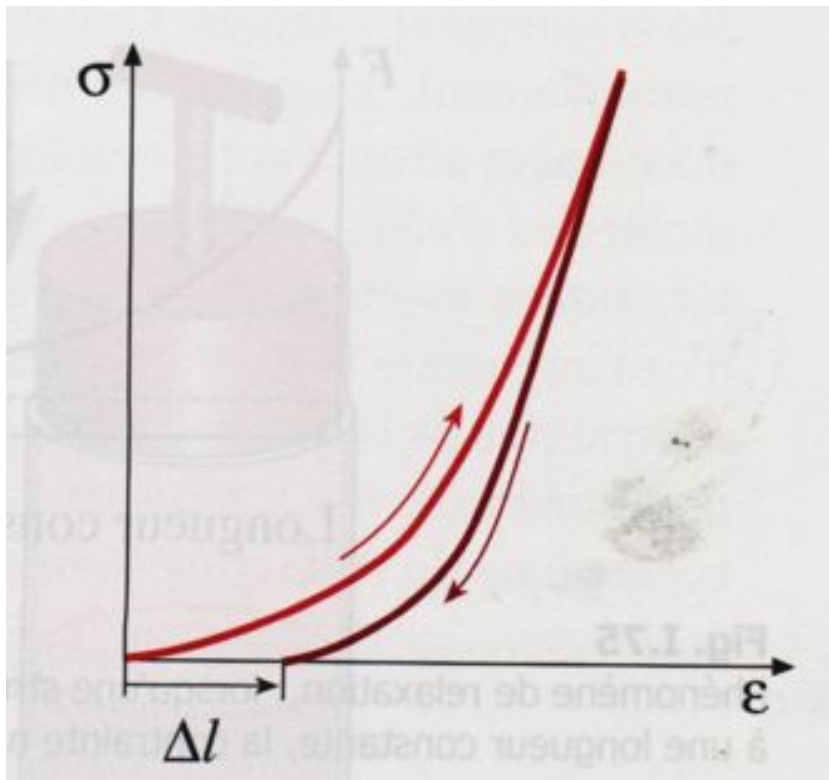


# Visco-élasticité

## Phénomène de relaxation

- Interprétation de la figure précédente
  - après quelques minutes d'étirement, on sent que la force nécessaire à l'étirement diminue ce qui permet d'accentuer l'amplitude
  - Travaux faits sur le triceps sural (Toft 198) montre qu'après 5 minutes d'étirement, la force de traction diminue de 22%
  - Souhail démontre qu'après 4 à 5 étirements du quadriceps, la force interne du muscle diminue de 15 à 20 N

# Phénomène d'hystéresis



- Il existe une déformation résiduelle suite à un allongement, la courbe se déplace vers la droite.
- Si on ne relance pas l'étirement ou si rien n'est fait, au bout de quelques temps, on revient à la case départ
- Application avec les étirements type stretching

# Applications aux techniques myotensives

- Paramètres importants
  - Le module E
  - L'allongement obtenu
  - Diminution de la force en rapport avec le phénomène de relaxation
  - Force de résistance maximale
  - Allongement maximal possible
  - Énergie absorbée



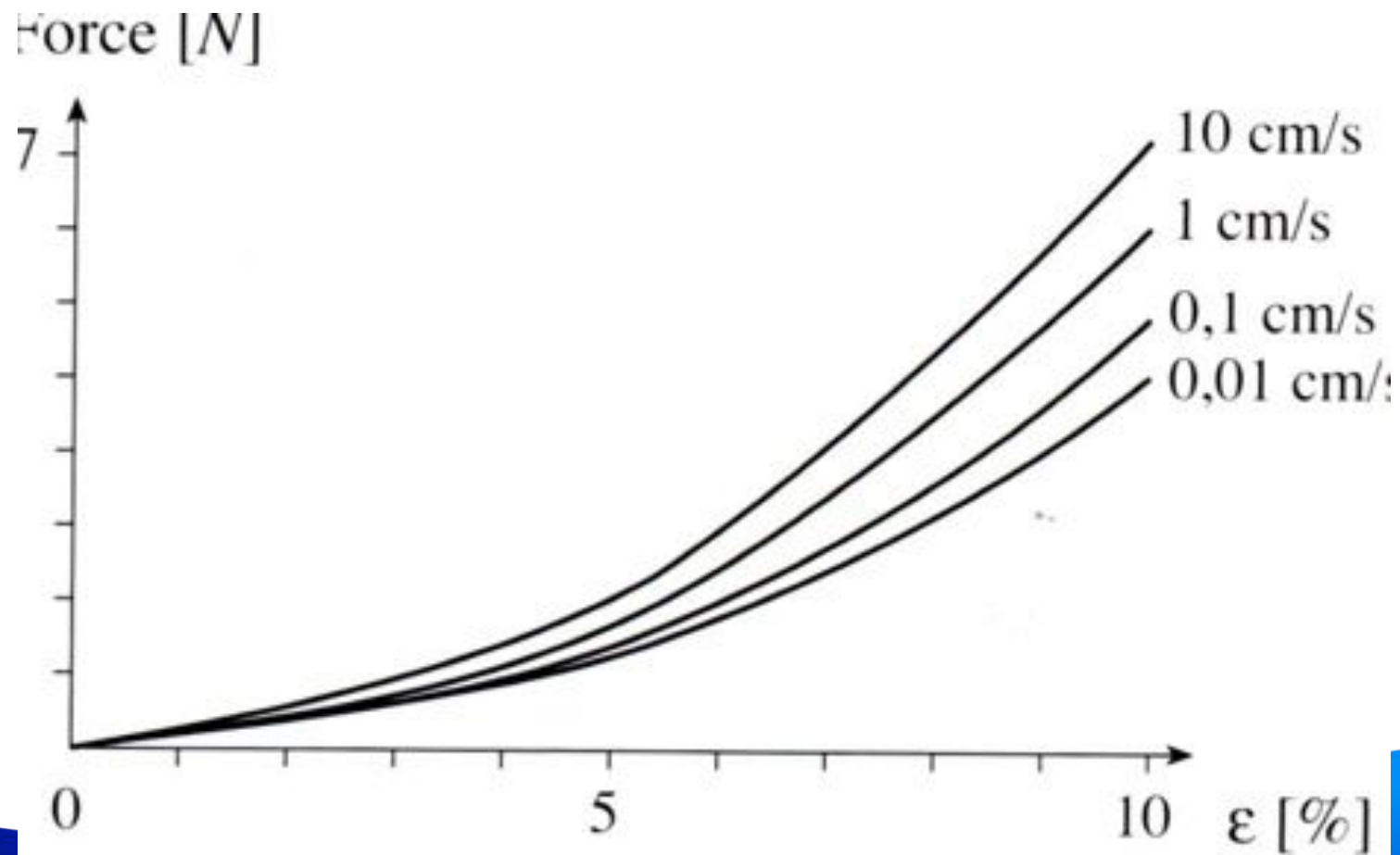
# Autres facteurs

- Composition des tissus
  - Disposition des fibres et variation d'orientation
    - Module d'élasticité dépend de la composition
    - Différence droite & gauche, concentration en eau
- Force: plus la force est élevée, plus la déformation est importante
- La déformation augmente avec le temps d'étirement

# Autres Facteurs

- Vitesse de déformation:
  - Plus la vitesse de déformation est faible, l'étirement est important (à durée identique d'application de la force)
  - Si la mise en charge est rapide, la pente est plus raide donc résistance possible (Taylor 1990)
  - Possibilité aussi d'une charge de rupture plus élevée et quantité d'énergie augmente

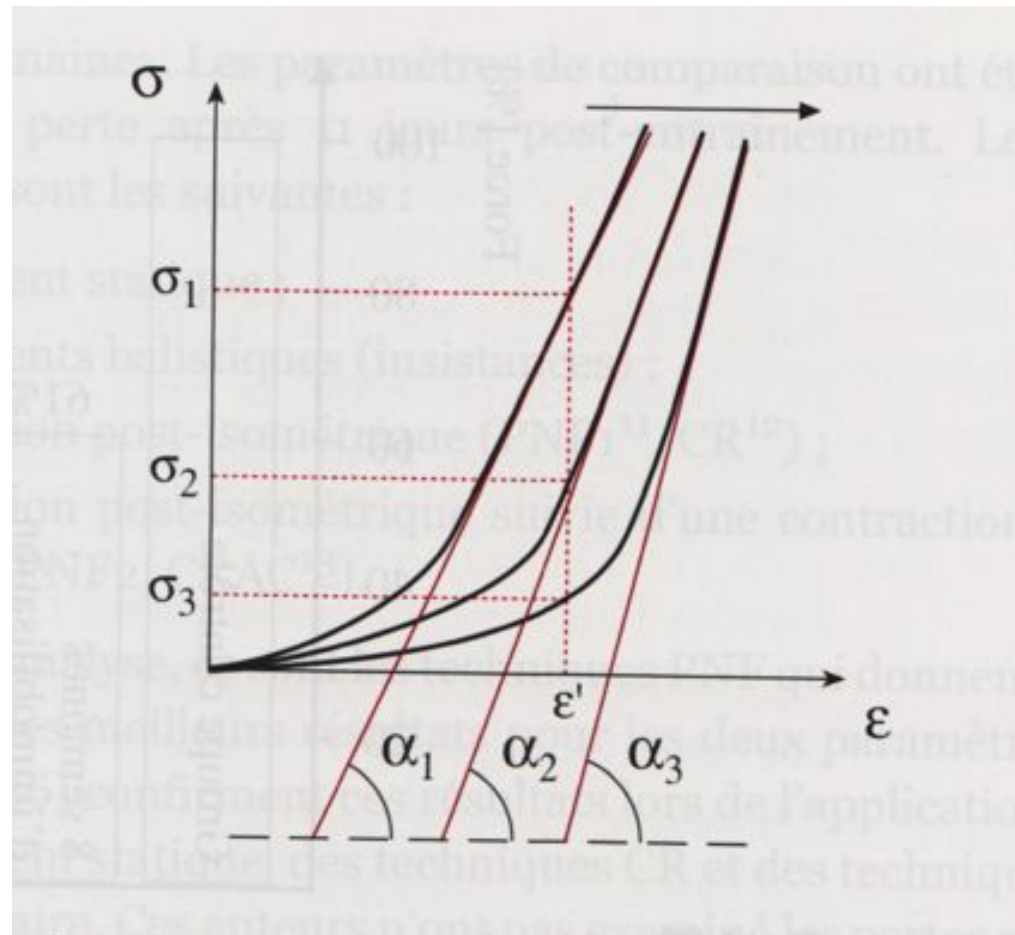
# Autres facteurs



# Autres facteurs

- Lors d'étirement successifs, on a deux phénomènes qui se réalisent qui sont
  - Augmentation de la « souplesse » (fluage)
  - Augmentation de la rigidité
  - Les deux semblent paradoxales et peuvent s'expliquer en raisonnant sur le fait que l'étirement augmente l'amplitude du mouvement, mais fait apparaître une résistance plus élevée en fin de mouvement

# Autres facteurs



schémas tirés de biomécanique  
fonctionnelle Dufour, Pillu

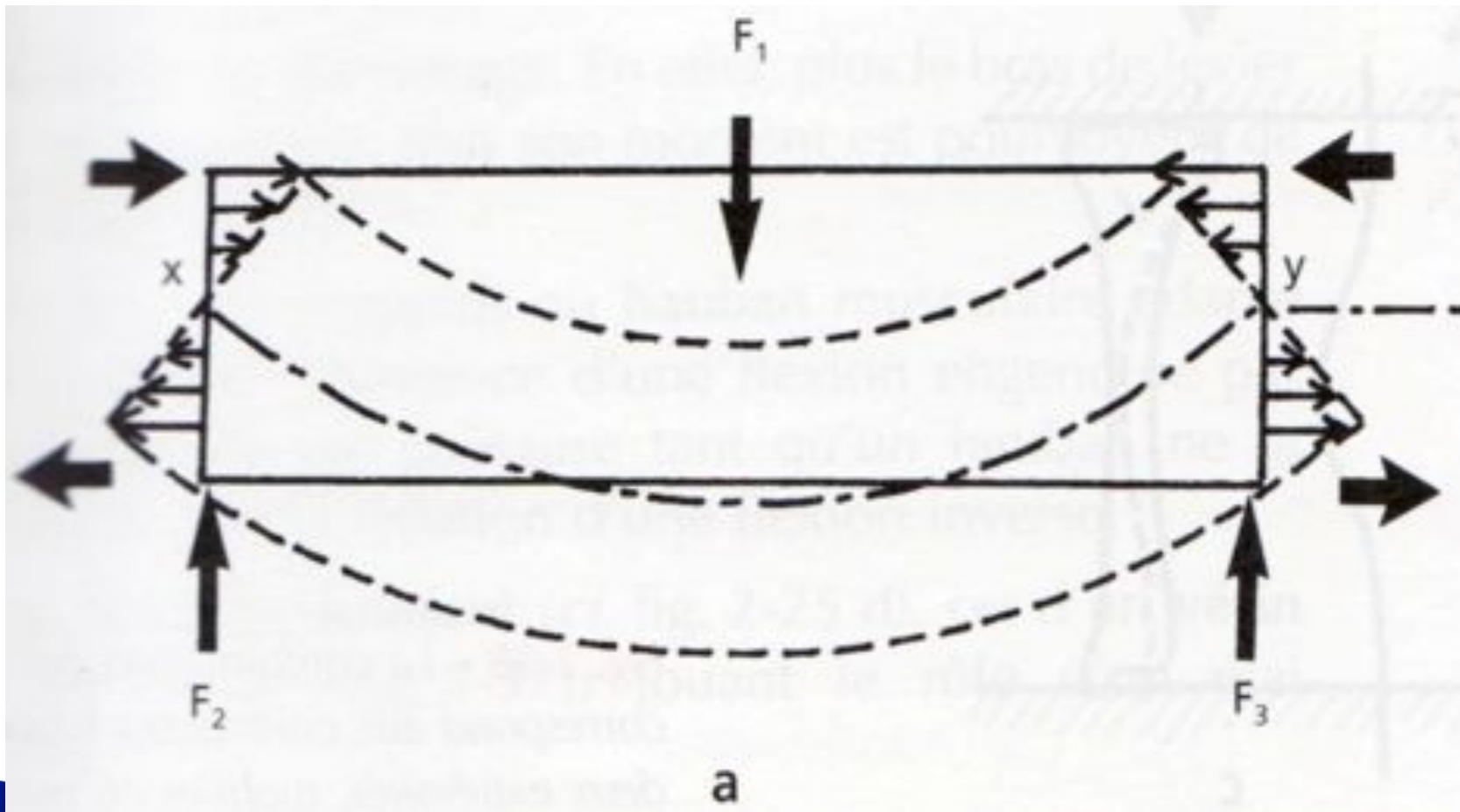


# Contrainte composée

## la flexion

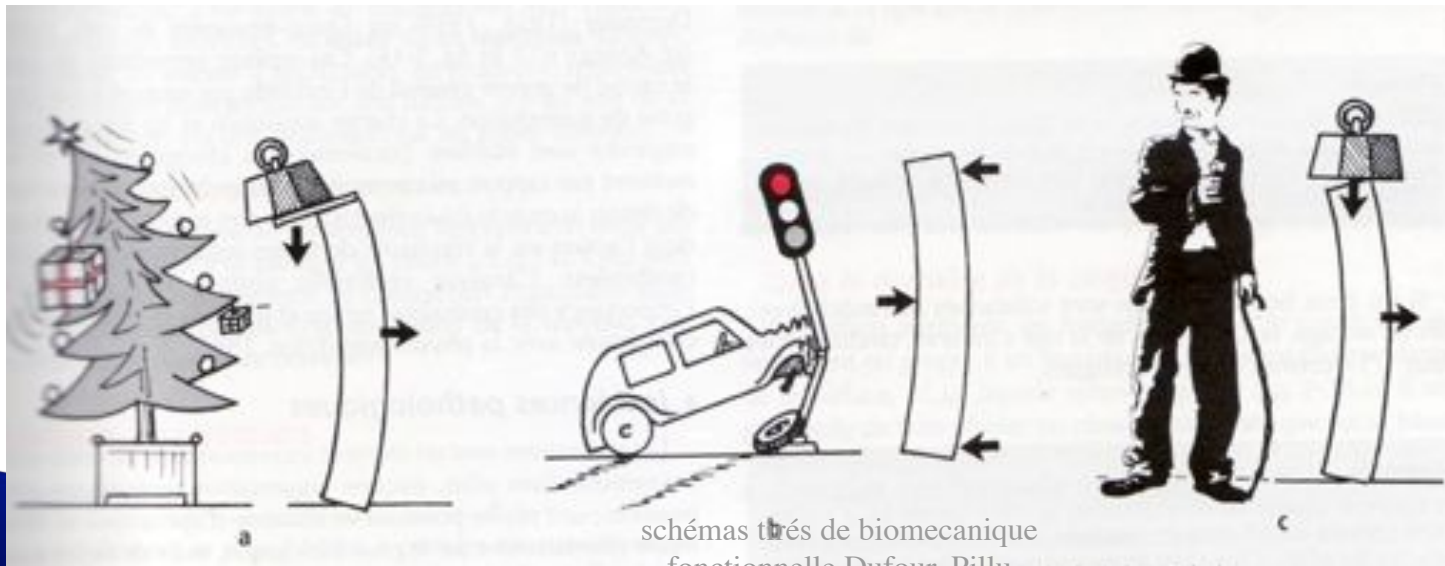
- On appelle flexion, la contrainte qui soumet une poutre à des forces coplanaires normales aux génératrices et provoque une déformation appelée flèche
- On a une contrainte composée avec une compression d'un côté et une traction de l'autre ainsi qu'une zone neutre entre les deux non soumise à contrainte

# Contrainte composée la flexion



# Contrainte composée la flexion

- On distingue
  - Compression décentrée (a)
  - Compression par cintrage (b)
  - Compression par flambage (c)

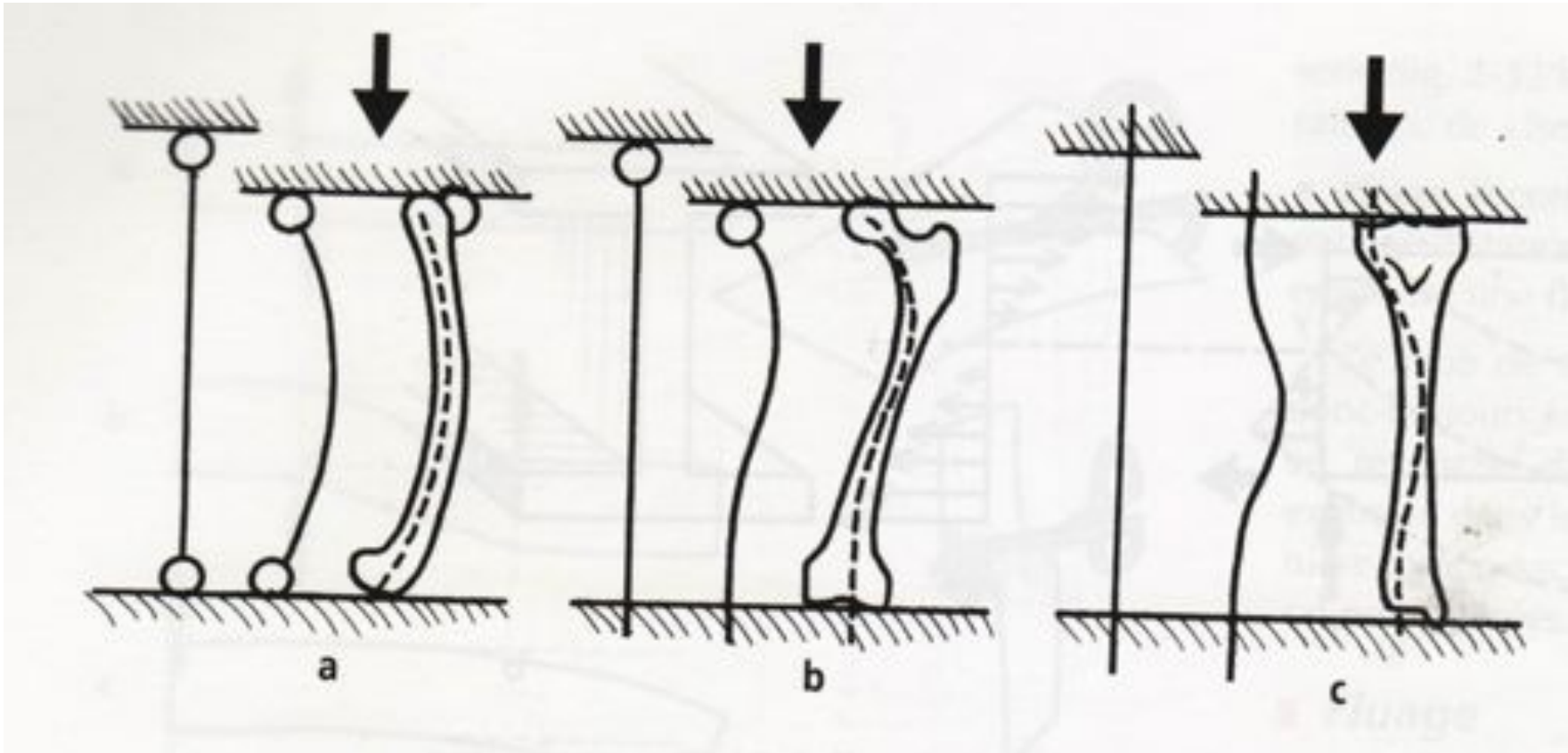


schémas tirés de biomécanique  
fonctionnelle Dufour, Pillu

# Flambage

- Trois variantes
  - Cas d'une tige métallique coincée entre les deux mâchoires d'un étau
    - Si les deux bouts sont libres, il se produit une mono-courbure, due à une rotation de chacun des bouts
      - Exemple: diaphyse fémorale entre hanche et genou
    - Si l'un des deux bouts est rendu solidaire de la mâchoire (encastrement), lors du serrage, la tige s'incurve dans les deux tiers de sa longueur situés du côté libre et reste rectiligne dans le 1/3 supérieur
      - Exemple hanche dans le plan frontal (abduction CF et absence au genou)

# Flambage

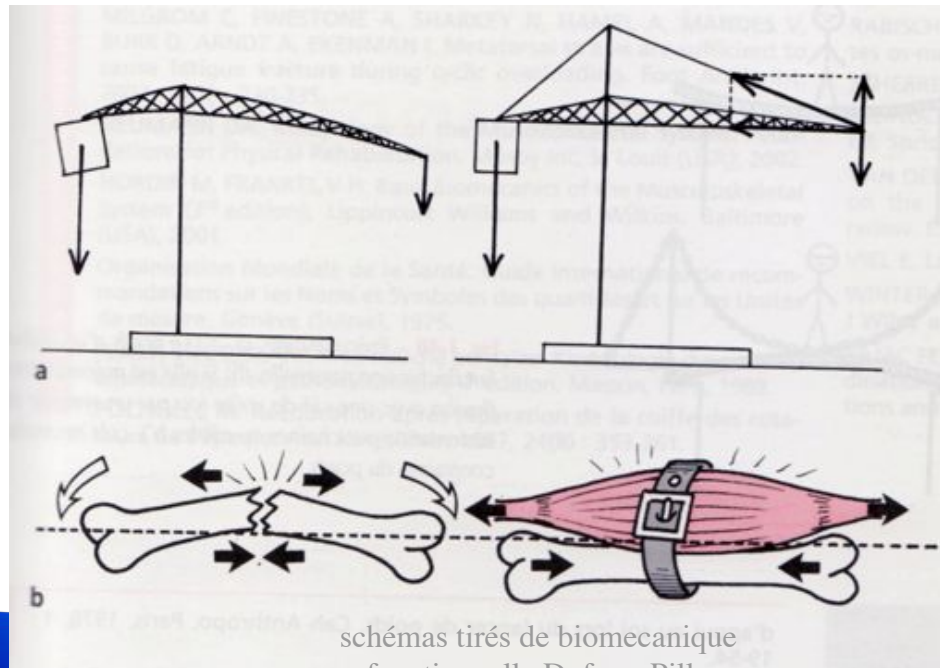


Si les deux bouts de la tige sont solidarisés aux mâchoires, lors du serrage, le 1/3 moyen de la tige s'incurve tandis que les deux 1/3 extrêmes restent rectilignes. Exemple le tibia qui ne permet pas de mouvement dans le plan frontal.

schémas tirés de biomécanique  
fonctionnelle Dufour, Pillu

# Notion de poutre composite

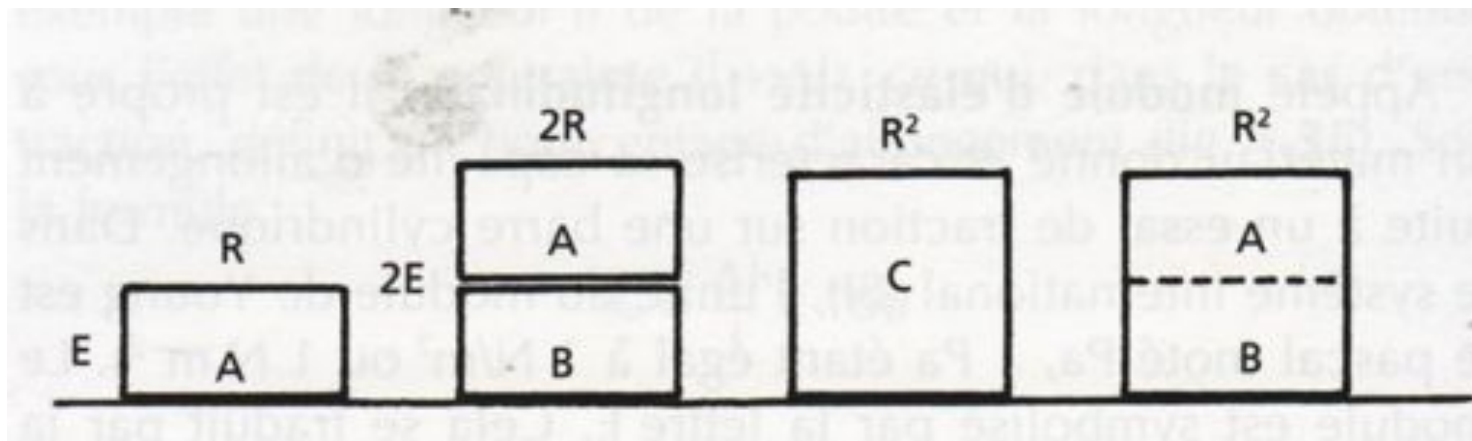
- Une poutre composite est une association de deux matériaux différents, unis solidairement et qui partagent les contraintes auxquelles ils sont soumis en fonction de leur module d'élasticité et leur moment d'inertie. (Rabischong et Avril)



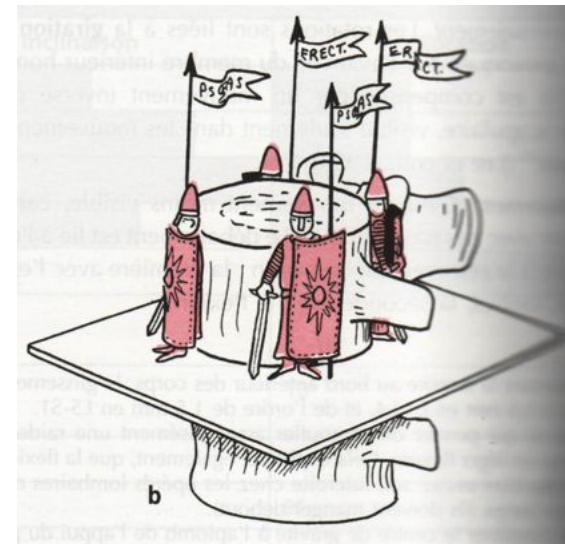
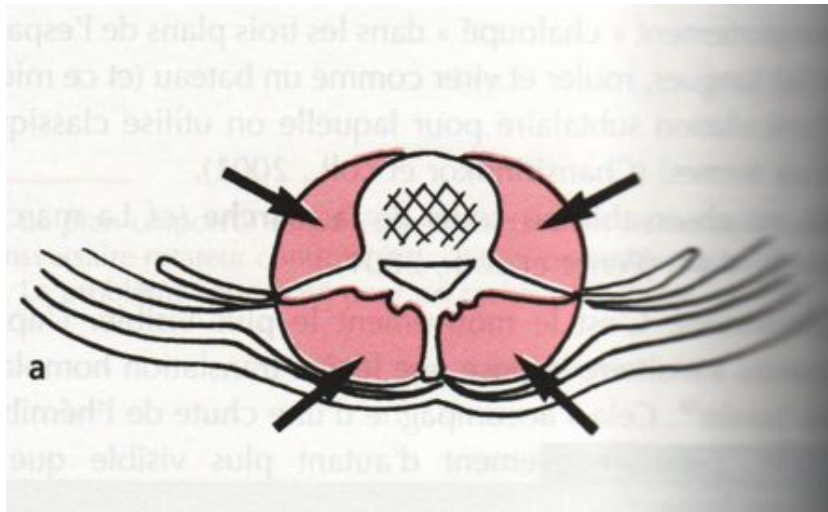
schémas tirés de biomécanique  
fonctionnelle Dufour, Pillu

# Rôle de la poutre composite

- Augmenter la section globale de la poutre
- Dissocier les modules de Young des structures qui associent leurs efforts
- Déplacer la fibre neutre hors de l'os
- Diminuer la valeur totale des contraintes
- Annuler les effets dangereux de certaines contraintes



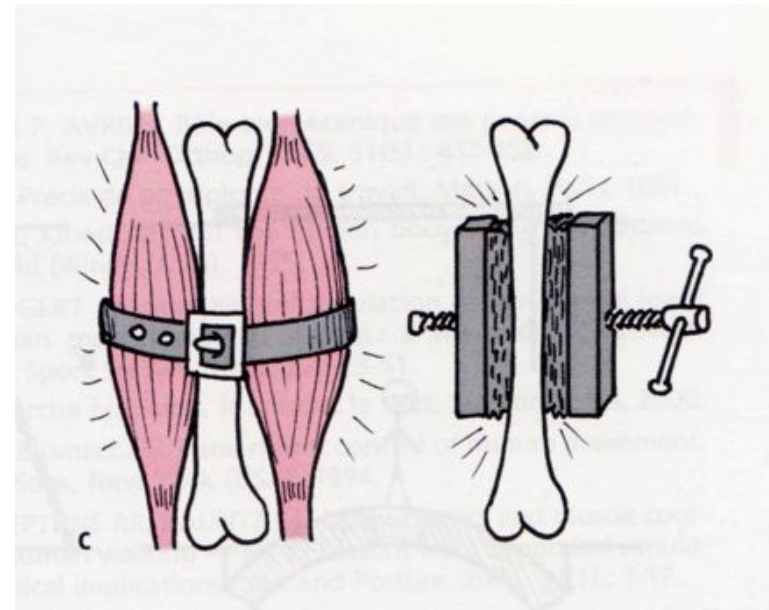
# Poutre composite lombaire





# Notion de co-contraction

La notion de cocontraction se retrouve dans la poutre composite.  
En effet, il y a une double action  
1- poutre composite entre os et muscle  
2- effet étau entre le muscle agoniste et son antagoniste, favorisant la cicatrisation osseuse et correspondant aux chaînes parallèles



# L'os

- **Notion de fatigue d'un matériau** : c'est la diminution de résistance d'un matériau sous l'effet de charges répétées, dont l'amplitude est inférieure à la valeur de rupture, mais induisent des dommages microscopiques au sein de ce même matériau. Le nombre de charges répétées, induisant la rupture en fatigue, est lié à l'amplitude des charges.
- **Fracture de fatigue** : comportement mécanique (d'un métatarsien) soumis à une contrainte répétée déformation microscopique, et casse trait de fracture dur à voir.
- **Rupture de tendon d'Achille** : tendon sollicité en traction en permanence, jusqu'au jour où il y a rupture.

# L'os

- **Résistance à la fatigue** : c'est la plus grande charge dynamique, infiniment répétée, ne provoquant pas la rupture du matériau.
- La valeur de la résistance à la fatigue est, à peu près, deux fois moins grande que celle de la résistance à la rupture.