

M à j. sept 18

BIOMÉCANIQUE 2



Claude HERTOIGH, MCU
UFR STAPS
Université Antilles



Cf. www.univ-ag.fr/uag/staps



Éléments de mécanique humaine

Caractéristique humaine

Sommet du règne animal ?

Forme la + sophistiquée de la vie ?

- il y a tjrs un animal qui possède des capacités
> sur une fonction particulière...

... à l'exception du plan intellectuel

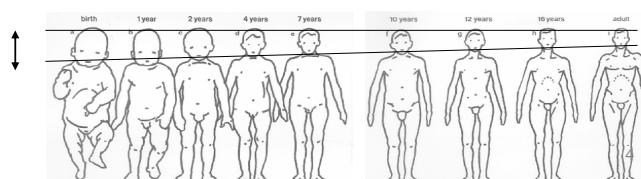
Mais homme = Spécialiste de la non
spécialisation...

3

Et de mécanique humaine

Particularités de la machine humaine :

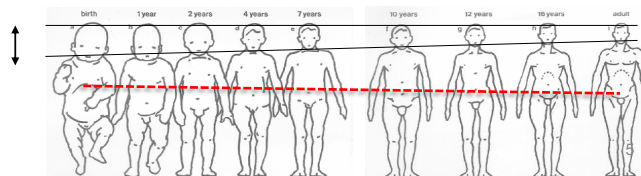
- Pas de plan à disposition !
- Gde variabilité interindividuelle
 - sexe
 - formes
 - dimensions
 - résistance
 - capacités fonctionnelles
 - cognitives
 - motrices...



El^t de mécanique humaine

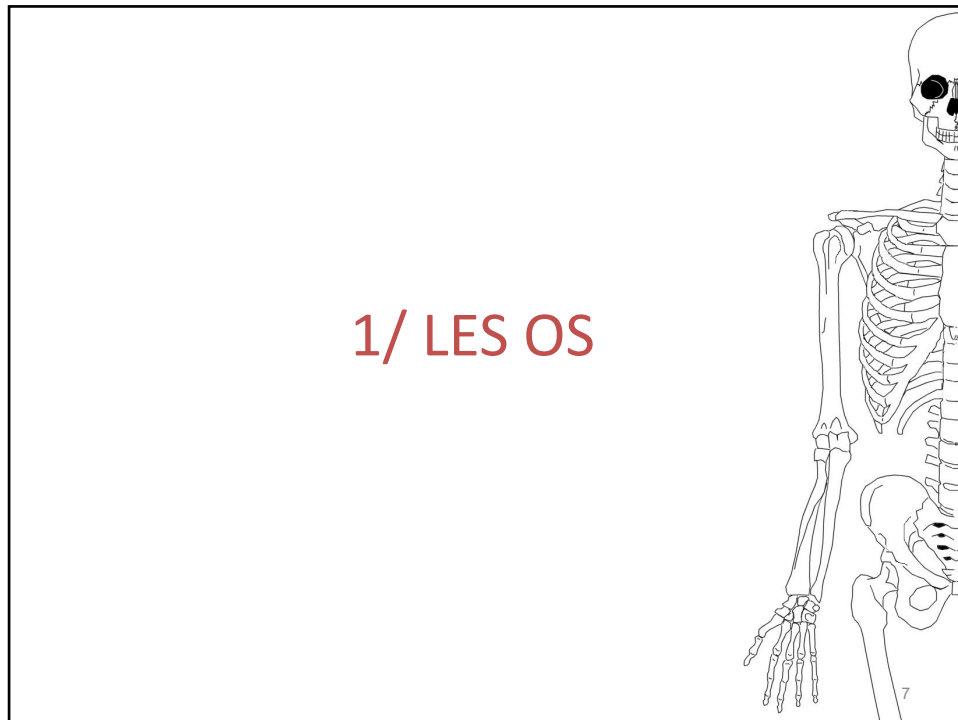
Particularités machine humaine :

- Évolution des caractéristiques en f^c du tps (vieillesse) et de l'entraînement...
- Réactivité et adaptation ≠ face aux agressions
- Optimisation liée à l'évolution (CdeG se déplace)



Els de mécanique humaine "l'homme - machine"

<i>Structure biologique</i>	<i>fonction</i>	<i>Équivalent machine</i>
Squelette	support Protection	mécanisme
articulations, ligaments	Maintenir la cohésion de la structure	Liaisons mécaniques Axes - Courroies
muscles	Stabiliser ou mouvoir le corps	Actionneurs Moteurs
système nerveux	Communiquer, percevoir, décider, commander, contrôler	Automates, contrôleurs, capteurs, ordinateurs
viscères	logistique, énergie	Sources d'énergie



Os : Caractéristiques mécaniques

- 206 os en remaniement permanent
(Ostéoblaste : fabriquent l'os (Ca^+) Ostéoclaste : détruisent l'os)
- Rôle du squelette :
 - Fonction de soutien, support leviers, Mvt ^{2ieme cours}
 - Protection
 - Forme, silhouette
 - Autres : Cellules du sg
- Tissu vivant : vascularisés et innervés (reliés entre eux par X^0) donc modulable, réparable mais aussi cassable...

Le prof d'EPS
a le pouvoir
de
déformer le
squelette !

Os : Caractéristiques mécaniques

Croissance due à une membrane recouvrant l'os :
le périoste

Timing : Croissance en longueur puis en largeur →
les dimensions des leviers changent

Elastique : soumis à une F , il se déforme, puis
retrouve sa forme initiale.

(\neq selon : âge, sexe, mobilisation prolongée)

- **Hystérésis parfait** = Pas de déformation résiduelle,
mais il peut y avoir fatigue du tissu osseux (si
solicitation répétée → retour plus long dans le temps) ⁹

Os : Caractéristiques mécaniques

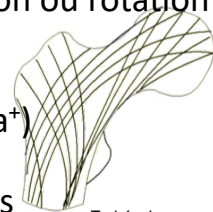
- Avec l'âge diminution de l'eau (peau, os...)
- → os sec + cassant, rupture après ph.
élastique, alors même que les qualités du
matériau OS > bcp d'autres matériaux
- Os = + résistant à contrainte exercée
rapidement qu'à F prolongée

Os : Caractéristiques mécaniques

- + module de *Young* (ou d'élasticité) est grand, +le corps est "raide" (peu élastique)
- L'os compact à un module d'élasticité > à l'os spongieux (donc + raide)
os = tissu relativement souple
Acier = 20 000 N/m², os = 2 000 N/m², bois: = 1 000 N/m²
- Les contraintes de flexion ou de rotation s'exercent surtout à la périph (os creux) (rappel poutre encastrée)
- Os + muscle = poutre composite (Cf. béton armé)

Os

- Propriétés mécaniques varient selon directions (=Anisotropie)
- Os + résistant à la pression qu'à la traction ou rotation (surtout mbre <)
- Chez l'enfant os + élastique (moins de Ca⁺)
- La direction des travées (lames) osseuses semble augmenter les qualités mécaniques de l'os
- **Résistance à la rupture ++** dépend de 5 facteurs :
Section / épaisseur / architecture / configuration ext / qtté sels minéraux
ex : rotule : 198 kg, tibia : 450 kg, fémur : 756 kg



Trabécules osseuses
De l'os spongieux

Os

FATIGUE DES MATERIAUX : DEFINITION

La **fatigue** désigne l'endommagement d'une pièce sous l'effet d'efforts répétés : Quand un objet est conçu pour résister à un effort donné, il peut néanmoins se rompre sous l'application répétée des forces inférieures

Ex. : une vis de diamètre 6 mm peut tenir un objet d'une tonne, elle peut en revanche casser si on lui suspend un objet de 100 kg un million de fois de suite

On mesure la Résistance à la fatigue par le nombre possible d'application de la $\frac{1}{2}$ charge nécessaire à sa rupture

- ACIER $\rightarrow 10^7$ cycles (10 millions de cycles)
- OS \rightarrow nombre de cycles = 1 à 2.8 milliards

13

Os

Légèreté

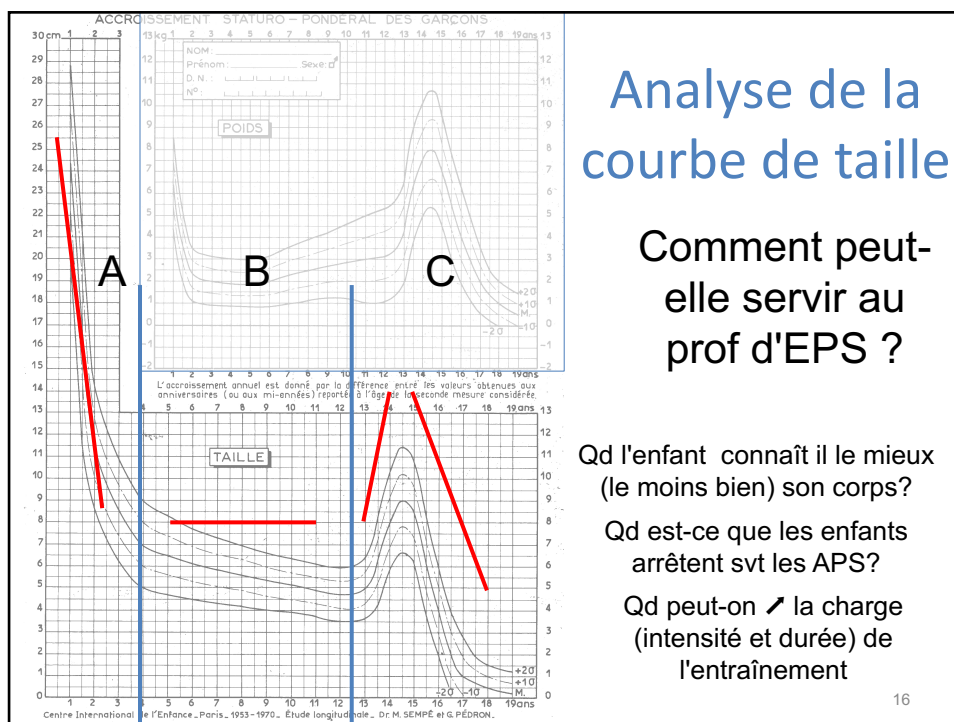
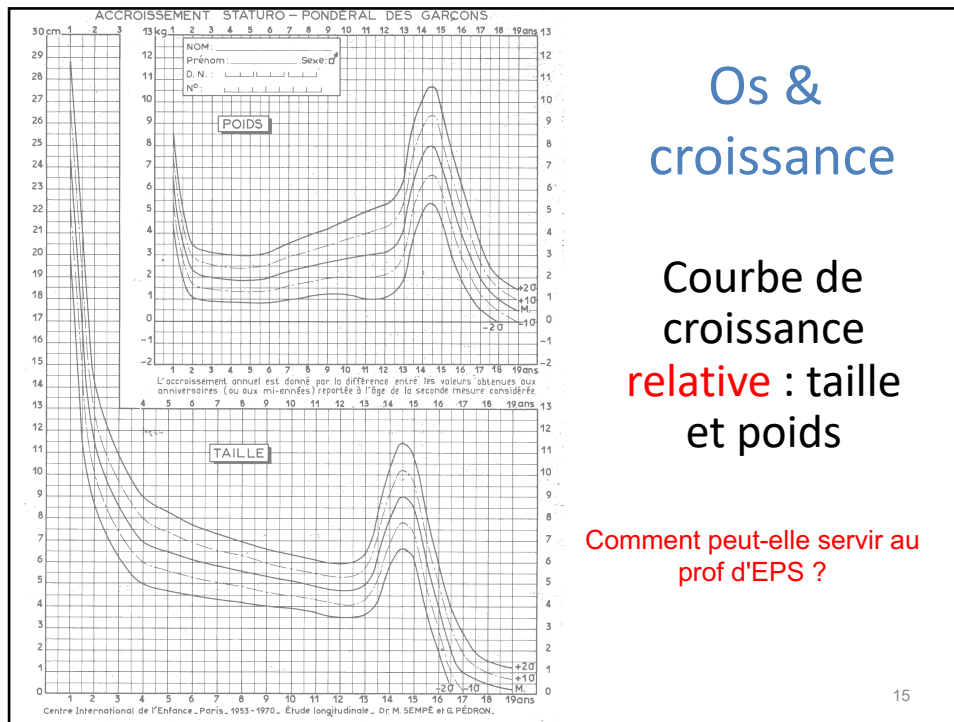
- Os non plein, Teneur en eau augmente poids (squel sec = env. 6/7kg)

Os + muscle = poutre composite (comme le béton armé)
 \rightarrow bonne résistance à la compression

Variations

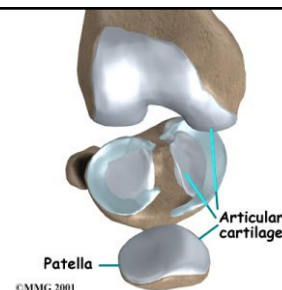
- **Age** dès 25 ans résistance \searrow (traction, compression, flexion) \rightarrow composition histologique évolue
- **Sexe** femme : risque \searrow résistance os : ostéoporose post-ménopause (processus hormonal)
- **Immobilisation** : \searrow caractéristiques mécaniques (os non soumis à G est + élastique - Cf. astronautes)
- **Malnutrition**
- **Vascularisation osseuse**
- **Facteurs héréditaires**

14



âge	aspect fonctionnel	croissance	dev psycho- moteur
7 ans	articulations & muscles peu développés peu de tonus de soutien	5 à 8 ans = ralentissement de la croissance allongement de la silhouette	myélinisation → acquisition motrice ++ imitation coordination globale
10 ans	hausse du volume thoracique (volume cœur et capacité pulmonaire ++)	9 à 12 ans allongement des membres masse grasse diminue	acquisition rapide d'automatisme image du corps précise disponibilité motrice Attention aux attitudes corporelles (scoliose) les courbure de la col vert s'accroît jusqu' à 18 ans
13 ans		filles 13 à 15 ans ou bien garçons 14 à 16 ans : croissance déséquilibrée (période pré pubertaire)	diminution du contrôle de soi Influence des émotions détérioration de la mobilité (souplesse) filles 12 à 13 ans, garçon 13 à 14 ans : capacité de perf max en endurance Attention : pas de charge de longues durée surtout colonne vert.
16 ans	rythme cardiaque se ralenti meilleure adaptation de l'organisme	filles 16 à 19 ans ou bien garçons 17 à 19 ans : harmonisation des proportions	économie / efficacité Apparition de la puissance Dév. Des masses musculaires. Dév de la résistance
20 ans	= adulte	fin de la croissance	= adulte

2/ Cartilage articulaire



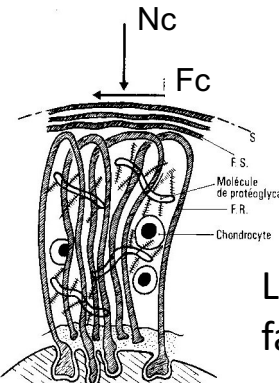
Rôle important :
soutien poids, **lubrification** et **répartition** charges
ne possède pas structure vasculaire ou lymphatique

Diffusion et convection, du point de vue mécanique, essentielles pour la nutrition des cellules, l'élimination des déchets et la transformation de la matrice

Cartilage

- Tissu ferme, légèrement dépressible, élastique, surface excessivement lisse
- 75% d'eau : fibres collagène, gel de protéoglycanes hydrophiles (protéine), de chondrocytes (responsables synthèse de la matrice)
- 2 rôles
 - fonction dynamique (+ liq synovial) = \searrow Forces de friction
 - fonction statique = transmission, répartition pressions & amortissement contraintes

19

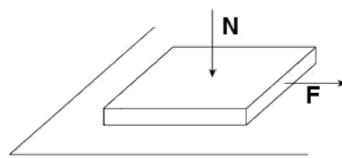


N_c
 F_c
 S
 F.S.
 Molécule de protéoglycane
 F.R.
 Chondrocyte
 nc

N_c : force de compression
 F_c : force de tension superficielle

S : Surface externe de glissement du cartilage
 F.S : Fibres collagènes de surface, orientées tangentiellement à cette surface
 F.R : Fibres radiales formant l'armature fibrillaire collagène dont l'orientation est perpendiculaire à la surface
 F_{cp} : Force de compression
 F_{ts} : Force de tension superficielle.

Cartilage



Coef de frottement = F_c/N_c

Le cartilage glisse 10 à 100 fois + facilement que l'acier sur le nylon

pneu / route sèche	1 (<i>élevé</i>)
plastique/ plastique	0,1 (<i>bon</i>)
cartilage/ cartilage	entre 0,003 et 0,01 (<i>très bon</i>)

20

Cartilage

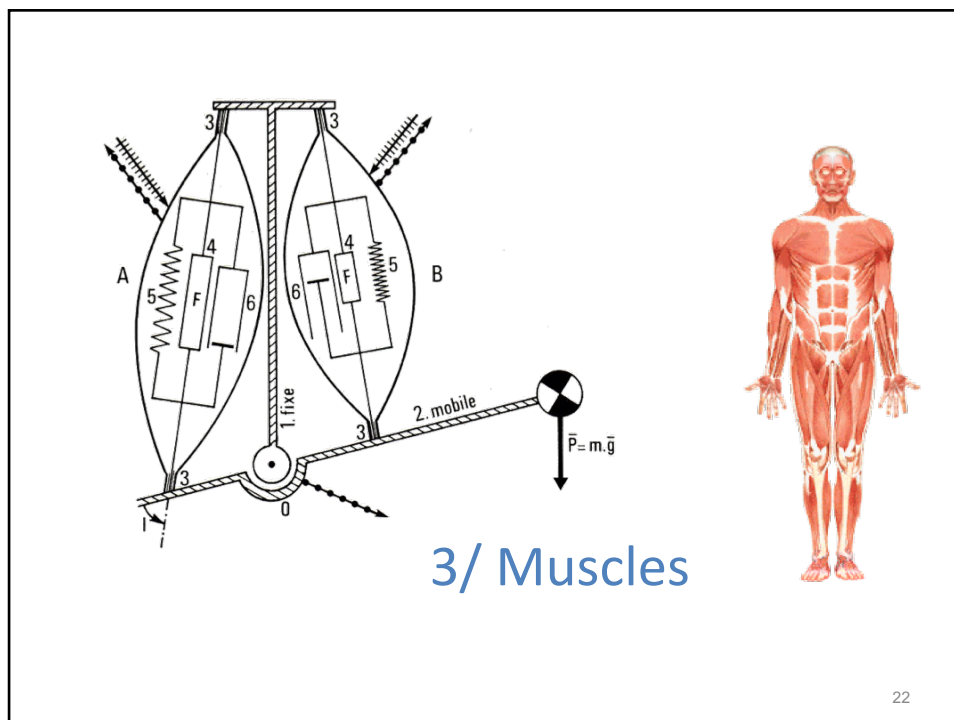
- Contraintes d'écrasement se transforment en NRJ de rotation
- Présente une élasticité (amortissement), solidité et auto nutrition dues à sa structure moléculaire

Cartilage permet le mvt
= "autonomie motrice de l'être vivant"
(au même titre que "l'autonomie métabolique et mentale")

Défaut : Faible capacité de régénération en cas de lésions

Avantage : l'action → le nourrit

21



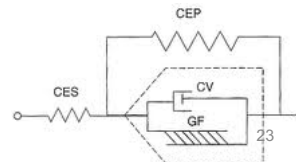
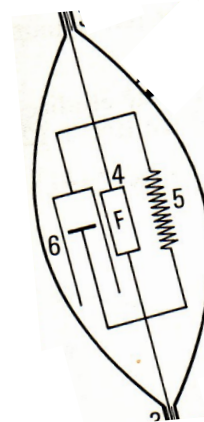
Muscles

• Propriétés (non également réparties)

- Définition?**
- Excitabilité
 - Contractilité
 - Élasticité
 - Tonicité

Modèle musculaire :

- (5) Composante élastique passive
Tissu conjonctif du corps musculaire
- (4) Composante contractile
Fibres musculaires contractiles génératrice de F
- (6) Composante visqueuse
Transfert liquidien du muscle = amortisseur visqueux



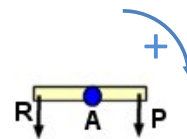
Muscles

- Formes
Fusifforme / penné / segmenté / large
- Section physiologique $\rightarrow F_{\max}$
– Définition
- W dans 3 types de leviers
– Cf. Définition suite



LES LEVIERS (Rappel)

Déf. : Barre rigide mobile autour d'un axe et soumis à 2 forces qui tendent à le faire tourner en sens opposé



Légende LEVIER

A = Axe de rotation, point d'appui

R = Résistance (antagonistes, adversaire, pesanteur...)

P = Puissance musculaire (force M)

25

Accéder à mes présentations,
PDF, polycop, liens...

Flasher le QR code puis suivre menu et

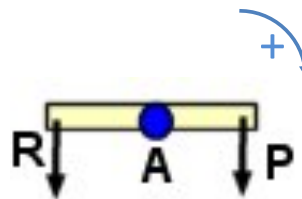


DISPONIBLE
BIENTOT

<http://calamar.univ-ag.fr/uag/staps/cours/covidCH/>

LES LEVIERS (Rappel)

Déf. : Barre rigide mobile autour d'un axe et soumis à 2 forces qui tendent à le faire tourner en sens opposé



Légende

A = Axe de rotation, point d'appui

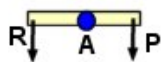
R = Résistance (antagonistes, adversaire, pesanteur...)

P = Puissance musculaire (force M)

27

LES LEVIERS

Inter Appui



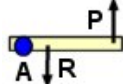
Ex. mécaniques



Ex. anatomiques



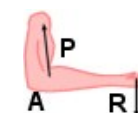
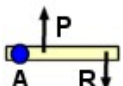
Inter Résista



Quels leviers privilégient la F musculaire ?



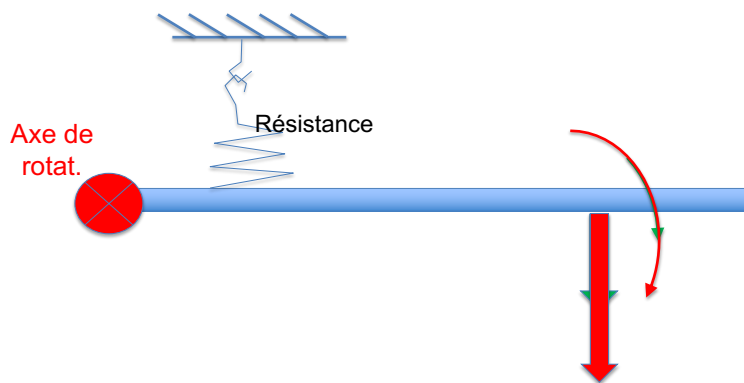
Inter Puissar



28

LES LEVIERS

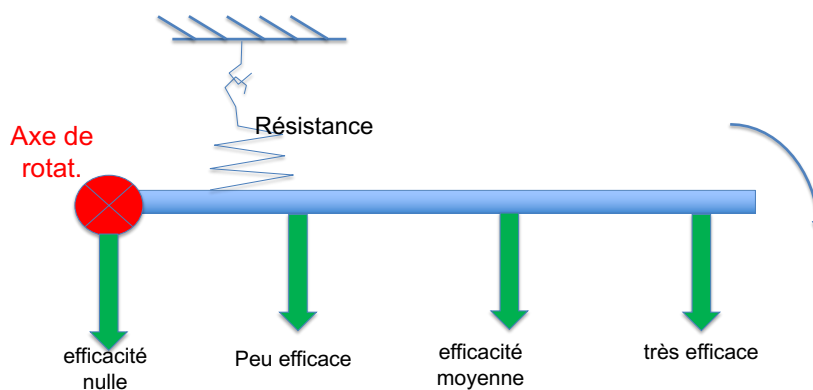
- l'efficacité de la force dépend de son intensité
- + l'intensité est grande plus l'efficacité dans la rotation est grande... mais pas que



29

LES LEVIERS

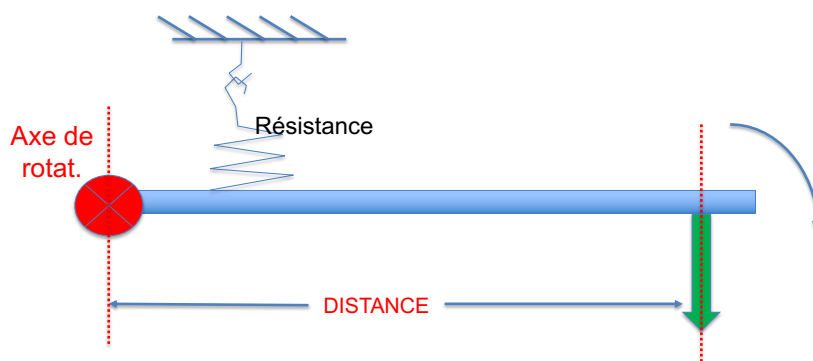
- L'efficacité de la force à faire tourner 1 levier est représentée par son Moment de force



30

LES LEVIERS

- Pour une même intensité, l'efficacité de la force dépend de la distance à l'axe (+ elle est grande plus l'efficacité est grande)



31

LES LEVIERS

- Une force fait tourner un levier
- Notion de Moment de force (N.m) : produit de l'intensité de la force par son bras de levier

$$M_F = F \times d_f$$

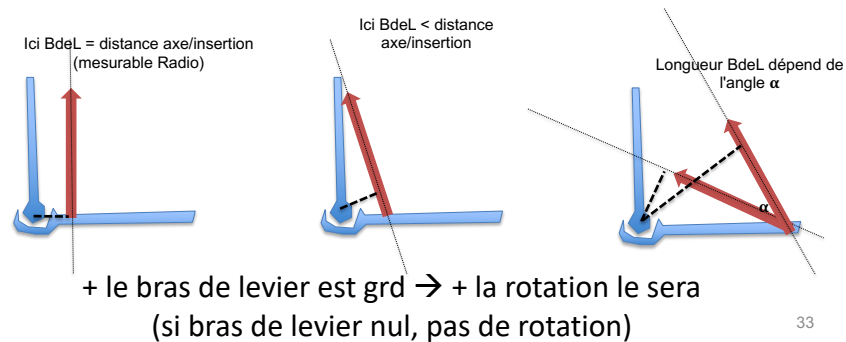
F : intensité (N), d_f : bras de levier (m)

Moment d'une force représente son efficacité à générer une rotation (il peut être nul si $d_f=0$)

32

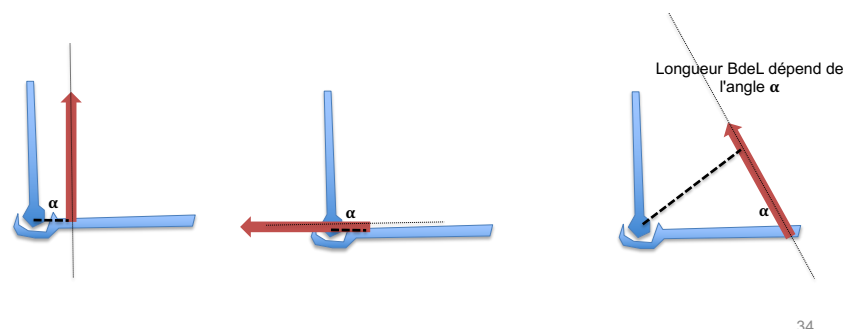
LES LEVIERS

- Notion de bras de levier : distance la + courte entre axe et direction de la force, c-à-d : la perpendiculaire abaissée de l'axe sur la direction de la force.



LES LEVIERS

- Si $\alpha = 90^\circ$ alors bras de levier = distance (axe-insertion) x1
- Si $\alpha = 0^\circ$ alors bras de levier = distance (axe-insertion) x0
- Si $\alpha < 90^\circ$ alors bras de levier = distance (axe-insertion) xX?

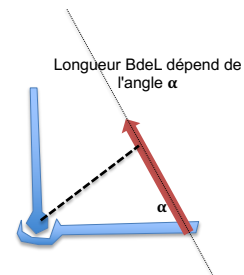
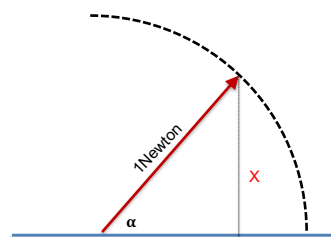


LES LEVIERS

- Si $\alpha = 90^\circ$ alors bras de levier = distance (axe-insertion) $\times 1$
- Si $\alpha = 0^\circ$ alors bras de levier = distance (axe-insertion) $\times 0$
- Si $\alpha < 90^\circ$ alors bras de levier = distance (axe-insertion) $\times X$?

Quelle est la valeur de X ?

Pour qu'il ne dépende que de l'angle et pas de la Force ou s'intéresse au rapport X/F

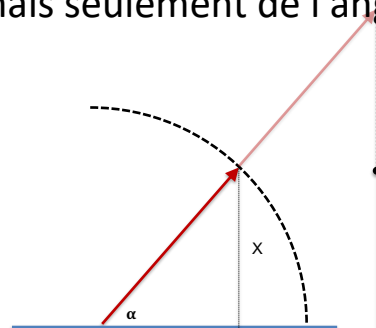


Longueur BdeL dépend de l'angle α

35

Comment connaître la valeur X

- A chaque fois que la force double, X double...
- On divise X par la force pour avoir un indice qui ne dépend pas de l'intensité de la force mais seulement de l'angle

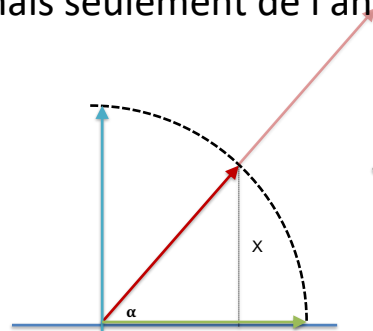


$$\begin{aligned} \text{En effet} \\ 2X/2F \\ = \\ X/F \end{aligned}$$

36

Comment connaître la valeur X

- A chaque fois que la force double, X double...
- On divise X par la force pour avoir un indice qui ne dépende pas de l'intensité de la force mais seulement de l'angle



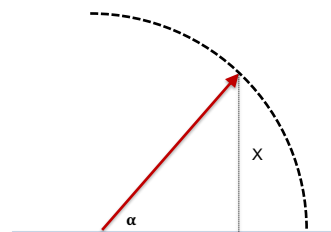
Si angle = 0°
Alors X = 0

Si angle = 90°
Alors X se confond a force

37

Comment connaître la valeur X

- A chaque fois que la force double, X double...
- On divise X par la force pour avoir un indice qui ne dépende pas de l'intensité de la force mais seulement de l'angle



Par convention on appel
le rapport :

- coté op/hypo = $\sin \alpha$
- coté adj/hypo = $\cos \alpha$

38

LES LEVIERS

Moment de F : $M_F = Fx B d L$

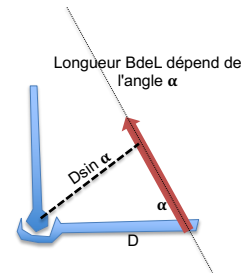
ou

$$M_F = F x D x \sin \alpha$$

Remarque on a bien

si $\alpha = 90^\circ$ $\sin \alpha = 1 \rightarrow M_F = F x d$

si $\alpha = 0^\circ$ $\sin \alpha = 0 \rightarrow M_F = 0$



39

Liste des rapports les + courants

angle	0°	30°	45°	60°	90°
cote op/hypo	0	1	2	3	4
cote adj/hypo	4	3	2	1	0

angle	0°	30°	45°	60°	90°
cote op/hypo	$\sqrt{0}$	$\sqrt{1}$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{4}$
cote adj/hypo	$\sqrt{4}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{1}$	$\sqrt{0}$

angle	0°	30°	45°	60°	90°
cote op/hypo	$\sqrt{0/2}$	$\sqrt{1/2}$	$\sqrt{2/2}$	$\sqrt{3/2}$	$\sqrt{4/2}$
cote adj/hypo	$\sqrt{4/2}$	$\sqrt{3/2}$	$\sqrt{2/2}$	$\sqrt{1/2}$	$\sqrt{0/2}$

angle	0°	30°	45°	60°	90°
$\sin \alpha$	0	$1/2$	$\sqrt{2/2}$	$\sqrt{3/2}$	1
$\cos \alpha$	1	$\sqrt{3/2}$	$\sqrt{2/2}$	$1/2$	0

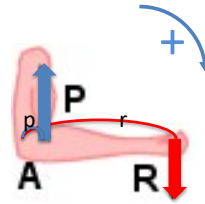
$$\sqrt{2} = 1,414 \text{ et } \sqrt{3} = 1,732$$

40

LES LEVIERS

A l'équilibre pas de rotation donc la somme de moment est nulle :

- $\Sigma M=0$
- $M_p+M_R=0$
- $(-Pp)+(Rr)=0$
- $Pp=Rr$
- $P=r/p R$



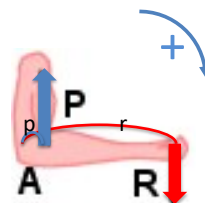
Si $R = 10\text{kg}$ a 30cm et P est à 2cm alors P doit développer à l'équilibre:
 $P = 0,3/0,02 \times 100 = 1500\text{N}$ (soit 150 kiloforce)

41

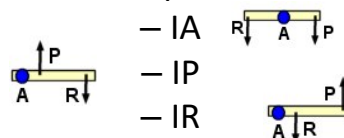
LES LEVIERS

A l'équilibre pas de rotation donc la somme de moment est nulle :

- $\Sigma M=0$
- $M_p+M_R=0$
- $(-Pp)+(Rr)=0$
- $Pp=Rr$
- $P=r/p R$



Comment est r/p selon le levier?



42

LES LEVIERS

- Quels leviers sont les plus fréquents dans l'appareil locom.?
- Quelles formes de muscles = plus fréquents dans l'ap. locom.?

Fusiforme Vs penné

Réflexion sur l'assoc. ≠ leviers
& ≠ formes des muscles

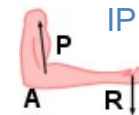
→ W de TD



IA



IR

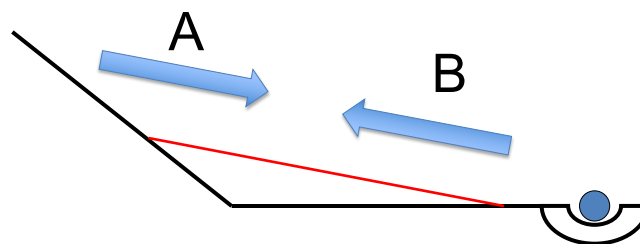


IP

43

Rappel

Muscles



Quelle est l'action d'un muscle ?

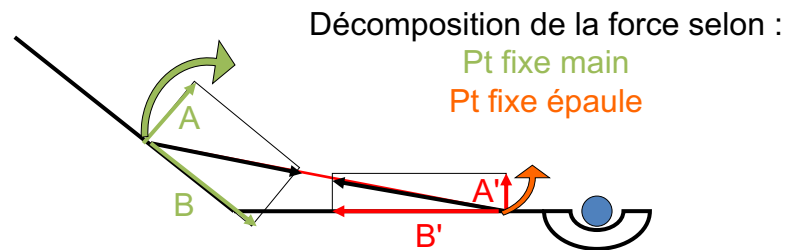
- A
- B
- les 2

44

Importance du point fixe

Exemple du muscle Brachio Radial

(old. Huméro Stylo Radial)

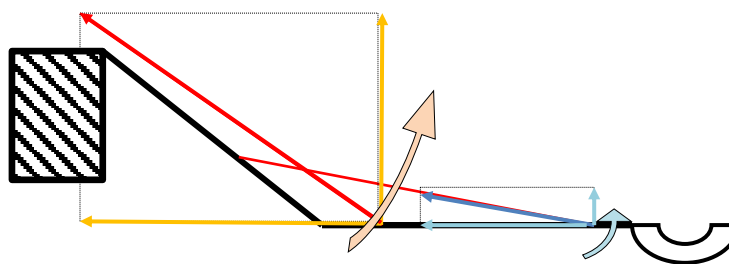


A ou A' : Composante de rotation ++
Utilité de l'autre composante B =
SECURITE / STABILISATION

45

Importance du point fixe dans l'action des muscles

point fixe =
Epaule



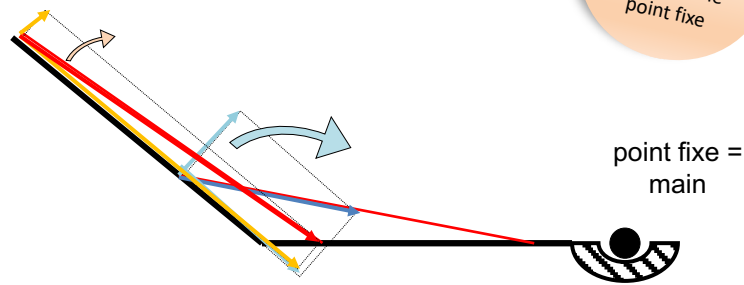
Décomposition de la force :

- Biceps (mvt +, stabilisateur +)
- Brachio radial (stabilisateur +, mvt -)

46

Importance du point fixe dans l'action des muscles

L'implication des muscles varie avec le point fixe



Décomposition de la force :

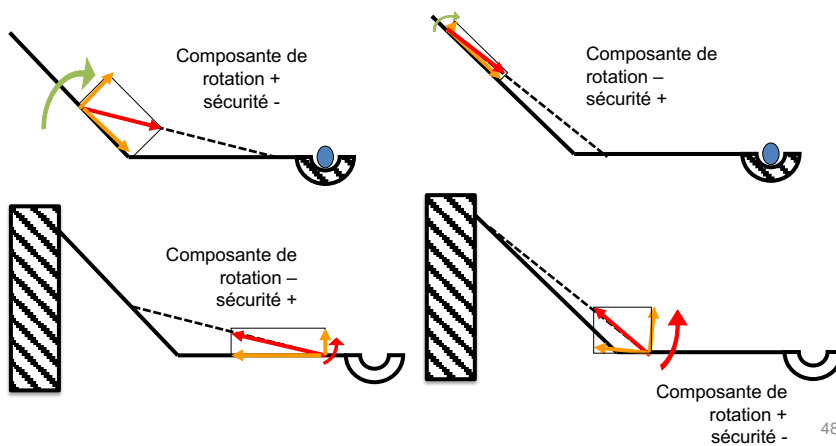
- Biceps (mvt -, stabilisateur +)
- Brachio radial (mvt +, stabilisateur +)

47

Actions simultanée & complémentaire de 2 fléchisseurs du coude

Brachio-radial

Biceps brachial



48

Importance de l'angle de l' X° dans l'action des muscles - Décomposition de la force au cours du mvt

Fin du mvt :

- Stab++ Biceps
- Rot++ Brachio radial

Début de mvt

- Stab++ Brachio Rad
- Rot++ Biceps

49

Comment fonctionne 1 articulation

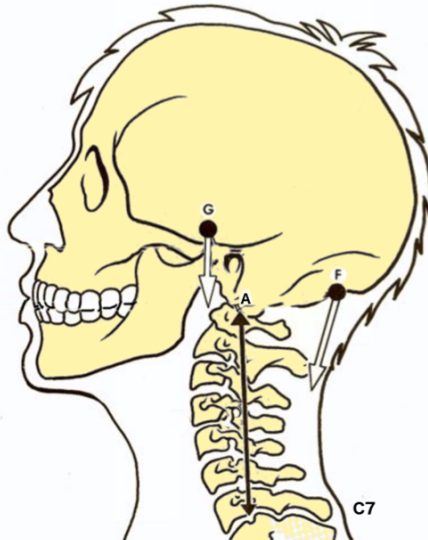
Muscles Solutions biologiques

?

- Svt 2 muscles pour le même W
- Au minimum, 1 muscle a toujours un bras de levier efficace
- Le 2^e muscle W pour la sécurité de l' X° en la "plaquant"

50

Muscles Solutions biologiques



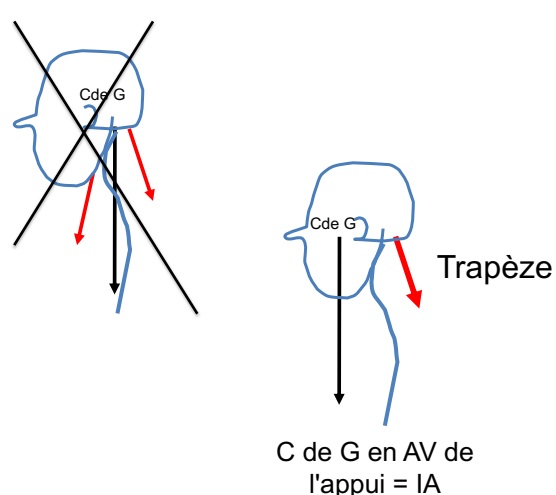
Comment faire tenir la tête?

Où est le CdeG?

C7

51

Muscles Solutions biologiques



L'Efficacité vient de l'économie

Trapèze

C de G en AV de l'appui = IA

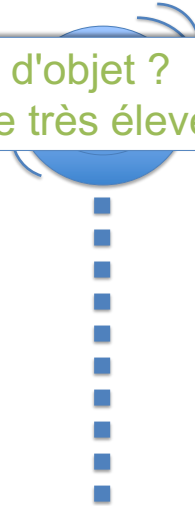
52

Muscles Solutions biologiques

Comment faire tenir une pile d'objet ?
Comment faire tenir qq chose de très élevé?

la colonne vertébrale
(tige d'el^t empilés,
flexible, longue)

?



53

Muscles Solutions biologiques

Comment faire tenir une pile d'objet ?
Comment faire tenir qq chose de très élevé?



54

Muscles Solutions biologiques

Comment faire tenir
la colonne vertébrale
(longue tige flexible)



Haubanage
(augmentation bras de levier)

Serrage

55

Accéder à mes présentations,
PDF, polycop, liens...

Flasher le QR code puis suivre menu et



DISPONIBLE a
partir du 10oct

<http://calamar.univ-ag.fr/uag/staps/cours/covidCH/>

Muscles

TD

Q1/ Quels leviers sont les plus fréquents dans l'appareil locom.?

R1/ IP = InterPuissant

Q2/ Quels formes de muscles = plus fréquents dans l'ap. locom.?

Fusiforme Vs penné

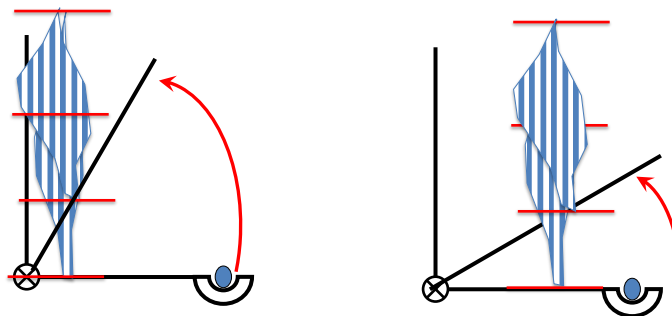
Réflexion sur l'assoc. ≠ leviers
& ≠ formes des muscles

Tableau noir

TD

R1

IP = petit Bde levier mais cela a-t'il un avantage?



Conclusion petit Bde levier mais MVT++

TD

Muscles

- Leviers IP désavantage la puissance mais MVT ++
(Leviers IR avantage la puissance mais MVT +-)

muscles fusiformes
vs
muscles pennés ?

TD

R2

Rappel : F_{\max} dépend de section physiologique = Environ $50\text{N}/\text{cm}^2$



La section physiologique coupe l'ensemble des fibres muscul^R de façon perpendiculaire



Conclusion

Pour 1 même volume, M. pennés plus fort

61

Relation Newton vs Kilogramme

Rappel : 1^e loi de Newton

- $F=ma$

Force (N)

=

Masse (kg)

X

Accélération (m/s^2)

- $P=mg$

Poids (force en N)

=

Masse (qtte de matière en kg)

X

g (attraction terrestre $9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)

62

Tableau noir

Or dans l'app. Locomoteur
nbre M fusiformes > nbre M pénés

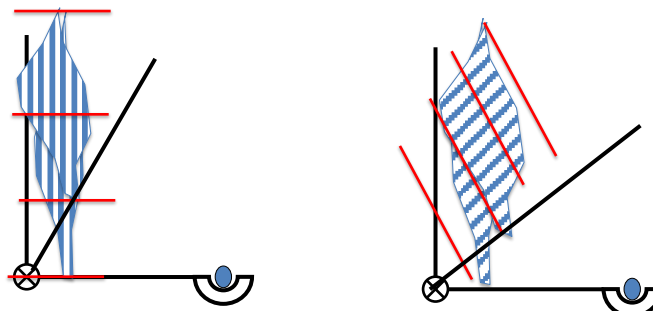
Encore une fois la solution
biologique ne favorise pas la force
& la puissance ...

64

TD

R2

Rappel : 1 muscle se contracte d'1/3 de la longueur tot (1/2 de son corps charnu)
"dans le sens des fibres"



Conclusion Avantage au déplacement

65

TD

Muscles

- Muscle fusiforme désavantagé (F_{\max}^-)
- Muscle penné avantage (F_{\max}^+)
- Leviers IP désavantage la puissance
- Leviers IR avantage la puissance

MAIS

**Appareil locomoteur svt muscles fusiformes
travaillant à la manière d'un levier IP.**

Les solutions biologiques favorisent
tjrs **Mvt & amplitude** face à **force &
puissance**

la fonction 1^{ière} de l'appareil
locomoteur est donc le **MVT**

67

Tous les muscles ne sont pas dédiés au mvt

Muscles
du déplacement VS **Muscles**
du maintien

Quelles différences ?

Quelles similitudes?

68

Muscles	du déplacement	du maintien
FORME	Travail étudiants sous forme TD	
OÙ		
ENTRAÎNE		
TYPOLOGIE		
LEVIER		

Muscles	du déplacement	du maintien
FORME	Longs, fins, fusiformes. fibres = direction muscle → déplacement	Courts plats compacts svt penné. fibres ≠ direction muscle → force
OÙ	Extrémités, squelet distal = membres	Squelet proximal, tronc, gout. vertébrale, (fessiers, abdo) posture
ENTRAÎNE	Contractions dynamiques : efforts max. à vit ++	Efforts sous max. de longue durée, nombreuses répétitions
TYPOLOGIE	F élastiques, peu toniq. fort ^t et rapidem ^t contractile, mais fatigable F blanches (FT) rapides	F peu élastiques, très toniques. G ^{de} résistance à la fatigue F. rouges (ST) lentes
LEVIER	ds IP privilégient vitesse & déplacem ^t à force	ds IA & IR privilégient force à vitesse & déplacement

TD

Membres SUP
VS
Membres INF

Quelles différences ?

Quelles similitudes?

71

TD

Membres SUP
VS
Membres INF

Quelles différences ?

Quelles similitudes?

72