

CINEMATIQUE DU CORPS HUMAIN

En biomécanique, nous utilisons généralement trois plans imaginaires liés au corps humain et orientés perpendiculairement les uns aux autres. Ce sont les plans anatomiques du corps humain, le **plan sagittal** (de profil), le **plan frontal** (de face) et le **plan horizontal** (axial).

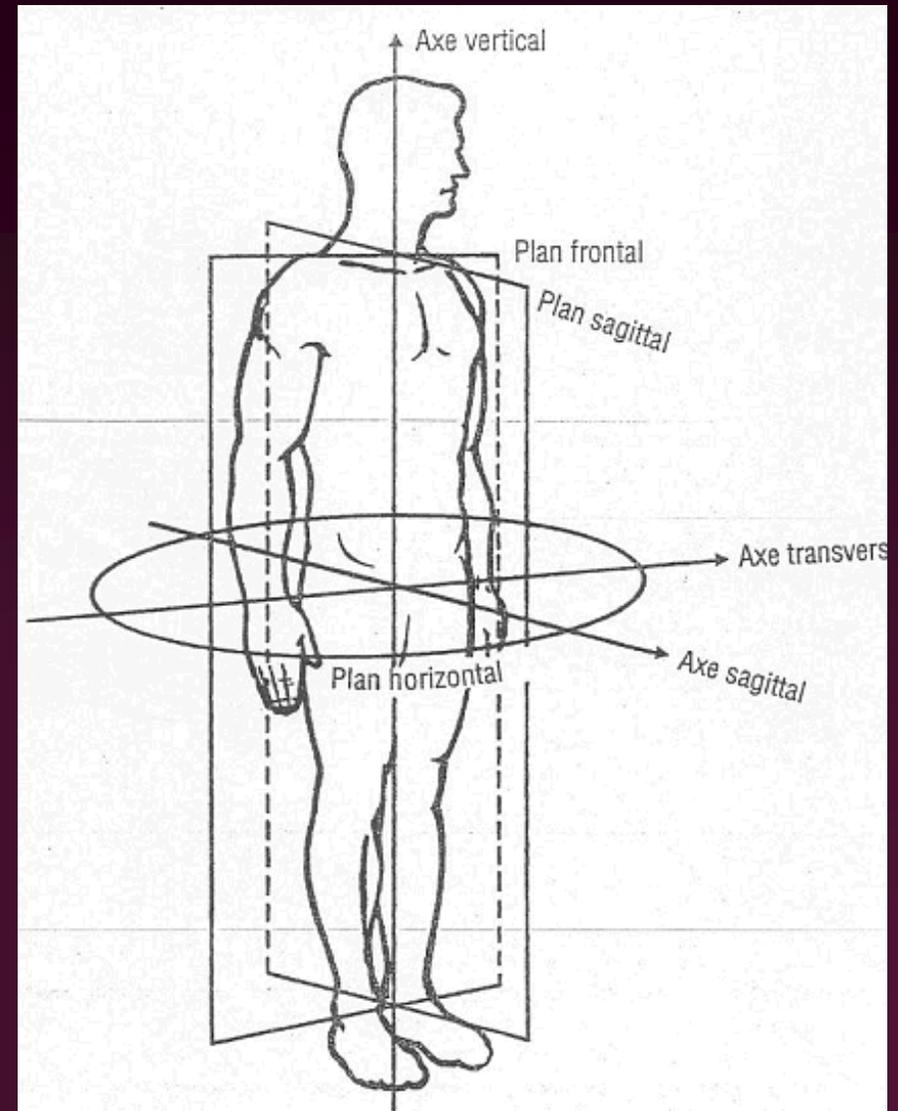


Figure: Plans et axes de rotation du corps humain

Axes du corps

- **Axe vertical (longitudinal)**

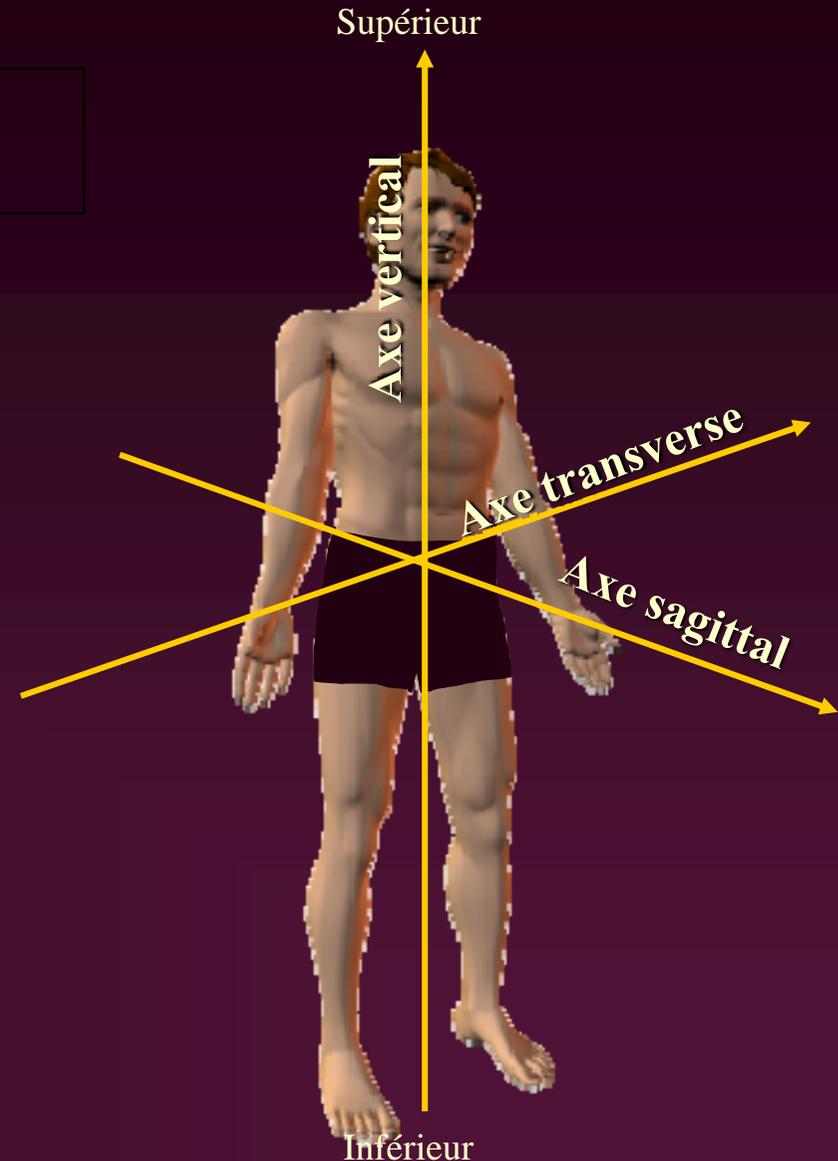
Parcours le corps de bas en haut, i.e. en direction inféro-supérieure.

- **Axe transverse (médio-latéral)**

Parcours le corps de gauche à droite, i.e. en direction médio-latérale.

- **Axe sagittal (antéro-postérieur)**

Parcours le corps de l'arrière vers l'avant, i.e. en direction postéro-antérieure.



Plans et axes du corps

- **Axe longitudinal (vertical)**
- **Axe médio-latéral (transverse)**
- **Axe antéro-postérieur (sagittal)**

- **Plan frontal**

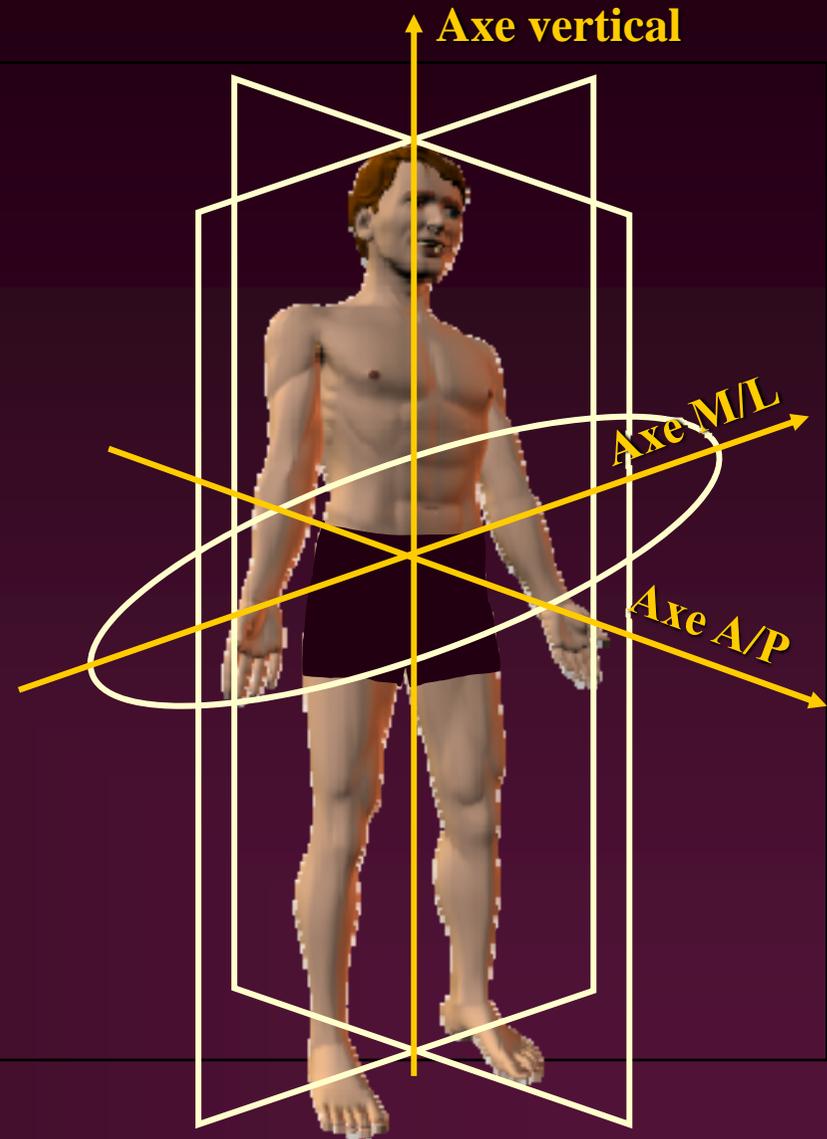
$\text{Axe}_{\text{M/L}} + \text{Axe}_{\text{vertical}}$

- **Plan horizontal**

$\text{Axe}_{\text{A/P}} + \text{Axe}_{\text{M/L}}$

- **Plan sagittal**

$\text{Axe}_{\text{A/P}} + \text{Axe}_{\text{vertical}}$



Plans du corps

Pour définir un plan, on doit d'abord connaître les 2 axes corporels qui le compose.

- **Plan frontal**

Axe_{M/L} + Axe_{vertical}



Plans du corps

- Plan sagittal

$\text{Axe}_{A/P} + \text{Axe}_{\text{vertical}}$



- Plan horizontal

$\text{Axe}_{A/P} + \text{Axe}_{M/L}$



Mouvements articulaires

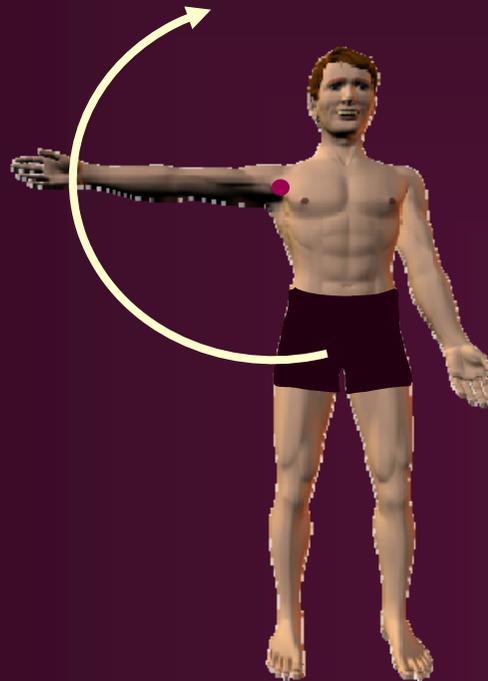
Flexion / Extension

- Plan sagittal
- Axe transverse



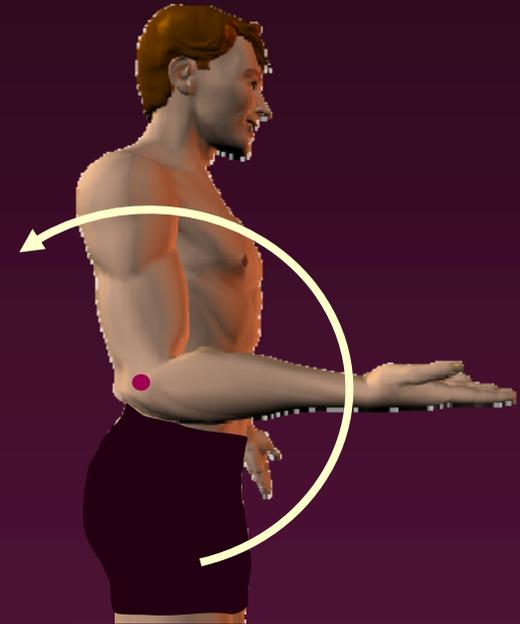
Rotation

- Plan horizontal
- Axe vertical



Abduction / Adduction

- Plan frontal
- Axe sagittal



Exemple du coup franc au football: Le mouvement de la jambe droite s'effectue principalement dans le **plan sagittal**.

Exemple du swing au golf: Le mouvement des membres supérieurs s'effectue essentiellement dans le **plan frontal**.



Figure: Coup franc au football.

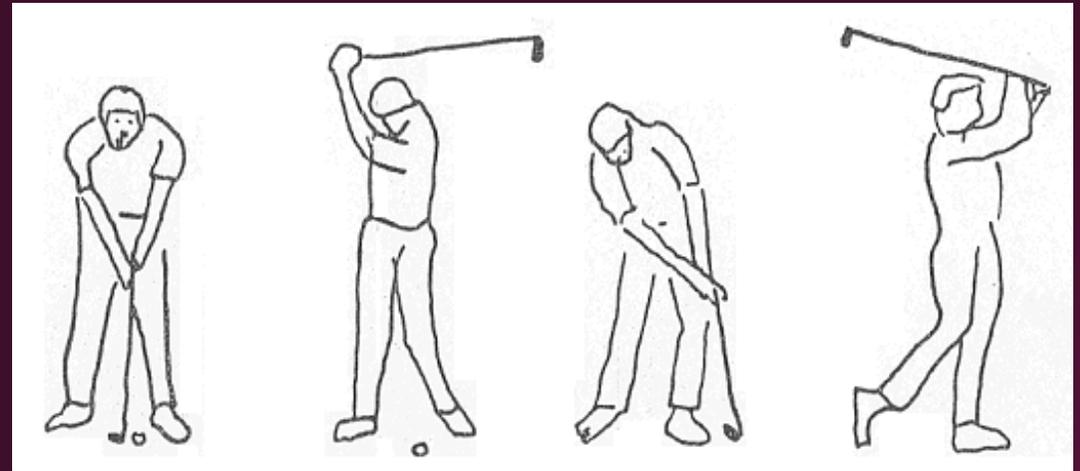
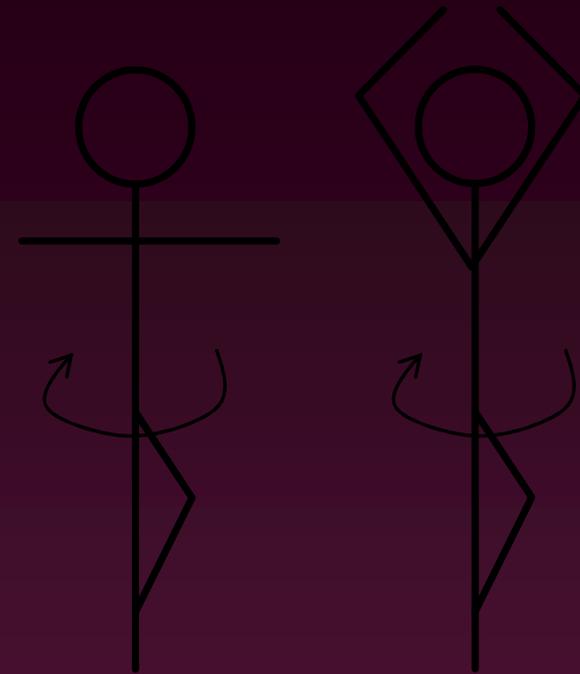
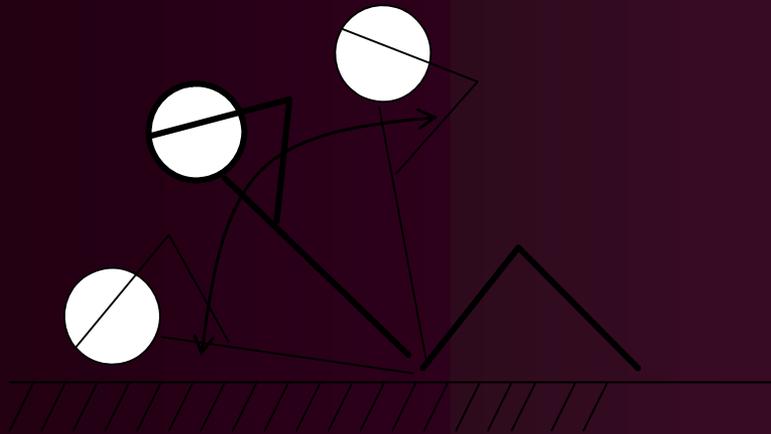


Figure: Swing au golf

Les flexions abdominales
s'effectuent dans un *plan
sagittal*



Mouvement dans un
plan horizontal
mais aussi
rotation autour de
l'axe vertical

Mais la plupart des déplacements se font en 3D, lors du lancer de la balle au base-ball par exemple.

Le mouvement de la balle est souvent assimilé au déplacement d'un point matériel. Cette approximation est généralement valable, sauf si l'on cherche à étudier plus finement les déplacements complexes.

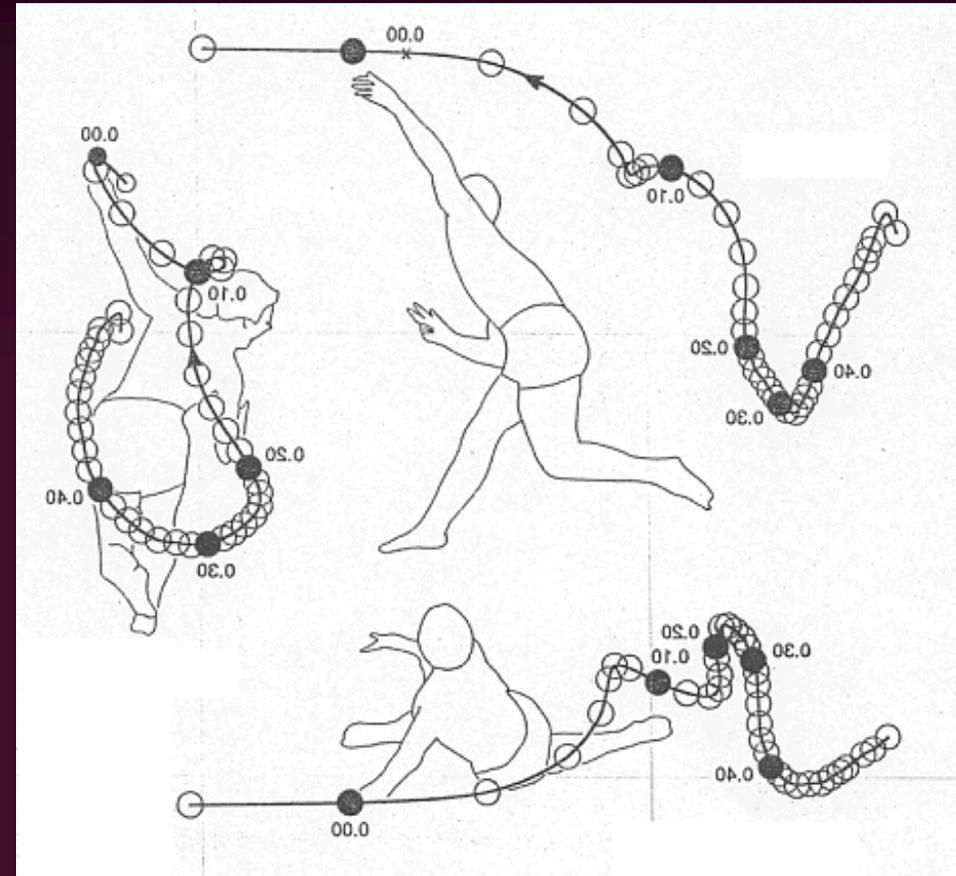


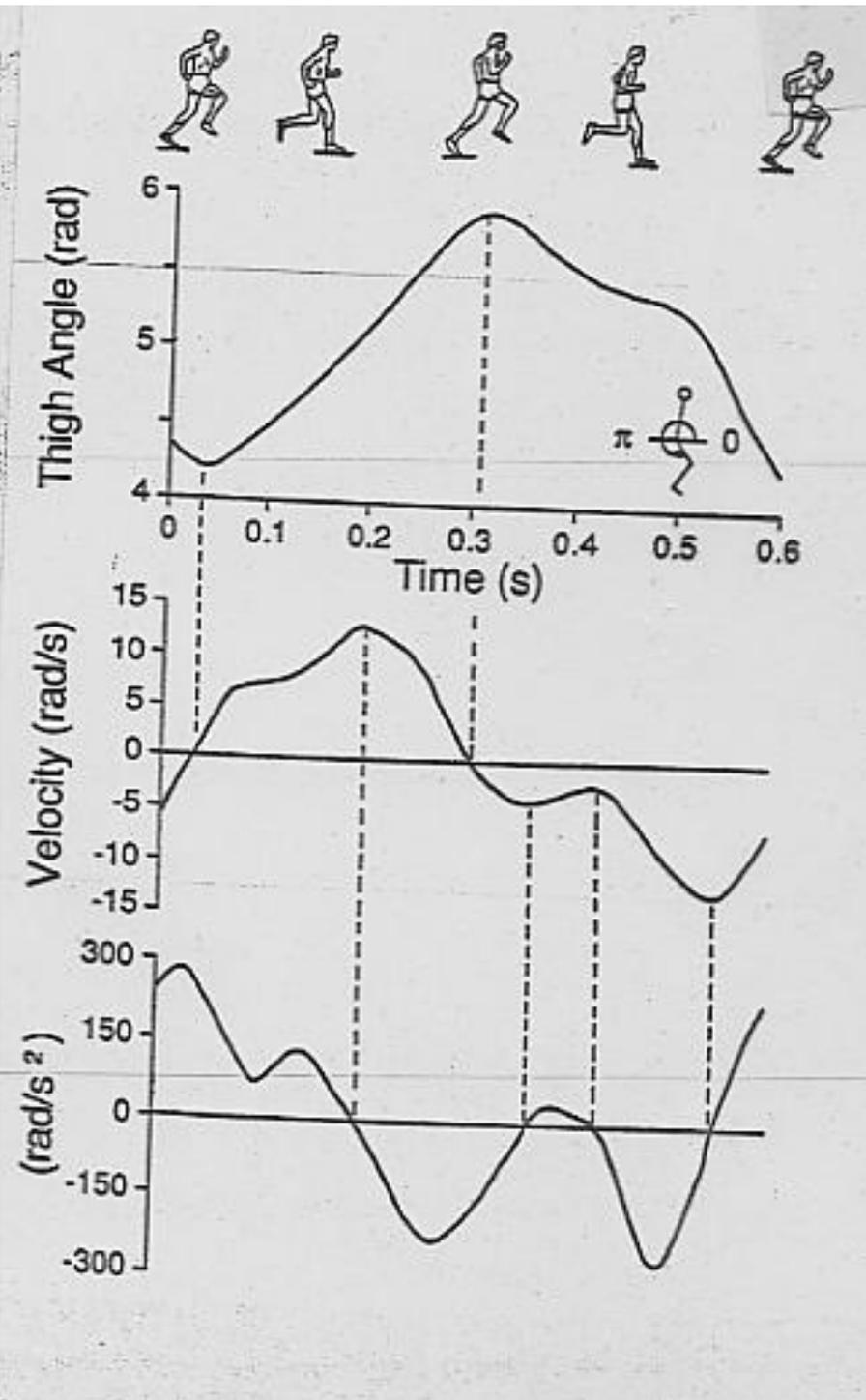
Figure: Enoka p21, lancer de la balle au base-ball

Les différents mouvements

- On peut définir:
 - Les **mouvements de translation**
 - Les **mouvements de rotation**
 - Les **mouvements combinés** (rotation + translation)

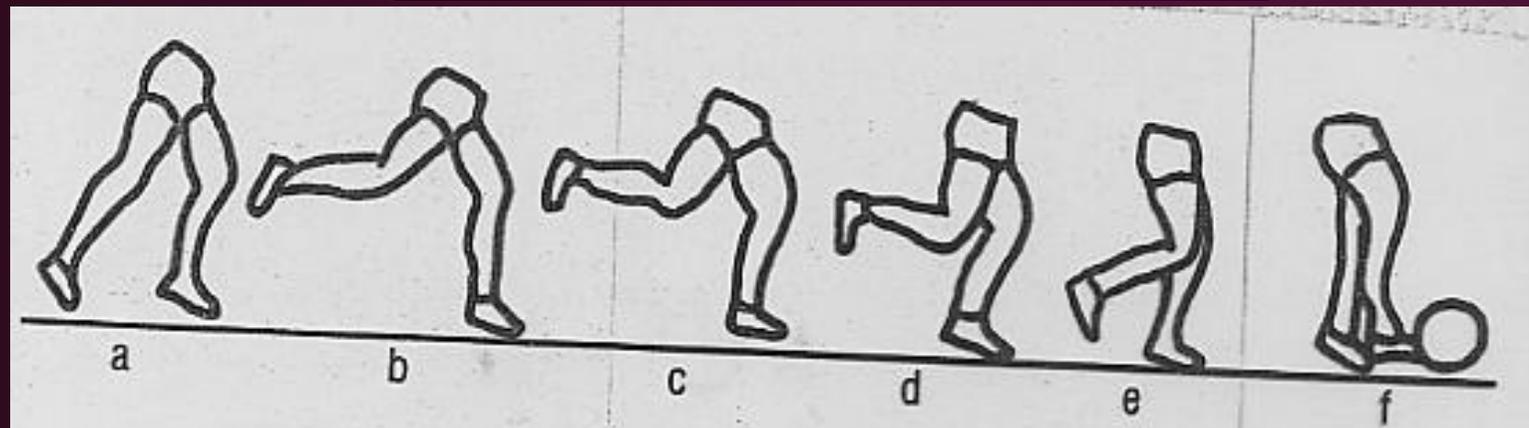
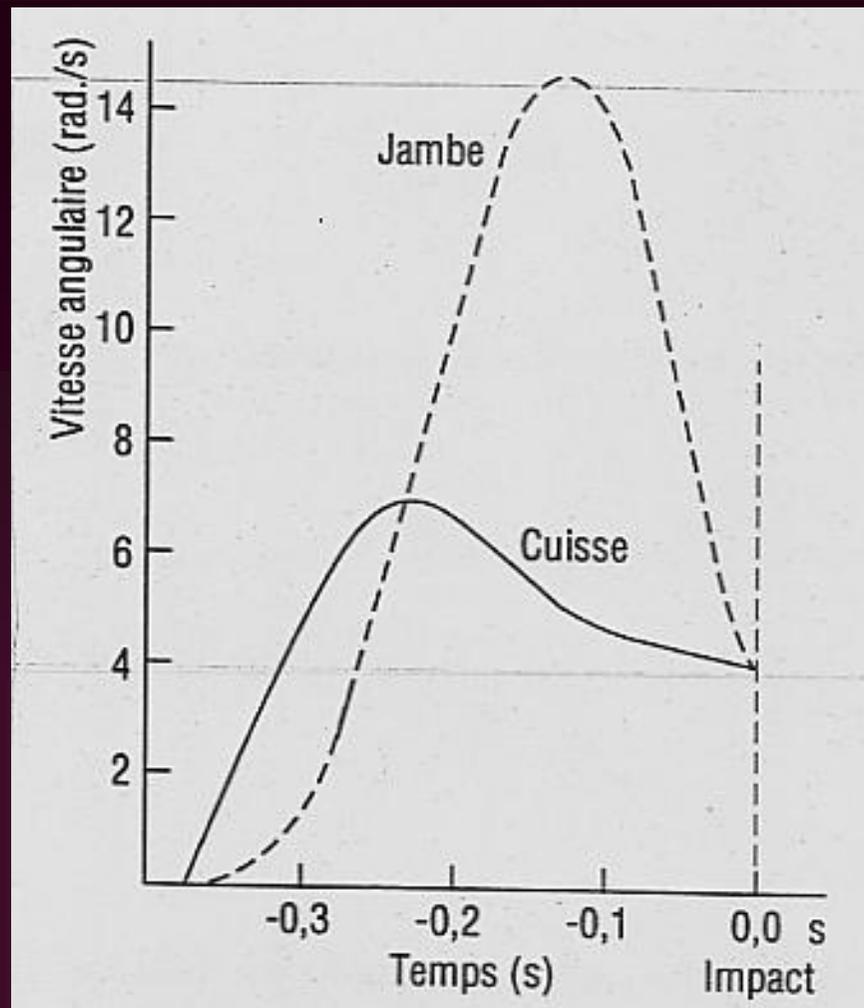
Mouvement circulaire

Exemple: position, vitesse et accélération angulaire de la cuisse au cours d'un cycle de course



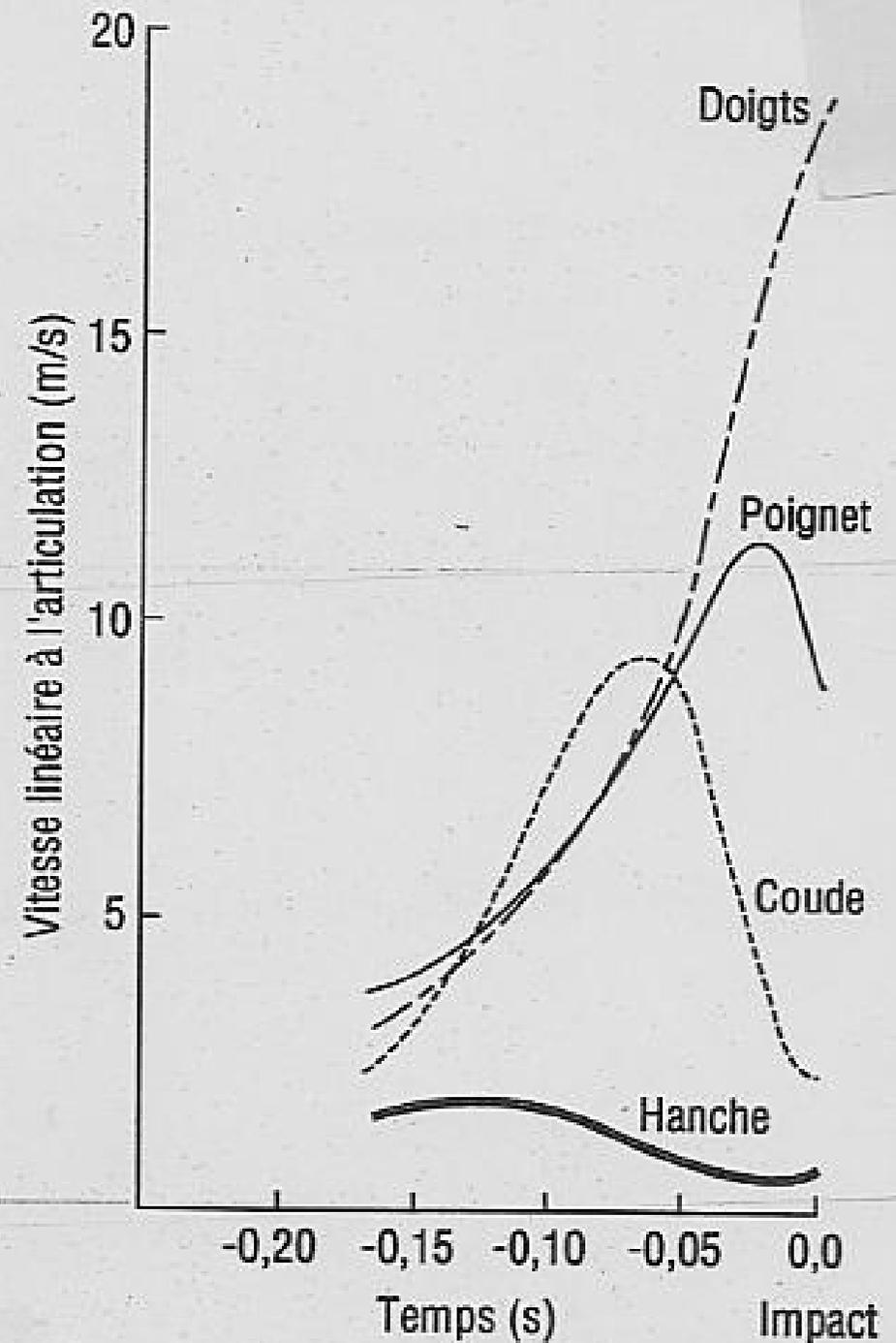
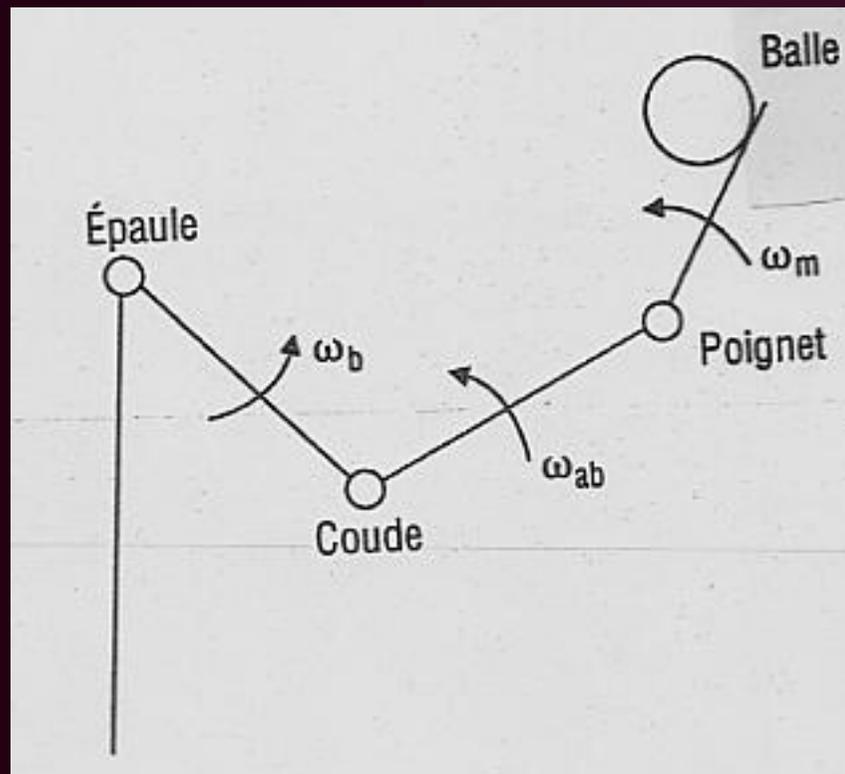
Mouvement circulaire

Vitesse angulaire de la cuisse et de la jambe lors d'un coup franc



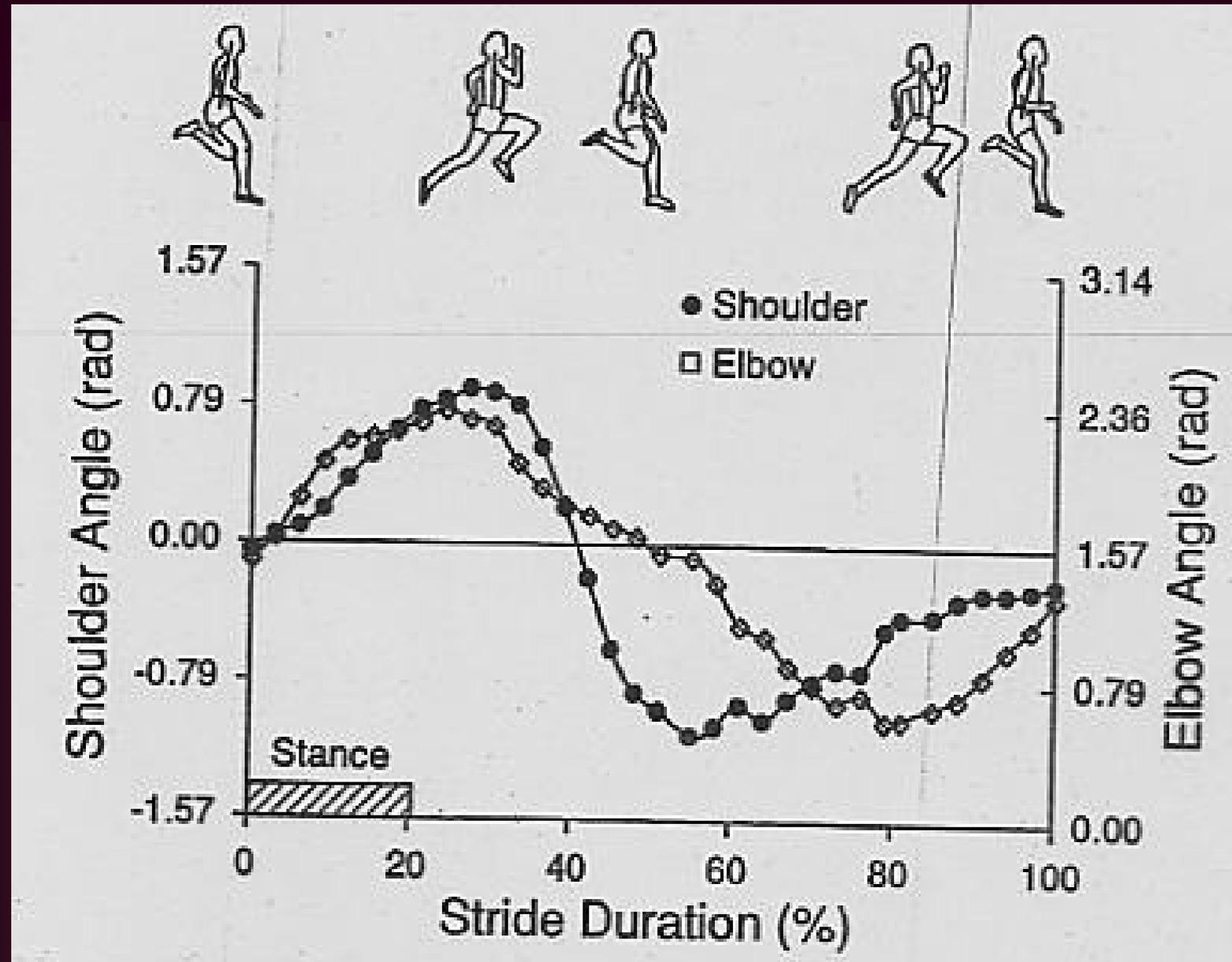
Mouvement circulaire

Vitesse angulaire et linéaire
lors d'un tir en hand-ball



Mouvement circulaire

Angle du **bras** et de **l'avant-bras** par rapport à la verticale



Mouvement circulaire

Modélisation du **membre inférieur** pour l'étude de la marche, de la course, ...

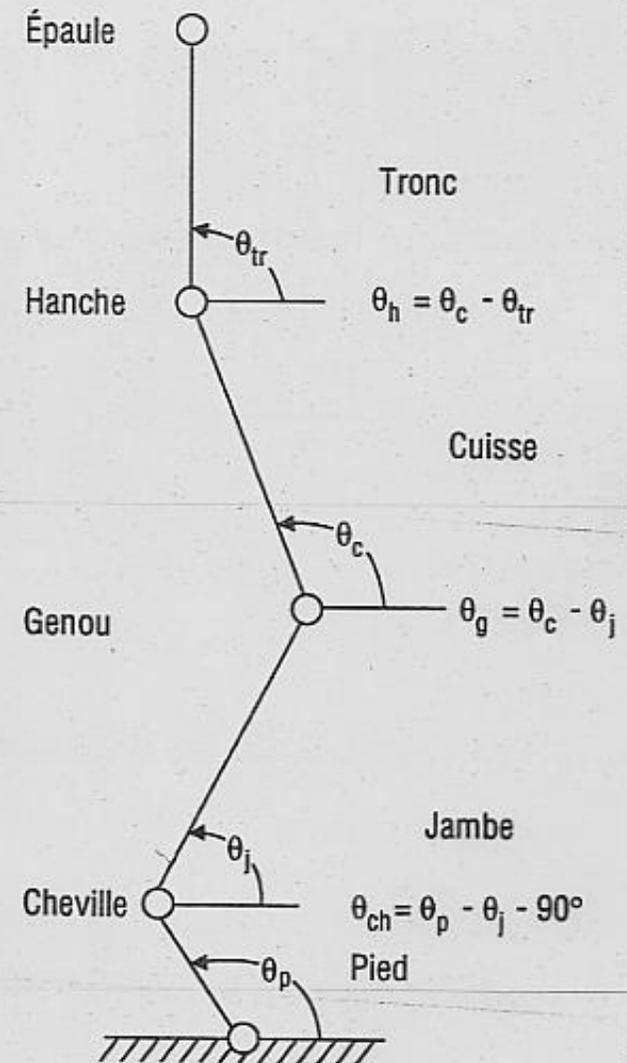
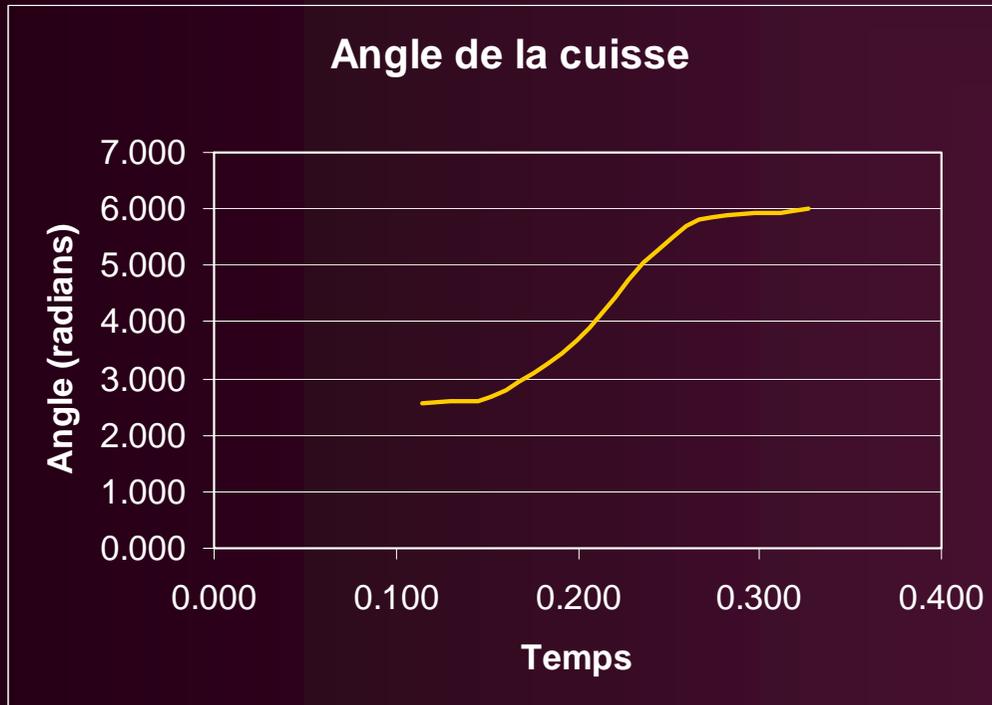


Figure 7.12

Angle articulaire de la hanche θ_h , du genou θ_g et de la cheville θ_{ch} . D'après Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Wiley-Interscience Publication, New York, N. Y.

Mouvement circulaire

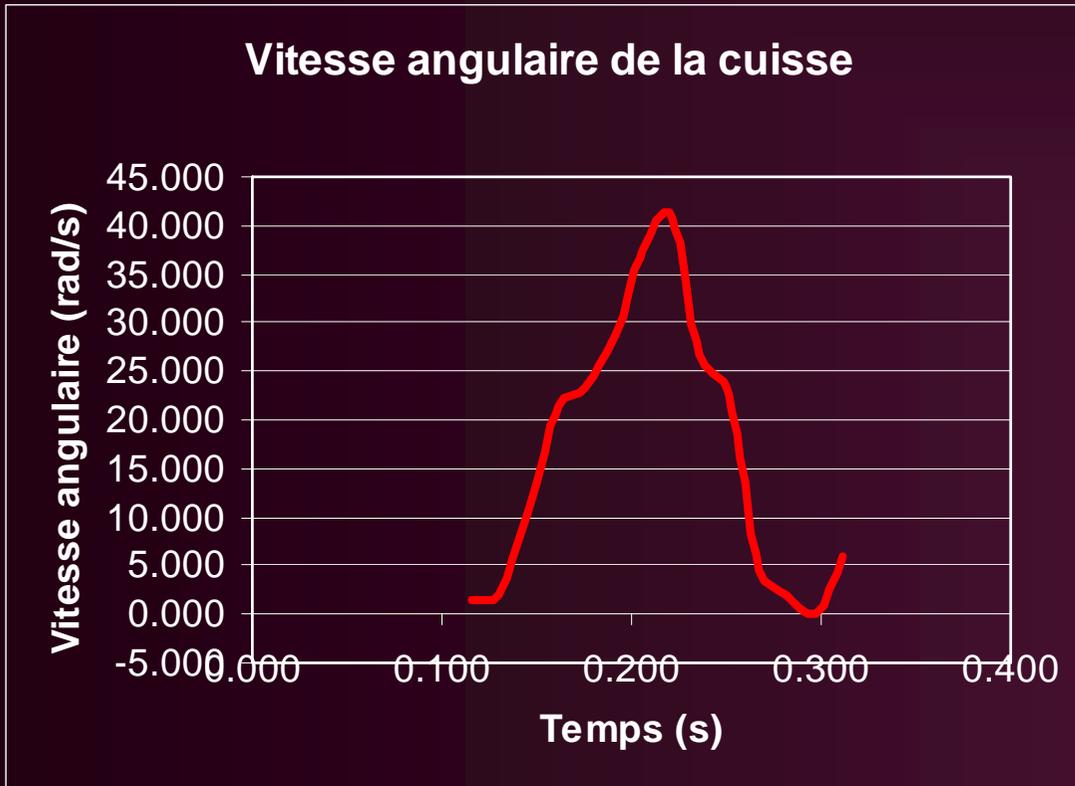
Position angulaire de la **cuisse**
par rapport à l'horizontale
durant un coup de pied



| Temps (s) | Angle (rad) |
|-----------|-------------|
| 0.115 | 2.570 |
| 0.130 | 2.590 |
| 0.145 | 2.620 |
| 0.161 | 2.790 |
| 0.176 | 3.110 |
| 0.191 | 3.460 |
| 0.206 | 3.890 |
| 0.221 | 4.450 |
| 0.236 | 5.060 |
| 0.252 | 5.490 |
| 0.267 | 5.830 |
| 0.282 | 5.900 |
| 0.297 | 5.930 |
| 0.312 | 5.930 |
| 0.327 | 6.020 |

Mouvement circulaire

Vitesse angulaire de la cuisse

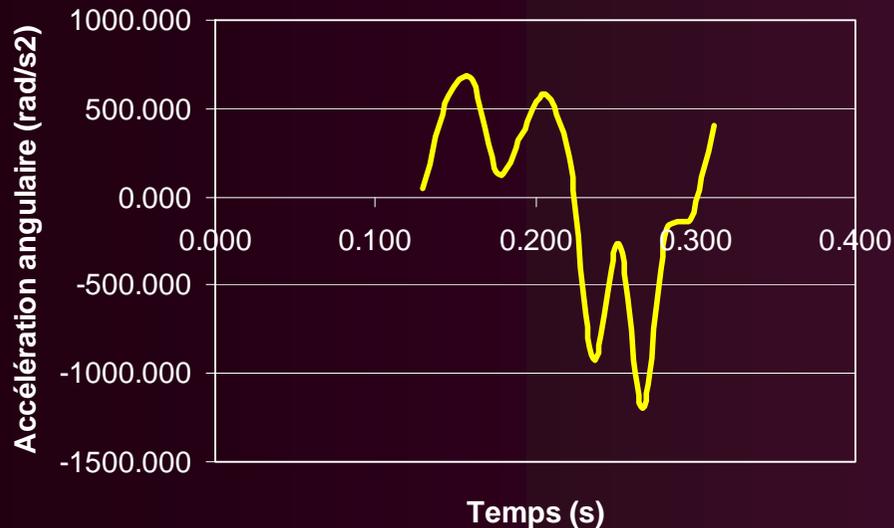


| Temps (s) | Angle (rad) | Vitesse angulaire (rad/s) |
|-----------|-------------|---------------------------|
| 0.115 | 2.570 | 1.333 |
| 0.130 | 2.590 | 2.000 |
| 0.145 | 2.620 | 10.625 |
| 0.161 | 2.790 | 21.333 |
| 0.176 | 3.110 | 23.333 |
| 0.191 | 3.460 | 28.667 |
| 0.206 | 3.890 | 37.333 |
| 0.221 | 4.450 | 40.667 |
| 0.236 | 5.060 | 26.875 |
| 0.252 | 5.490 | 22.667 |
| 0.267 | 5.830 | 4.667 |
| 0.282 | 5.900 | 2.000 |
| 0.297 | 5.930 | 0.000 |
| 0.312 | 5.930 | 5.930 |
| 0.327 | 6.020 | 6.000 |

Mouvement circulaire

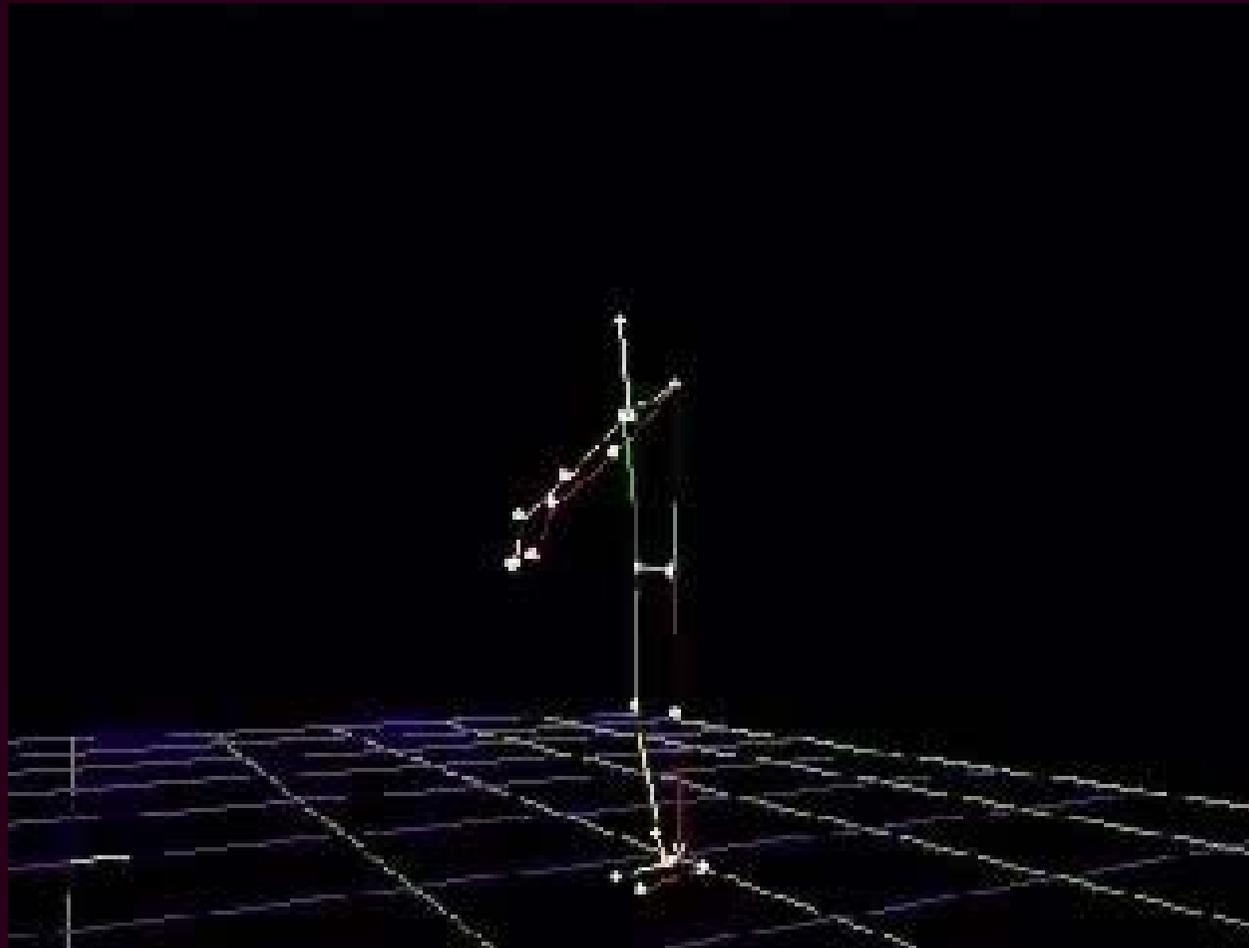
Accélération angulaire de la cuisse

Accélération angulaire de la cuisse



| Temps (s) | Angle (rad) | Vitesse angulaire (rad/s) | Accélération angulaire (rad/s²) |
|-----------|-------------|---------------------------|---------------------------------|
| 0.115 | 2.570 | 1.333 | |
| 0.130 | 2.590 | 2.000 | 44.444 |
| 0.145 | 2.620 | 10.625 | 575.000 |
| 0.161 | 2.790 | 21.333 | 669.271 |
| 0.176 | 3.110 | 23.333 | 133.333 |
| 0.191 | 3.460 | 28.667 | 355.556 |
| 0.206 | 3.890 | 37.333 | 577.778 |
| 0.221 | 4.450 | 40.667 | 222.222 |
| 0.236 | 5.060 | 26.875 | -919.444 |
| 0.252 | 5.490 | 22.667 | -263.021 |
| 0.267 | 5.830 | 4.667 | -1200.000 |
| 0.282 | 5.900 | 2.000 | -177.778 |
| 0.297 | 5.930 | 0.000 | -133.333 |
| 0.312 | 5.930 | 6.000 | 400.000 |
| 0.327 | 6.020 | | |

Mouvements de solide

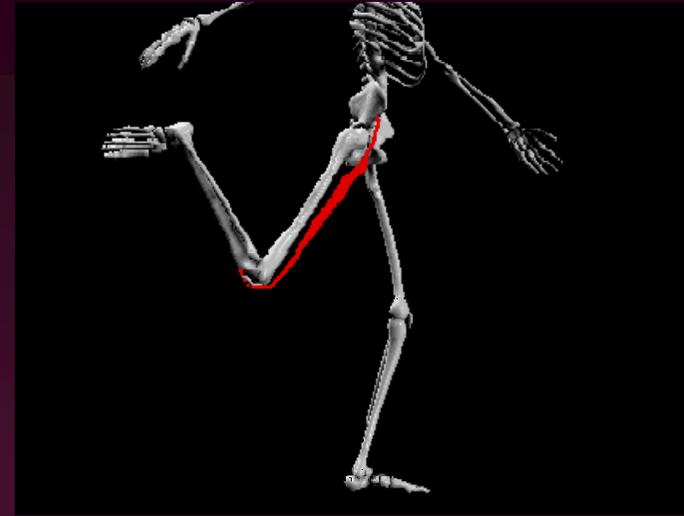
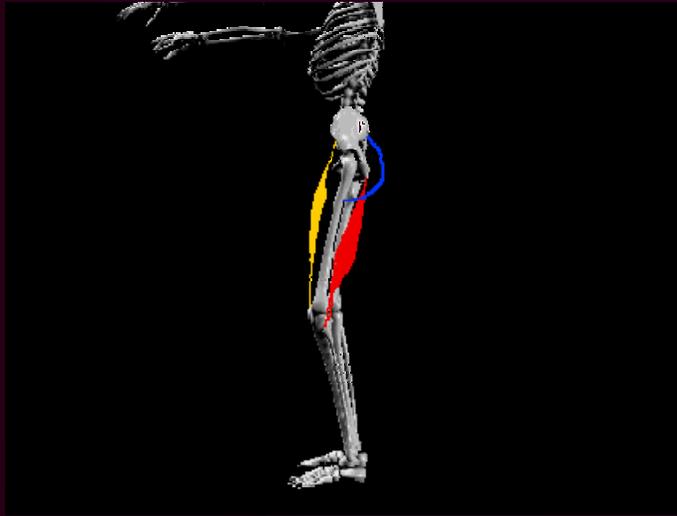


ACTIONS MECANIKQUES

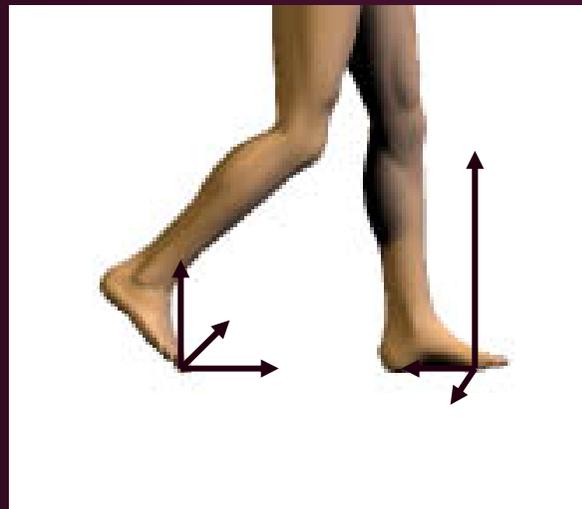
Les différentes contraintes dans le corps
humain

On distingue aussi:

- ✓ Actions mécaniques *intérieures* (au corps humain)

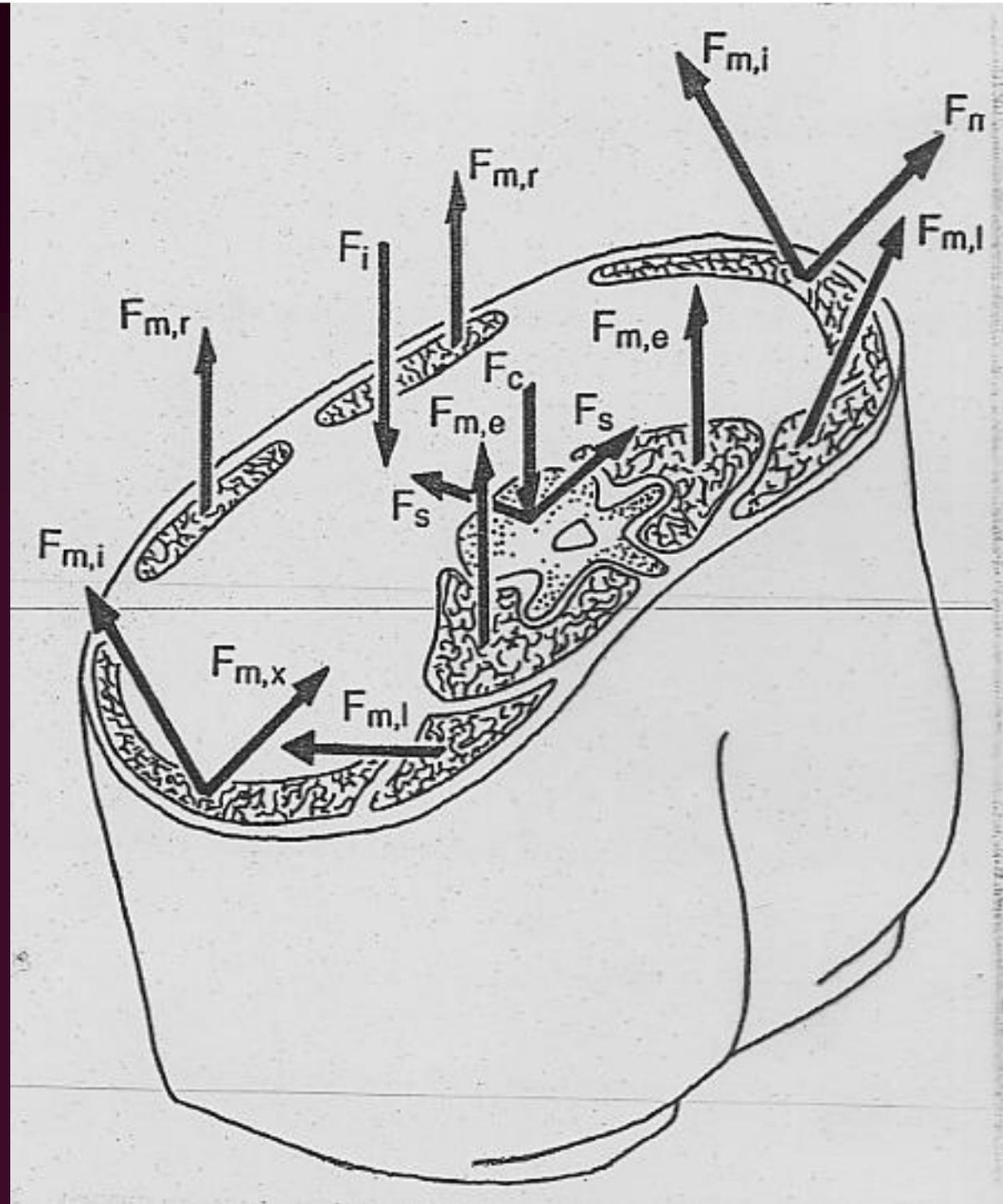


- ✓ Actions mécaniques *extérieures* (au corps humain)

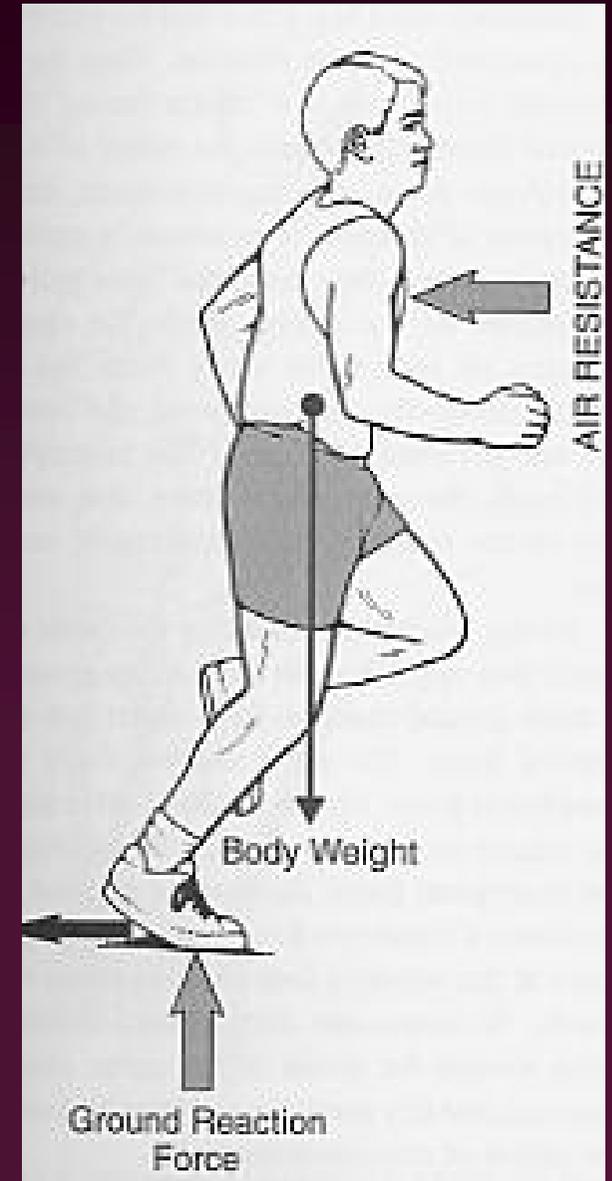
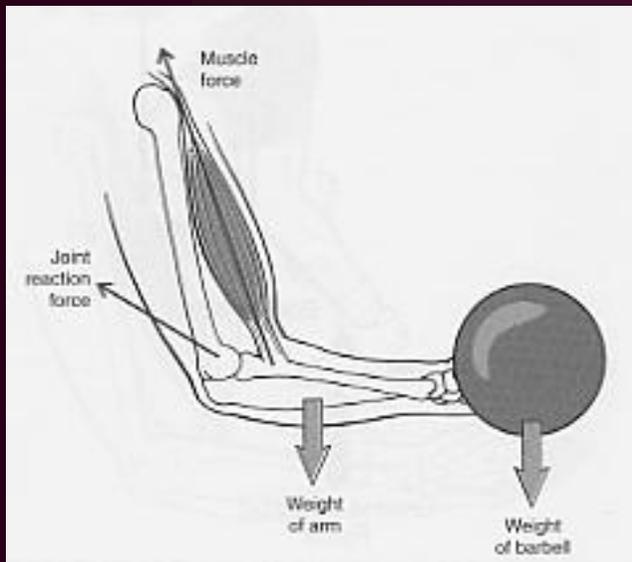
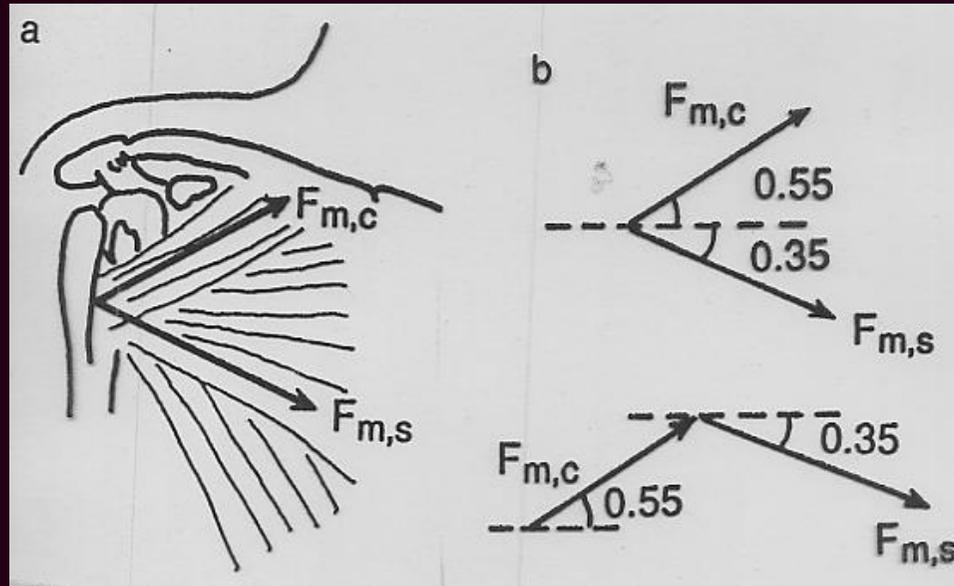


Dans le corps humain, les actions mécaniques proviennent:

- ✓ du champ de la **pesanteur**
- ✓ de l'**activité musculaire**
- ✓ des **tensions ligamentaires**.



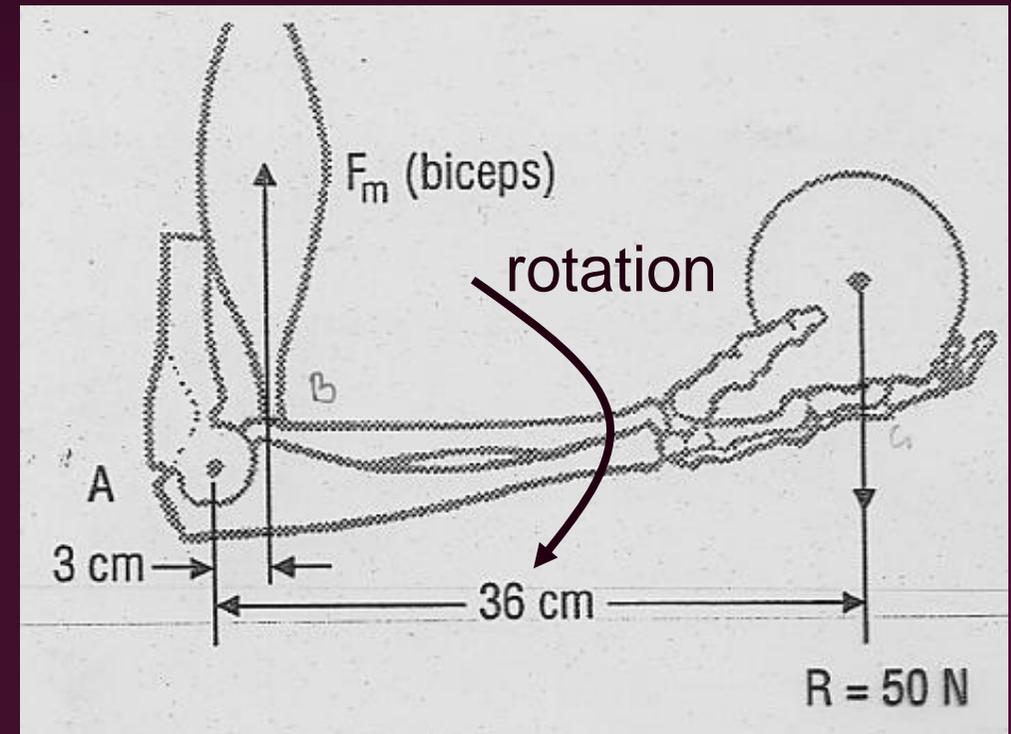
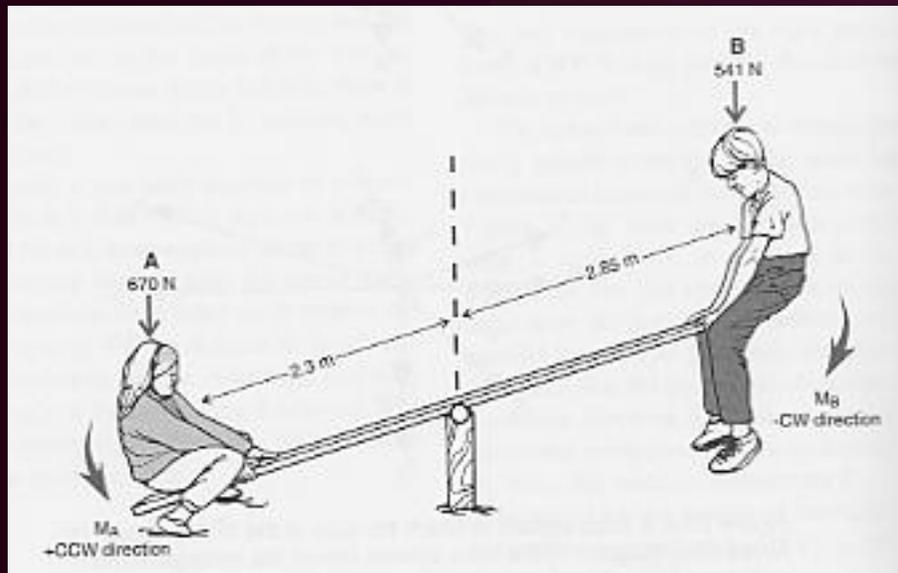
Exemples: Actions mécaniques caractérisées par un vecteur F .



LES MOMENTS MUSCULAIRES

Le **moment d'une force** en un point est la tendance que possède cette force à faire tourner un corps rigide autour de ce point.

Dés lors qu'il y a **rotation** autour d'un point, il existe un **moment** (ou un **couple**) en ce point

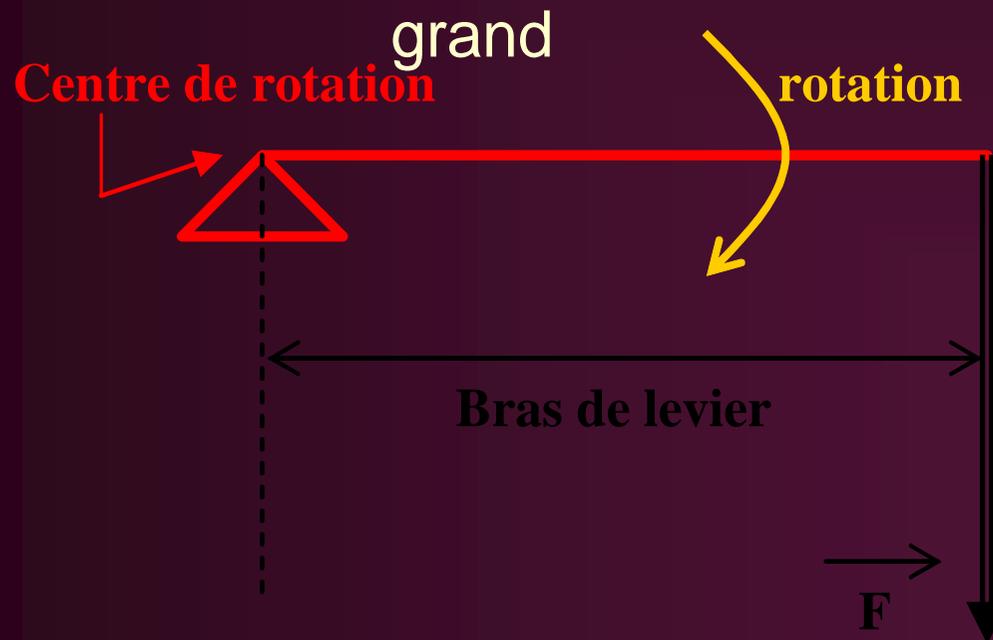


Moment

Ce sont les **forces** qui créent les **moments**
(on peut avoir des couples sans force...)

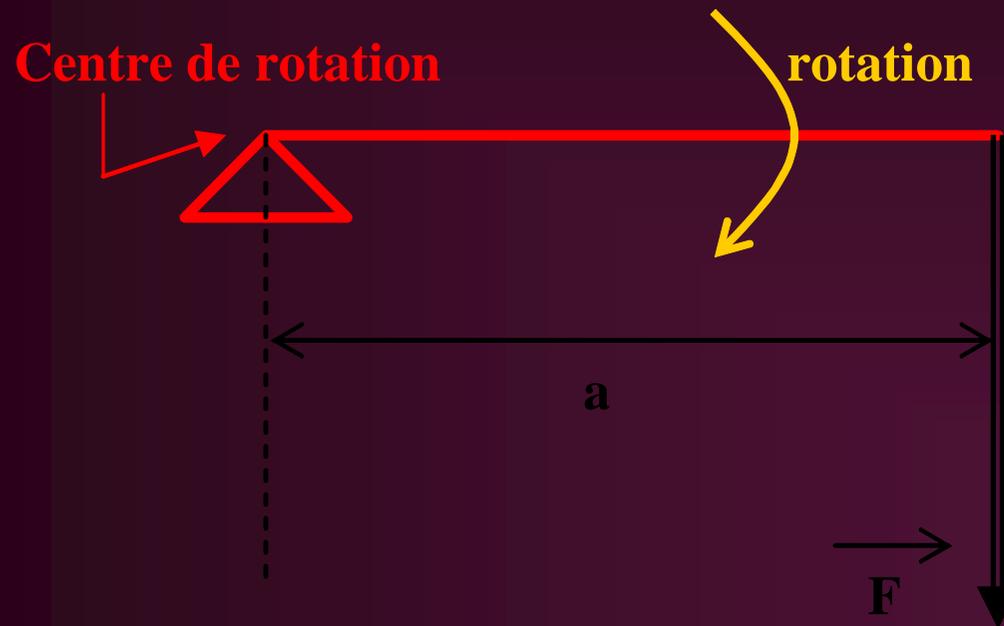
Le **bras de levier** est défini comme la distance de la force au centre de rotation

Plus le **bras de levier** est important et plus le **moment** sera grand



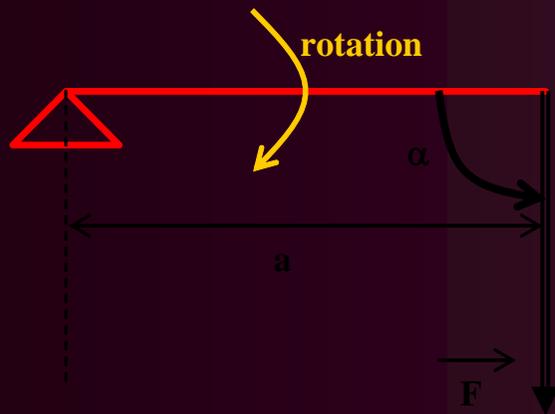
Moment

De même, plus la **force** est importante est importante
et plus le **moment** sera élevé



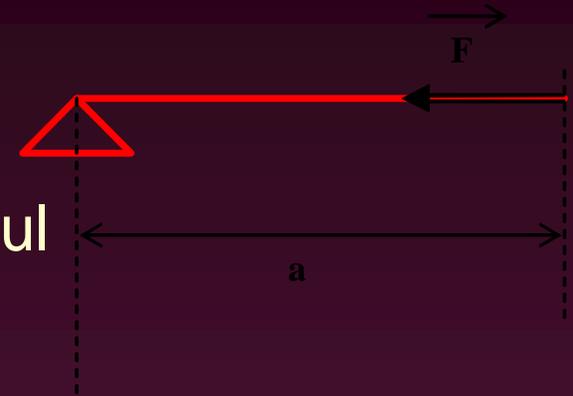
Moment

L'**orientation** de la force par rapport au bras de levier a une importance fondamentale

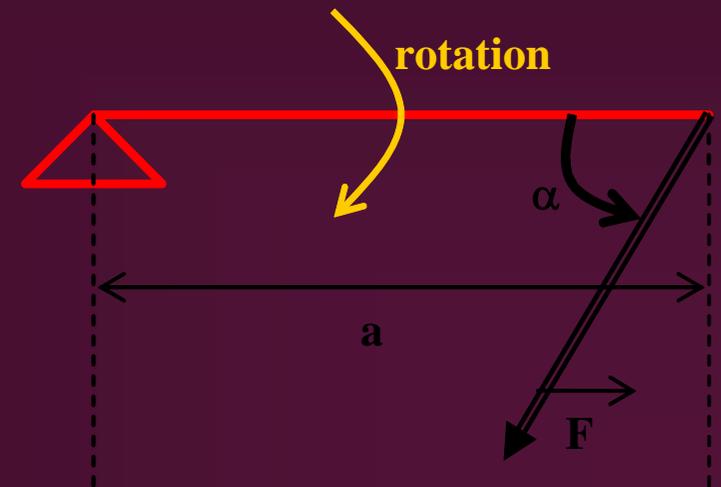


$\alpha = 90^\circ$ moment maximum

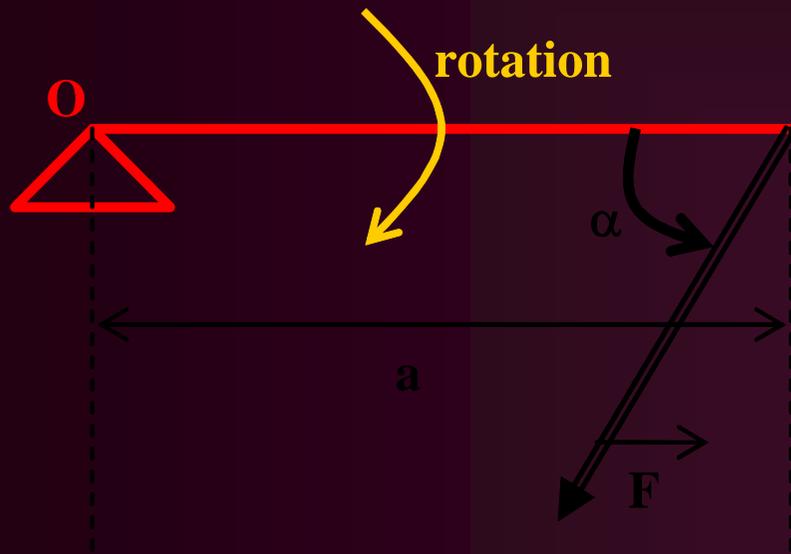
$\alpha = 0$ ou 180° moment nul
(pas de rotation)



α quelconque:
moment intermédiaire



Moment



On trouve alors:

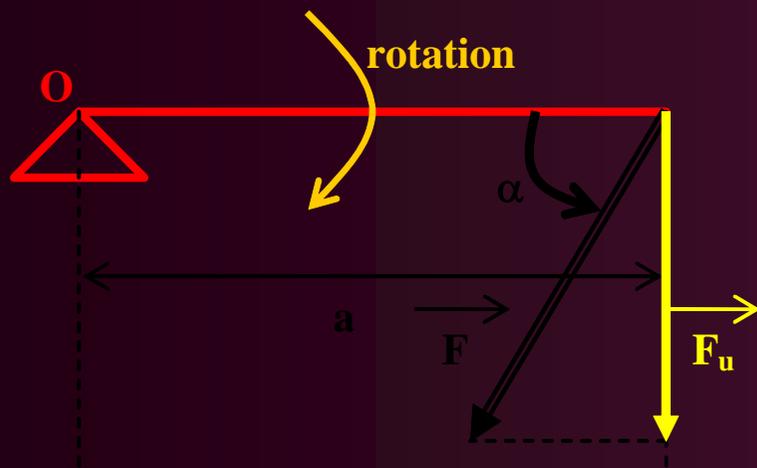
$$M_O = a \cdot F \cdot \sin \alpha$$

Le moment s'exprime donc en **N.m**
(Newton mètre)

On précise toujours en **quel point**
on détermine le moment

Moment

On peut aussi faire intervenir la **force utile** F_u : $F_u = F \cdot \sin \alpha$

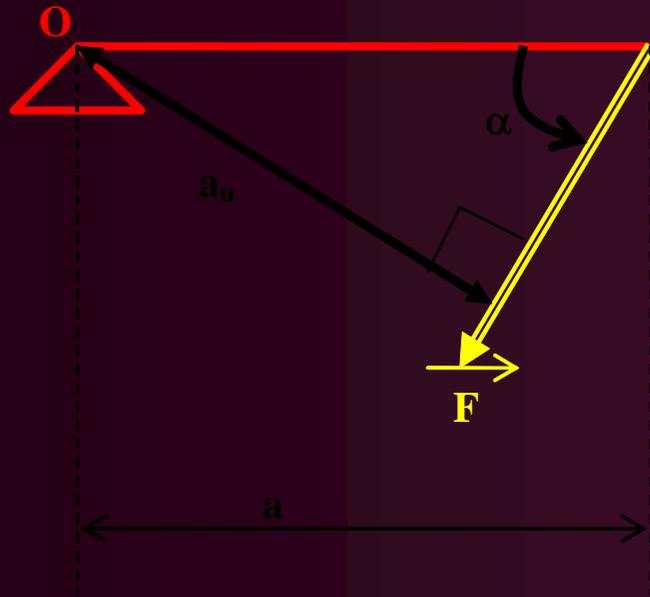


C'est la **projection** de la force sur la perpendiculaire au bras de levier

$$M_O = a \cdot F_u$$

Moment

On peut aussi faire intervenir le **bras de levier utile** a_u : $a_u = a \cdot \sin \alpha$



C'est la **projection** du bras de levier sur la direction de la force

$$M_O = a_u \cdot F$$

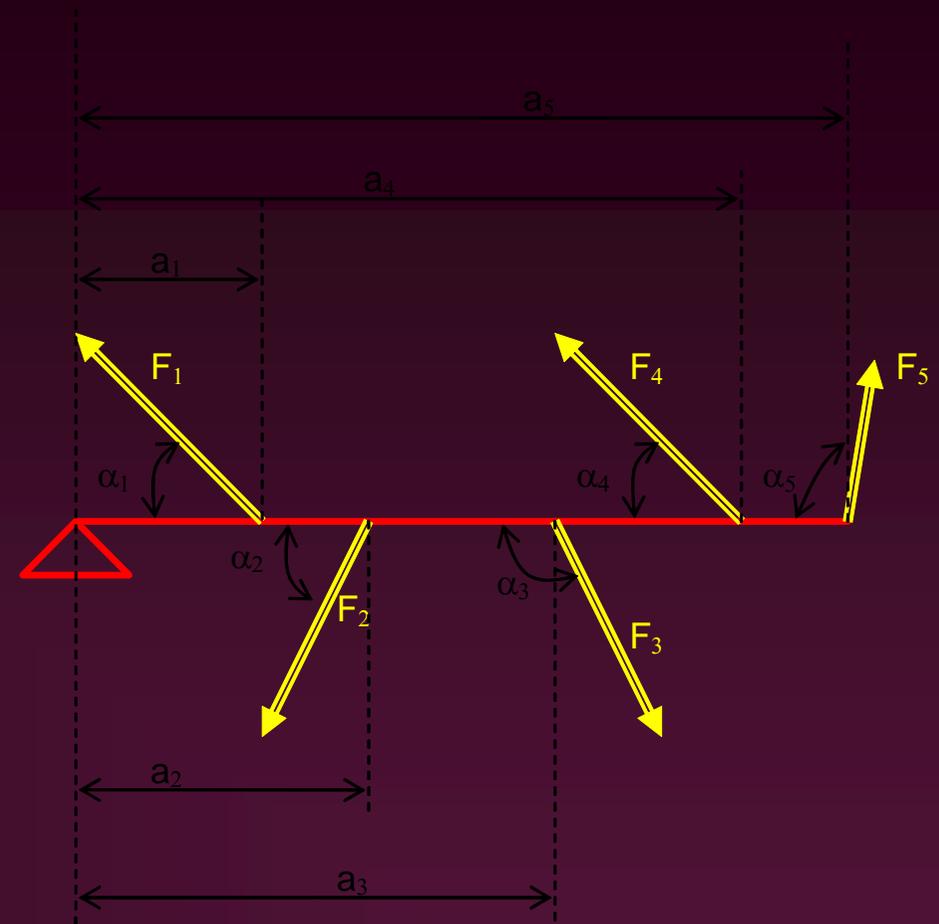
Dans le cas général ou **plusieurs forces** sont appliquées:

On appelle **résultante**,
la somme des forces appliquées

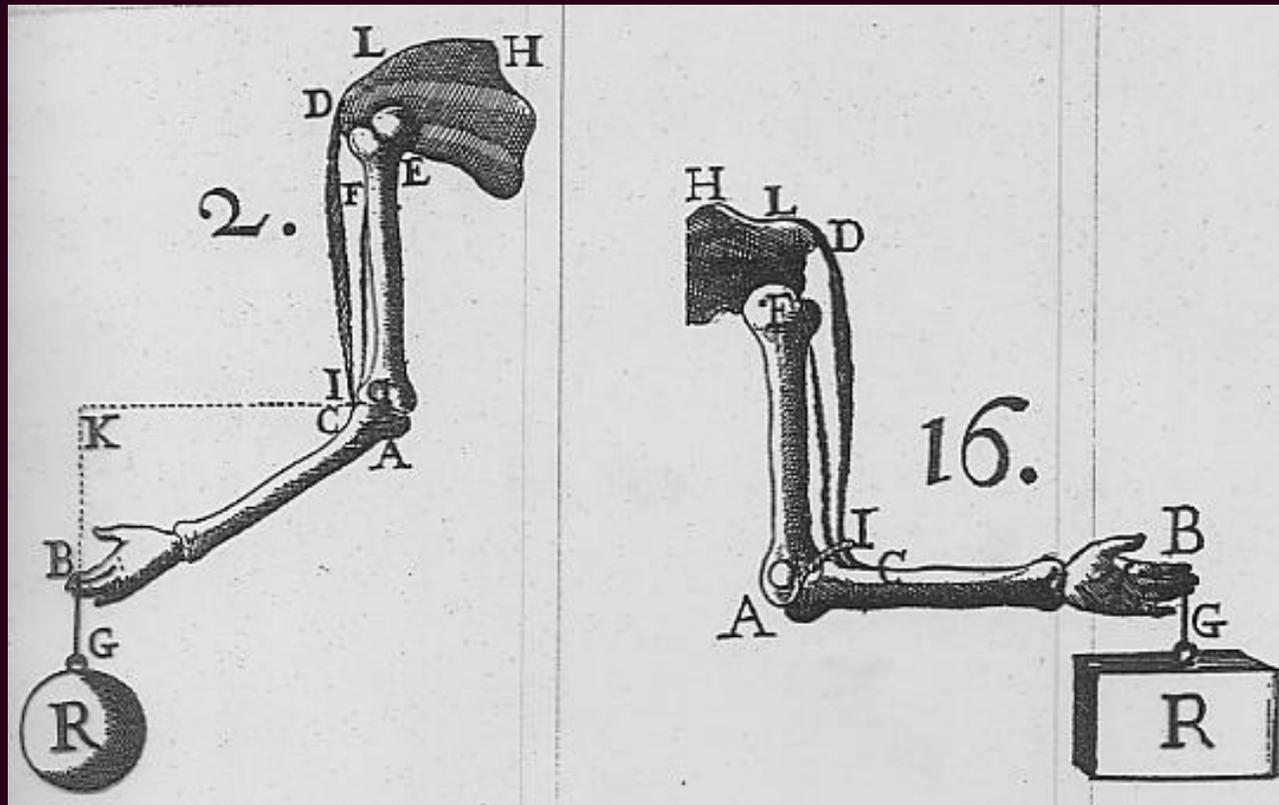
$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

On appelle **moment résultant**,
la somme des moments de chaque force

$$\begin{aligned} \vec{M}_O &= \sum \vec{M}_O(F_i) = \vec{M}_O(F_1) + \vec{M}_O(F_2) + \dots + \vec{M}_O(F_n) \\ &= a_1 \cdot F_1 \cdot \sin \alpha_1 + a_2 \cdot F_2 \cdot \sin \alpha_2 + \dots + a_n \cdot F_n \cdot \sin \alpha_n \end{aligned}$$



Exemple:



On sait depuis le **XVI^{ème}** siècle que le moment de la résistance au niveau de l'articulation influence l'effort musculaire

Exemple:

Le moment du poids au niveau du centre de rotation O empêche de maintenir l'équilibre: le mouvement de rotation est inévitable

En position horizontale

$$M = P \cdot y$$

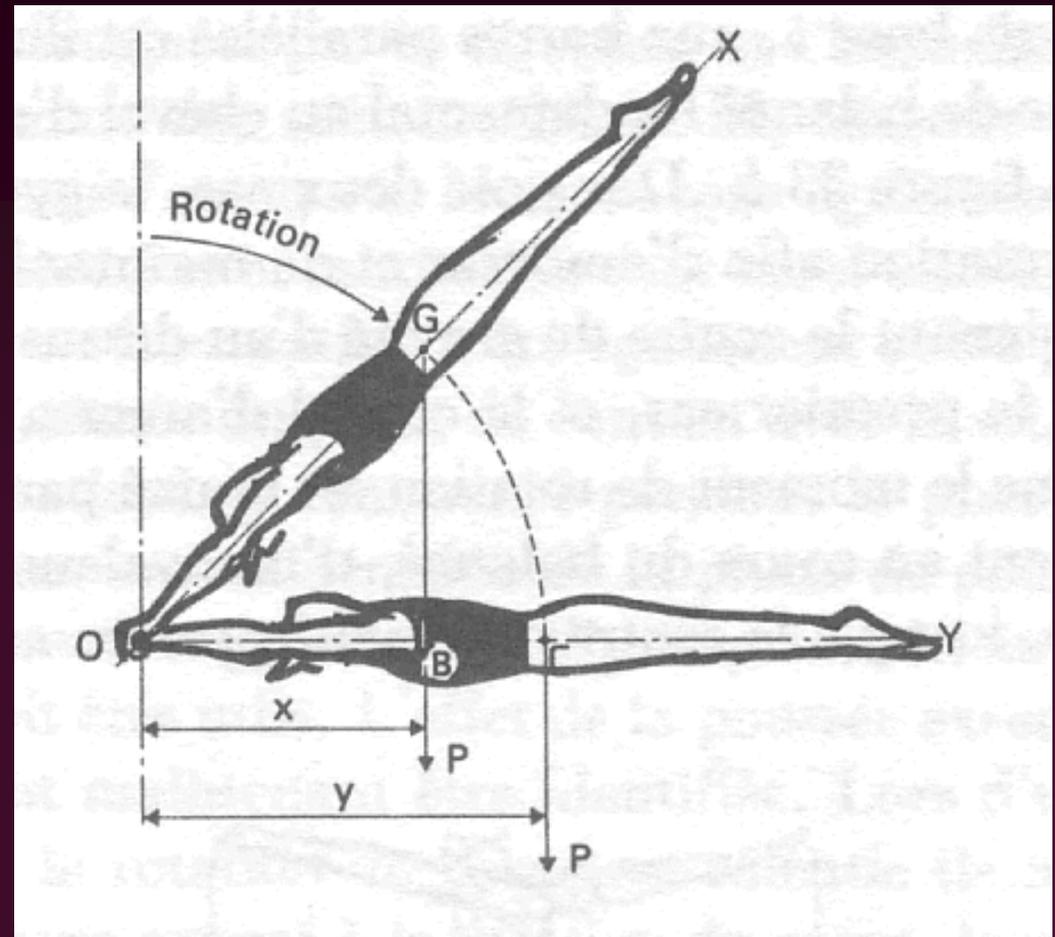


Figure: Moments de rotation à la barre fixe.

LES LEVIERS DANS LE CORPS HUMAIN

2. Actions mécaniques exercées par les muscles

La force déployée par un muscle est toujours une *force de traction* car les muscles ne sont pas rigides et par conséquent incapables de produire une force de poussée.

Le mouvement entre deux os se produit autour d'une articulation. Le muscle qui franchit cette articulation fournit la force nécessaire à ce mouvement.

Ce mécanisme est appelé *levier*.

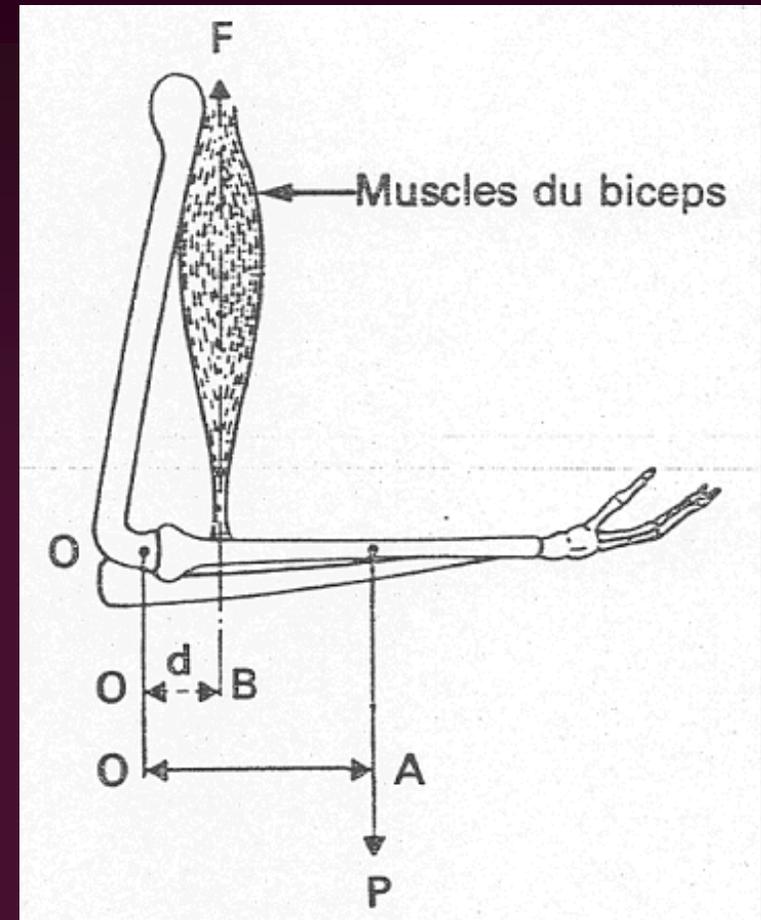


Figure: Levier anatomique

Un levier est une barre solide qui peut pivoter autour d'un point fixe, appelé point d'appui, si une force lui est appliquée.

Trois facteurs doivent être identifiés pour définir un levier:

- ✓ Le *point d'appui* autour duquel ont lieu les rotations
- ✓ Le *point d'application* de la traction musculaire (point de levier)
- ✓ Le *point d'application* de la résistance au mouvement

Classification des leviers: On peut classer les leviers du corps humain en trois catégories, permettant de classer l'efficacité de chacune des articulations du corps humain.

1) *Levier inter-appui*: Le point d'appui se trouve entre le point d'application de l'effort musculaire F et le point d'application de la résistance R ou du poids P .

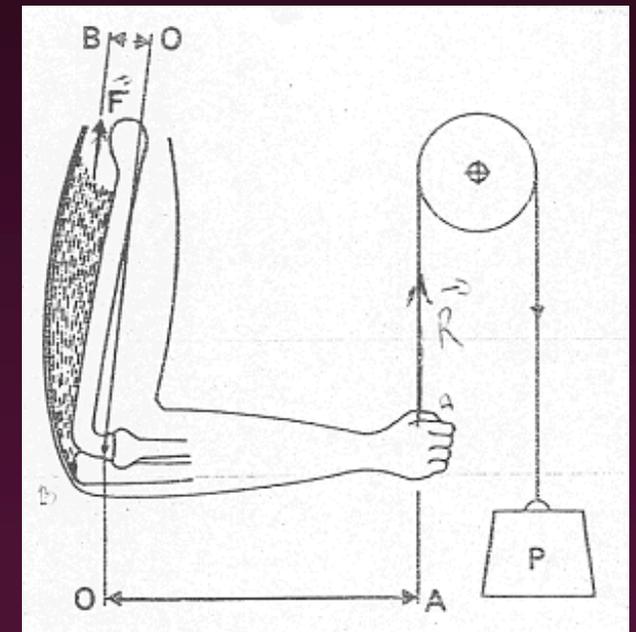
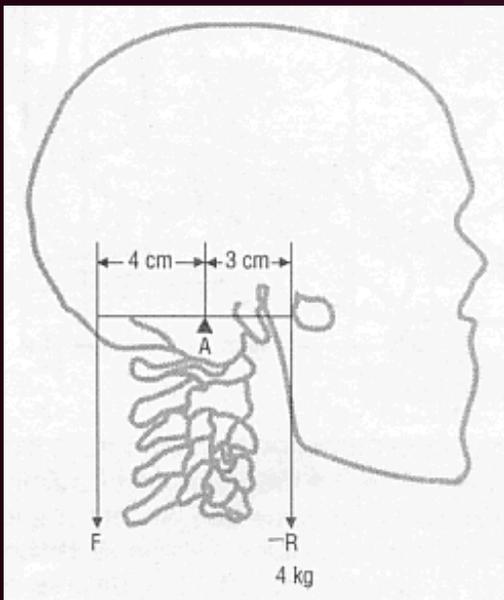


Figure: Système de levier inter-appui où F est la force musculaire des extenseurs du cou et R le poids de la tête. Le point d'appui est le point A .

Figure: Système de levier inter-appui où F est la force musculaire du triceps et R la tension dans le câble. Le point d'appui est la coude.

2) *Levier inter-résistant*: Le point d'application de la résistance R ou du poids P se trouve entre le point d'appui et le point d'application de l'effort musculaire F .

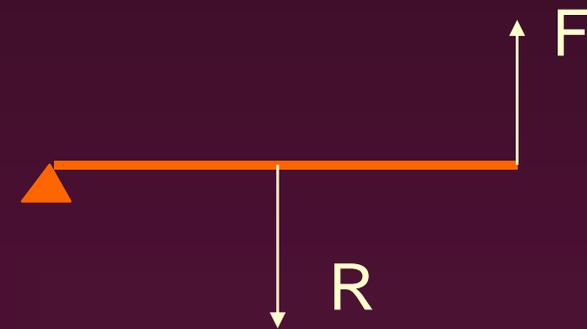
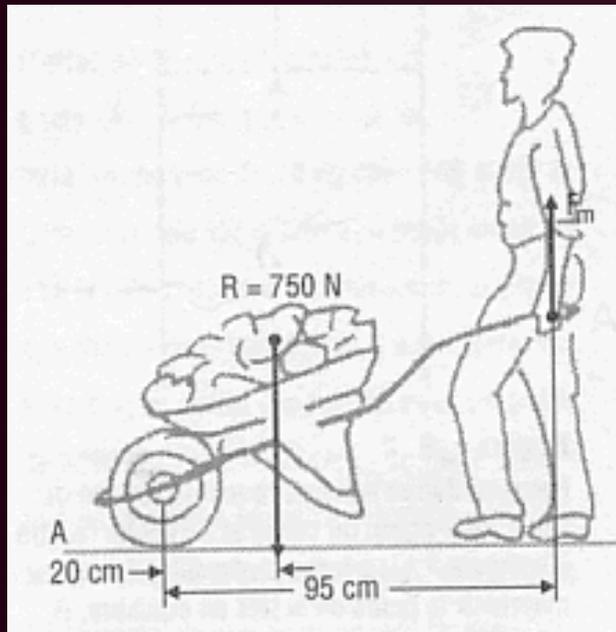


Figure: Système de levier inter-résistant où F est la force de traction des bras et R le poids de la brouette. Le point d'appui est le contact de la roue au sol.

3) *Levier inter-moteur*: Le point d'application de de l'effort musculaire F se trouve entre le point d'appui et le point d'application de la résistance R ou du poids P .

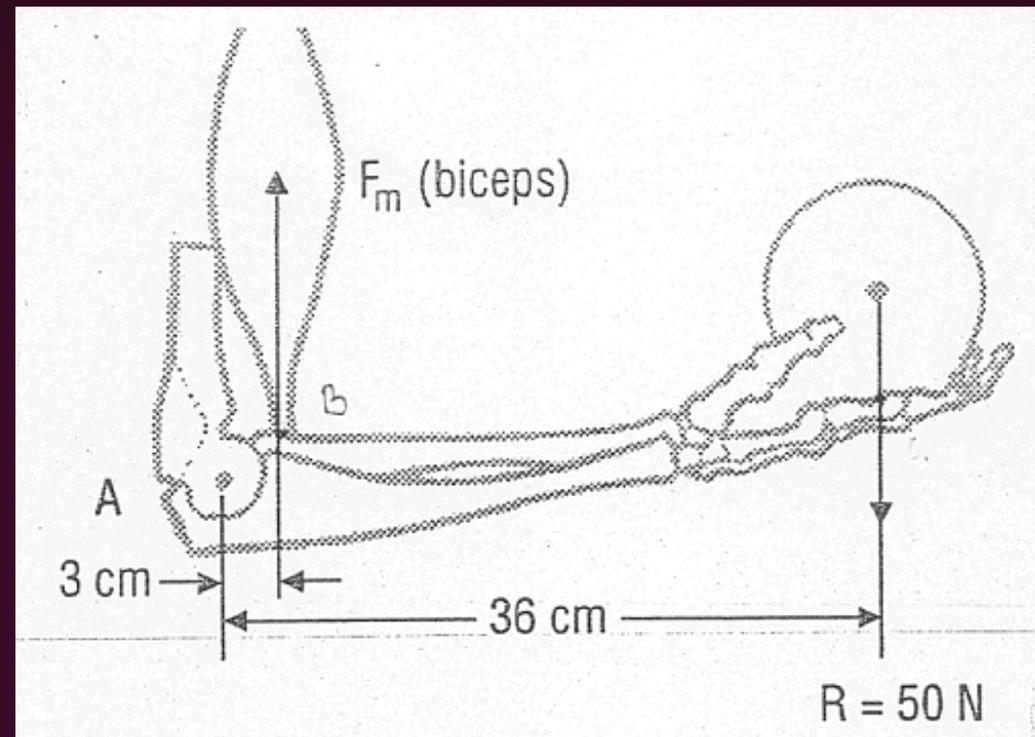
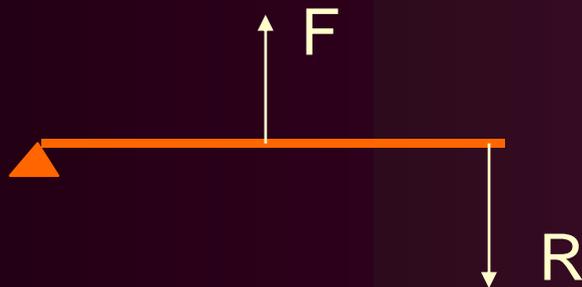
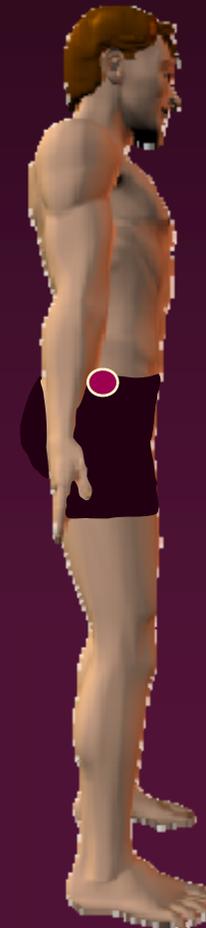
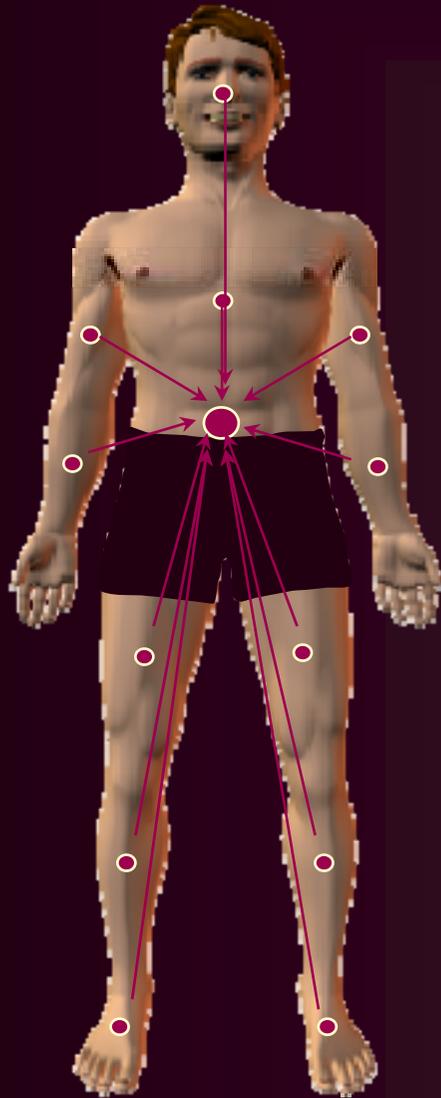


Figure: Système de levier inter-moteur où la force musculaire du biceps se situe entre le point d'appui A et le poids R de 50 N .

ANTHROPOMETRIE

Centre de masse corporel



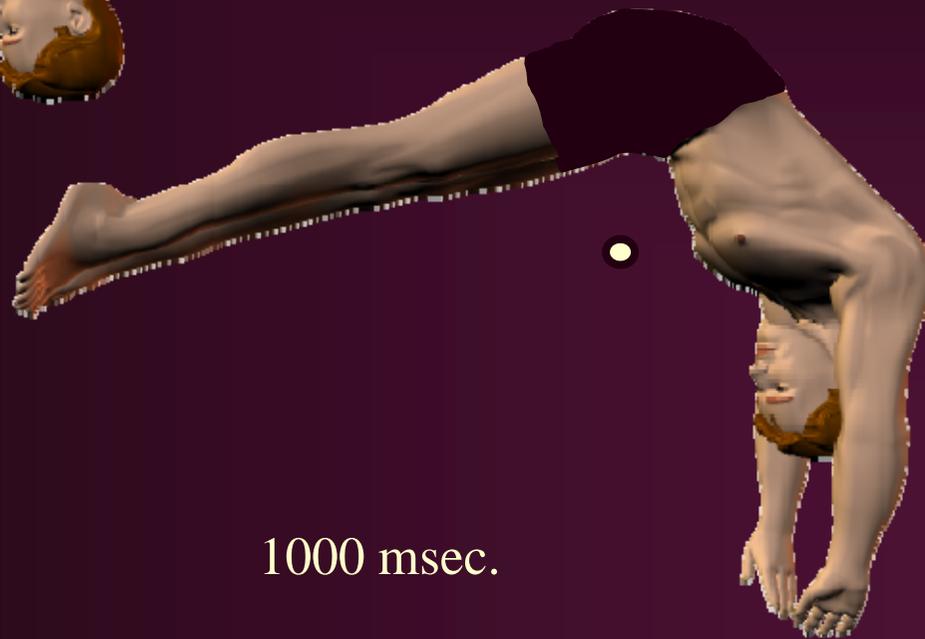
Mobilité du Centre de Masse corporel



Centre de Masse corporel lors d'Activités



500 msec.



1000 msec.



1500 msec.

Centre de Masse corporel lors d'Activités



Localisation du centre de gravité

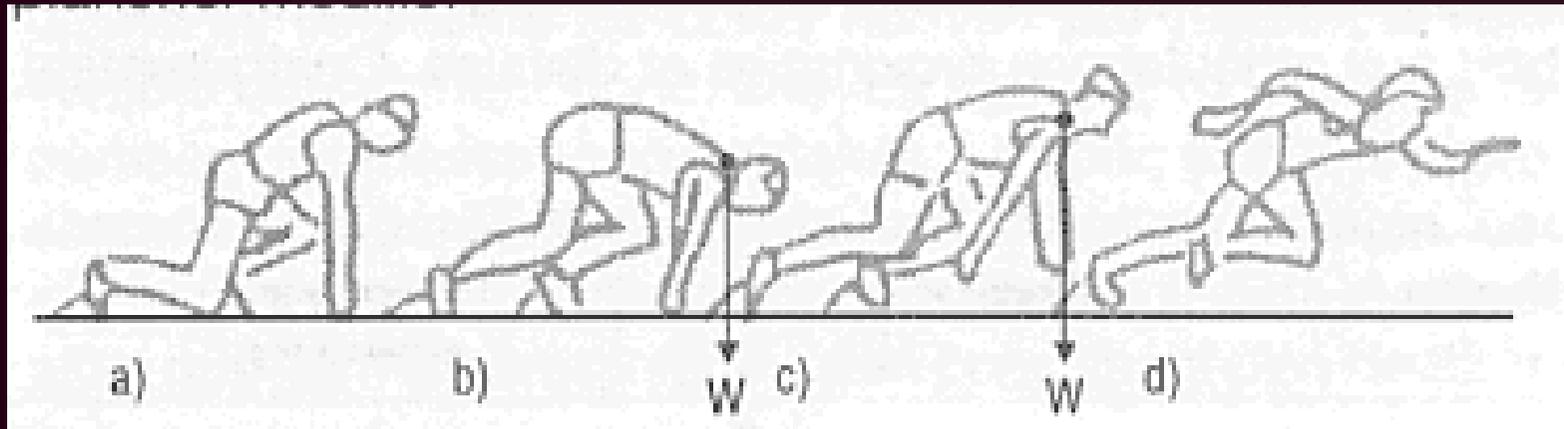


Figure: Position de départ de course où a) le coureur se prépare, b), est en position de départ. A ce moment, il est en équilibre instable. Dès que les mains quittent le sol, c) son poids le fait basculer vers l'avant le forçant à accélérer au maximum pour reprendre son équilibre d).

Position du centre de gravité du corps humain: L'anthropologie physique étudie les différentes caractéristiques physiques de l'être humain telles que sa taille, son poids, la forme de son nez...

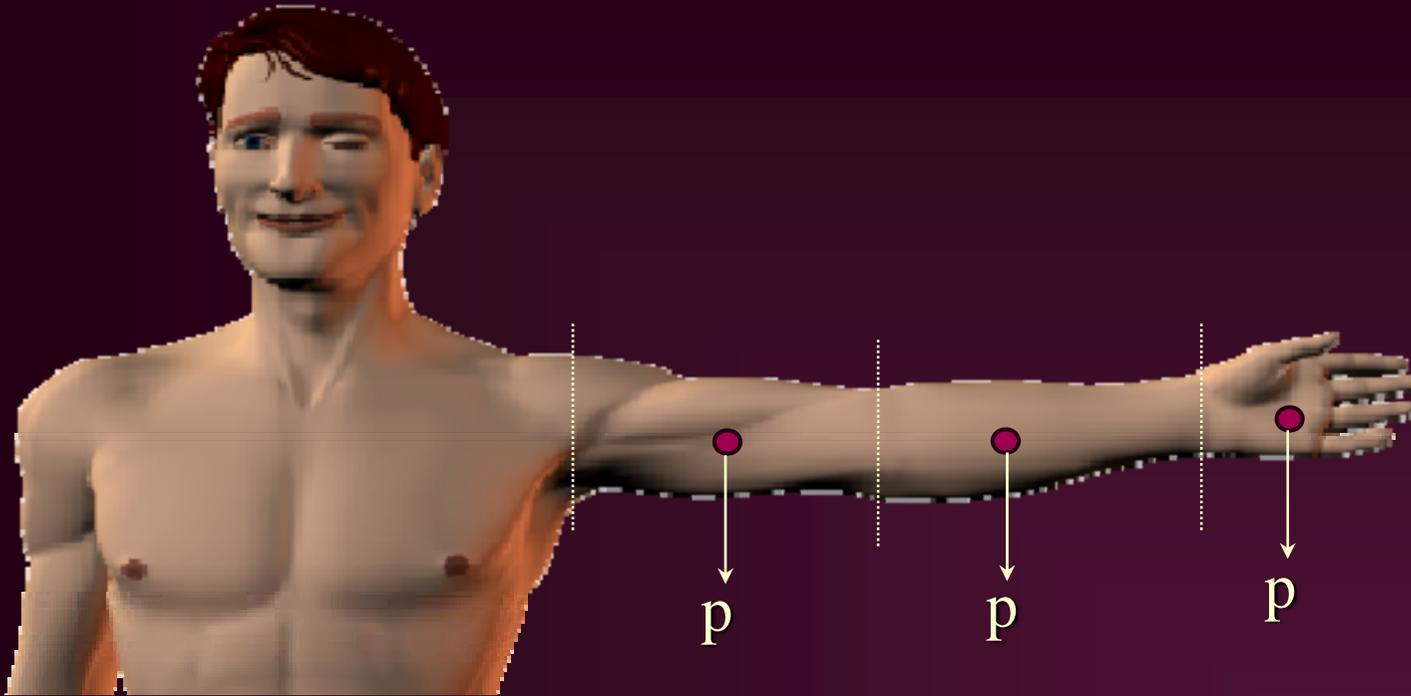
La branche de l'anthropologie physique qui mesure le corps humain s'appelle *l'anthropométrie*.

Elle nous permet de connaître pour chacun des différents segments du corps humain:

- ✓ la masse
- ✓ la position du centre de gravité
- ✓ Les moments d'inertie

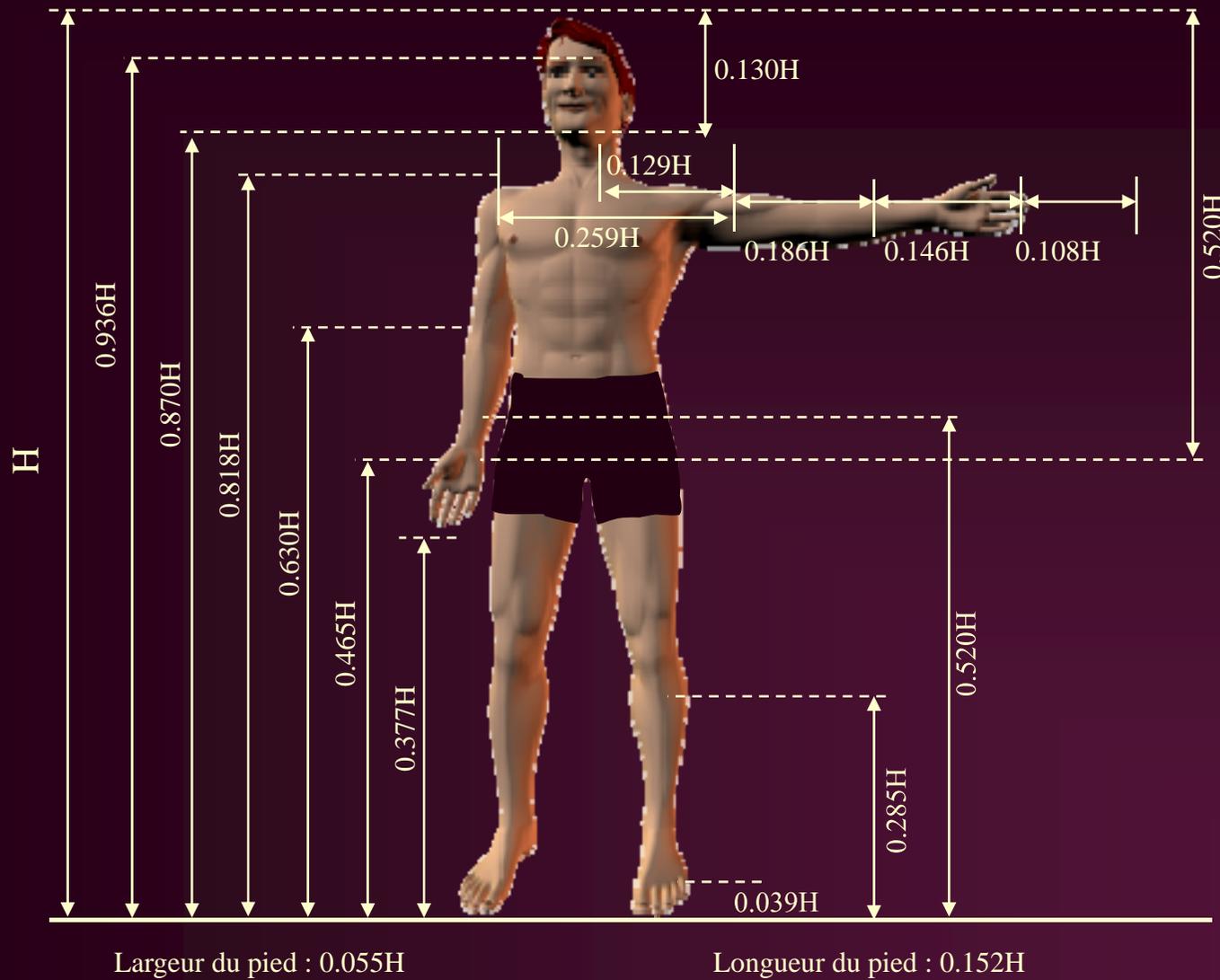
en fonction de la masse et/ou de la taille corporelle, de la longueur du segment considéré...

Anthropométrie

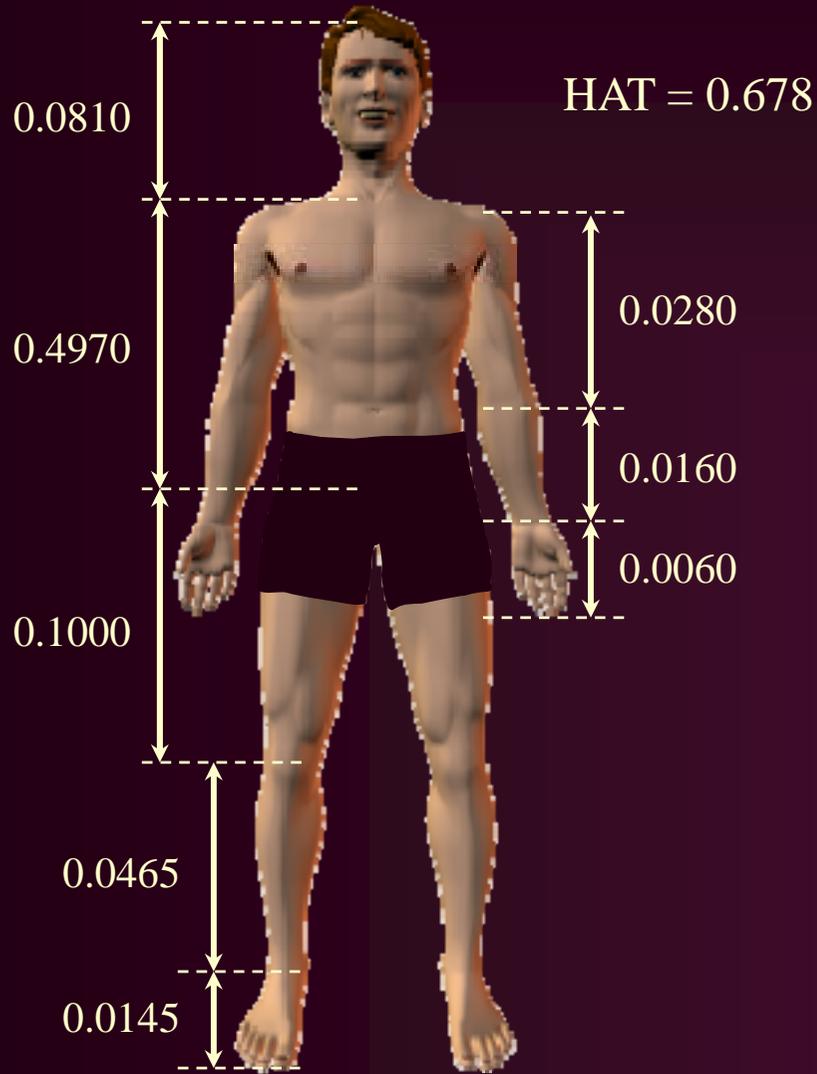


Le centre de masse segmentaire est fixe à l'intérieur du segment.

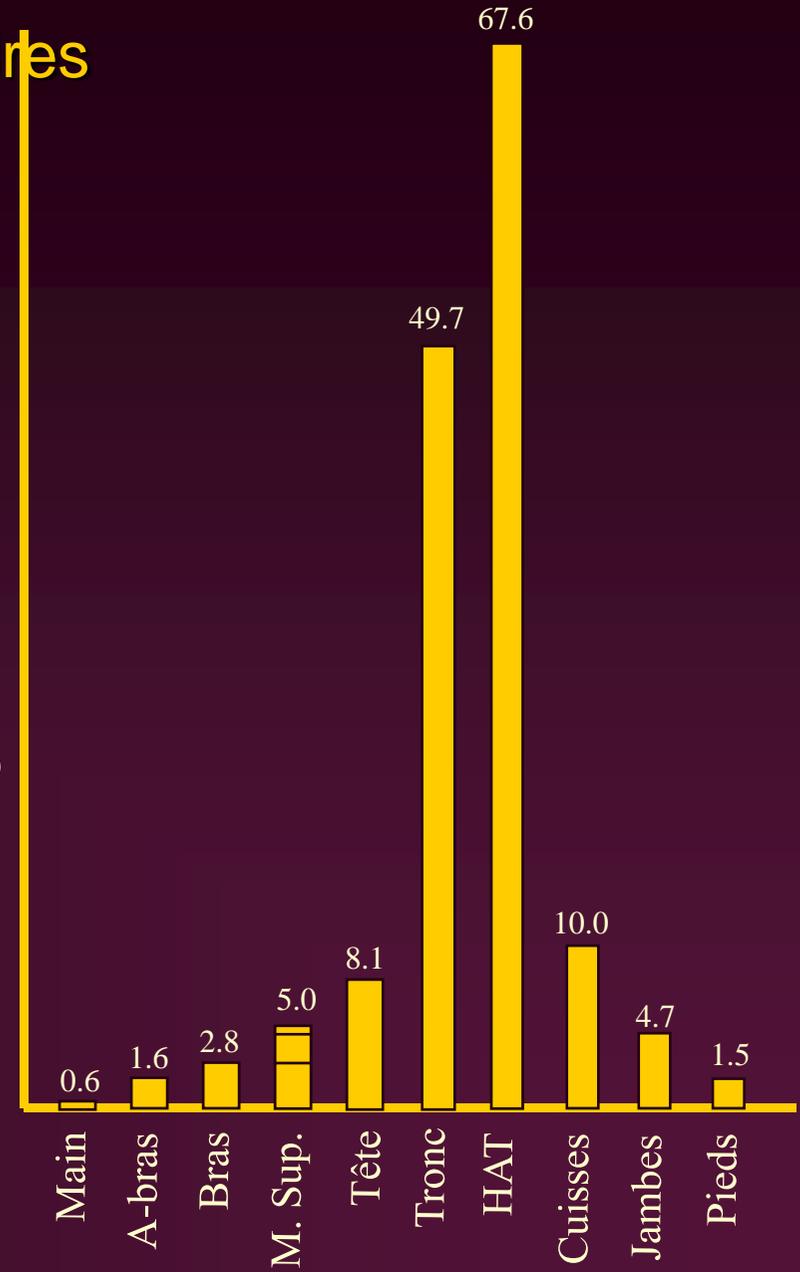
Longueurs segmentaires



Masses segmentaires



Masse segmentaire (% de la masse totale)

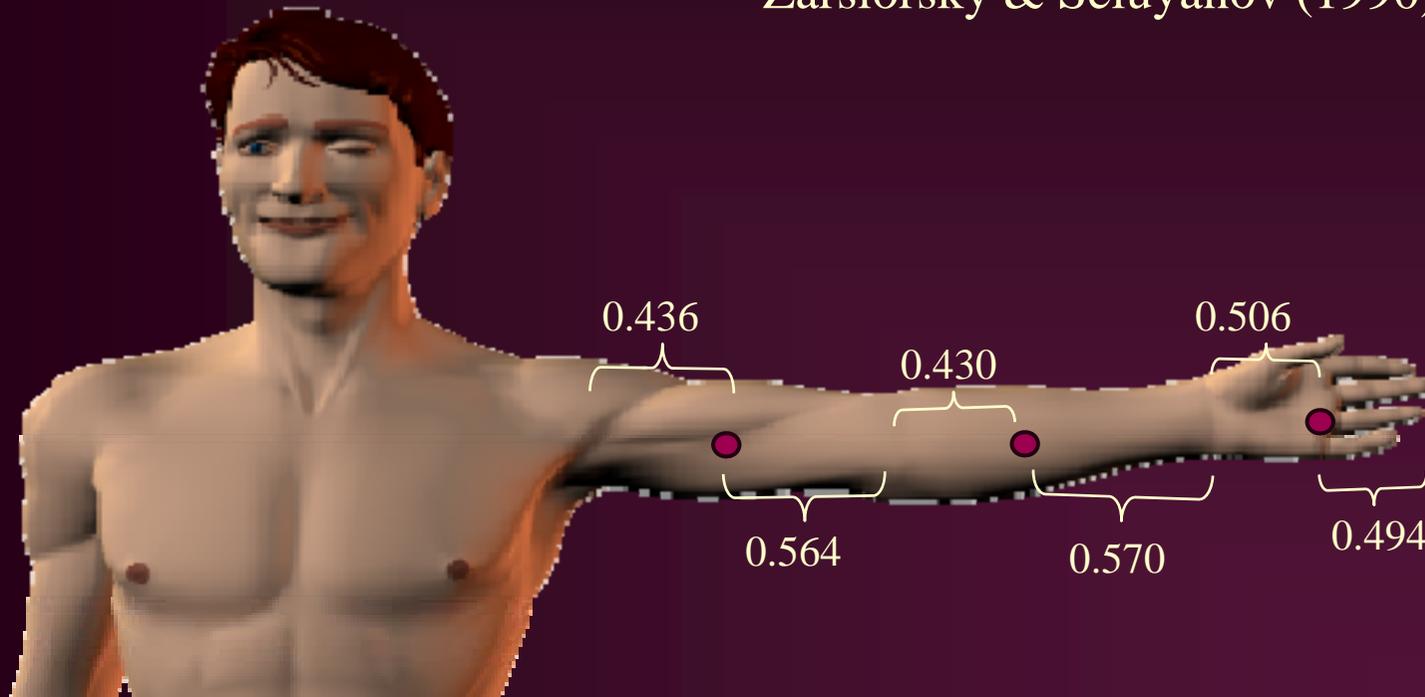


Position du centre de masse segmentaire

Dempster et al. (1955)

Clauser et al. (1969)

Zarsiorsky & Seluyanov (1990)



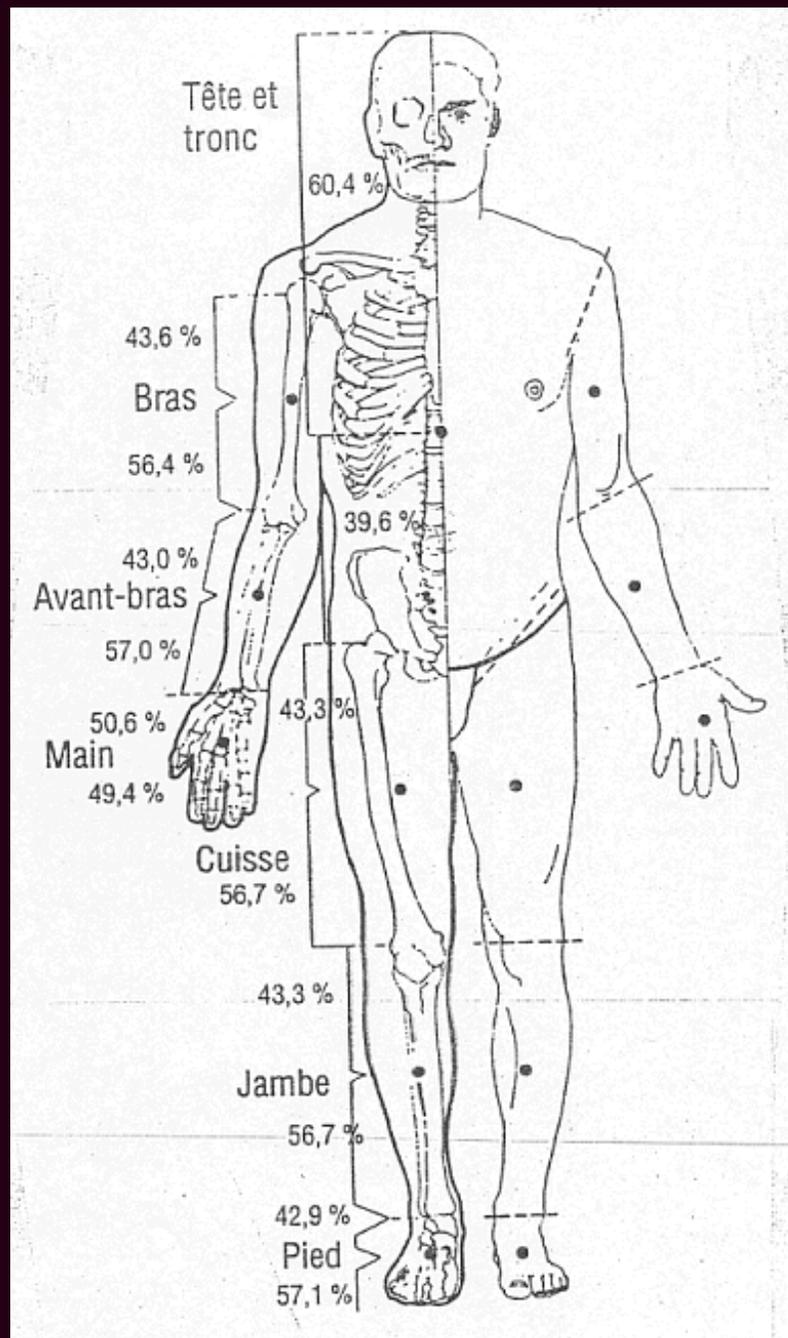


Figure: Positions des centres de masse segmentaires pour l'ensemble du corps, exprimées en pourcentage de la longueur des segments respectifs et par rapport aux articulations proximales et distales.

Contrairement au centre de masse corporel qui peut se déplacer selon le mouvement des bras ou des jambes, le centre de masse segmentaire est fixe à l'intérieur du segment.

Généralement, les **moments d'inertie** sont trop complexes voire impossible à calculer. On utilise des tables

Dans tous les cas, il faut connaître **le point** ou est déterminé le moment d'inertie ainsi que **l'axe autour** duquel s'effectue la rotation. En effet les moments ne seront pas les mêmes si l'on effectue une rotation autour de l'axe transverse, autour de l'axe sagittale ou autour de l'axe vertical.

Exemple de table:

Moment d'inertie des segments du corps humain au niveau du centre de gravité autour des axes sagittaux, transverses et verticaux

| Segment | Somersault | Cartwheel | Twist |
|-----------|------------|-----------|--------|
| Head | 0.0164 | 0.0171 | 0.0201 |
| Trunk | 1.0876 | 1.6194 | 0.3785 |
| Upper arm | 0.0133 | 0.0133 | 0.0022 |
| Forearm | 0.0065 | 0.0067 | 0.0009 |
| Hand | 0.0008 | 0.0006 | 0.0002 |
| Thigh | 0.1157 | 0.1137 | 0.0224 |
| Leg | 0.0392 | 0.0391 | 0.0029 |
| Foot | 0.0030 | 0.0034 | 0.0007 |

LES FROTTEMENTS

La force externe la plus répandue est probablement *la force de frottement* ou *de résistance au mouvement*.

Le frottement intervient pour freiner le mouvement: *résistance à l'air sur un cycliste, adhérence sur la piste de course...*

A première vue, on peut croire que la force de frottement nuit au mouvement alors qu'elle en est un des principaux artisans.

Sur la glace, le coefficient de frottement entre la chaussure et la glace est faible, et on a du mal à se déplacer. Le frottement ou l'adhérence sont donc indispensables.

Frottement

Il existe deux modes de mouvement entre deux solides en contact:

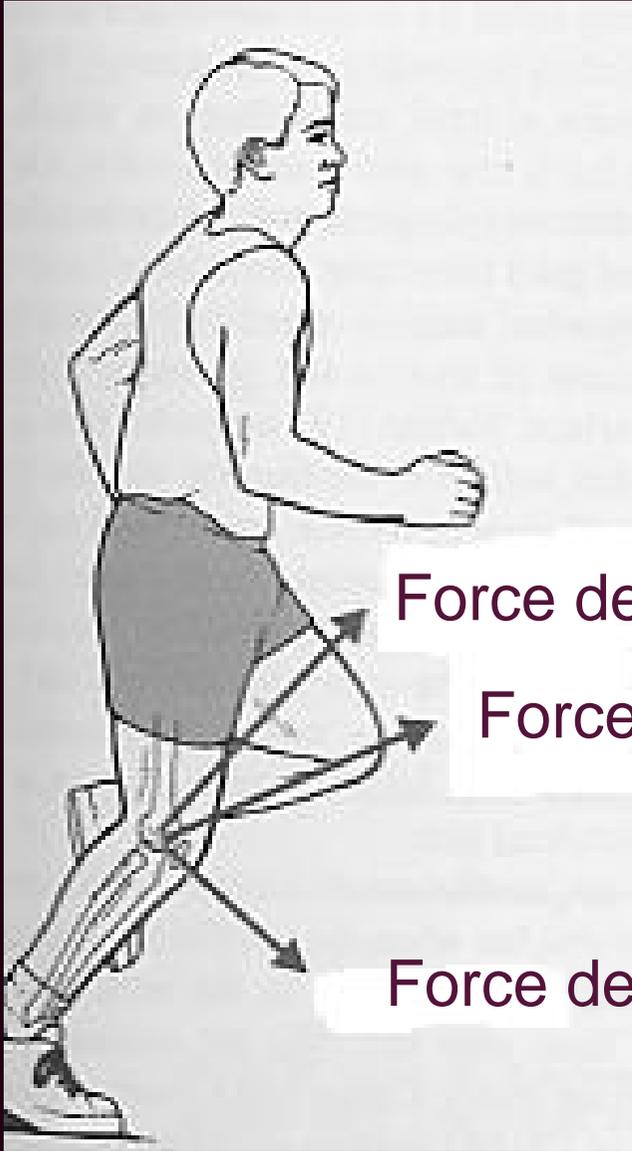
Soit il a **glissement** (ex: contact ski / neige)



Soit il y a **adhérence** (ex: contact pneu / route)

Frottement Le frottement est une force

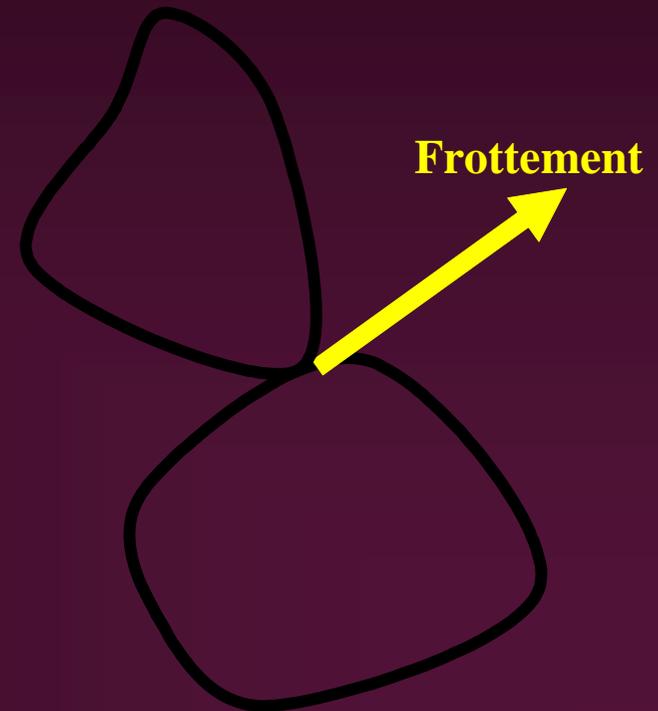
Cette force de frottement est tangente aux surfaces en contact



Force de compression

Force de réaction

Force de frottement



Coefficient de frottement

Facteurs influençant le frottement

- ✓ Nature des matériaux en contact
- ✓ Rugosité des surfaces en contact

Tableau: Coefficients de frottement pour différentes paires de matériaux.

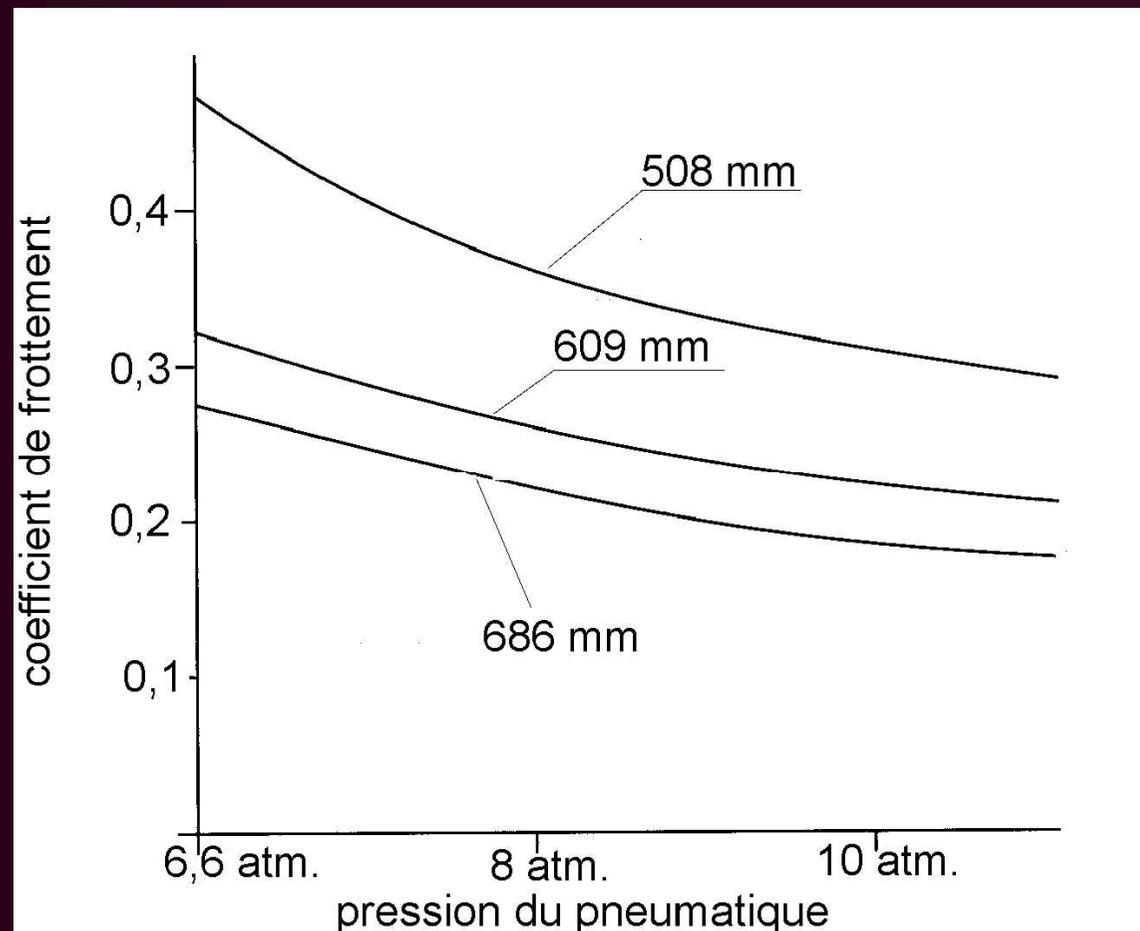
| Matériau | Coefficients de frottement |
|----------------------------|----------------------------|
| Bois sur bois (sec) | 0,4 |
| Métal sur métal (sec) | 0,2 |
| Métal sur métal (lubrifié) | 0,05 |
| Caoutchouc sur bois | 0,75 |
| Caoutchouc sur tuile | 0,2 |
| Cartilage | 0,005 |

| Chaussure | Tapis | Synthétique granulaire | Surface PVC | Sable | Asphalte |
|------------|-------|------------------------|-------------|-------|----------|
| Tout usage | 1,10 | 1,00 | 1,10 | 0,50 | 0,75 |
| Jogging | 1,00 | 0,88 | 0,85 | 0,43 | 0,68 |
| Tennis | 0,55 | 0,82 | 0,45 | 0,40 | 0,70 |

Tableau: Coefficients de frottement moyens pour différentes chaussures de course et type de surface de jeu.

Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement peut varier en fonction de différents paramètres: température, pression, ...



Coefficient de frottement

On peut chercher soit:

*à diminuer le frottement :

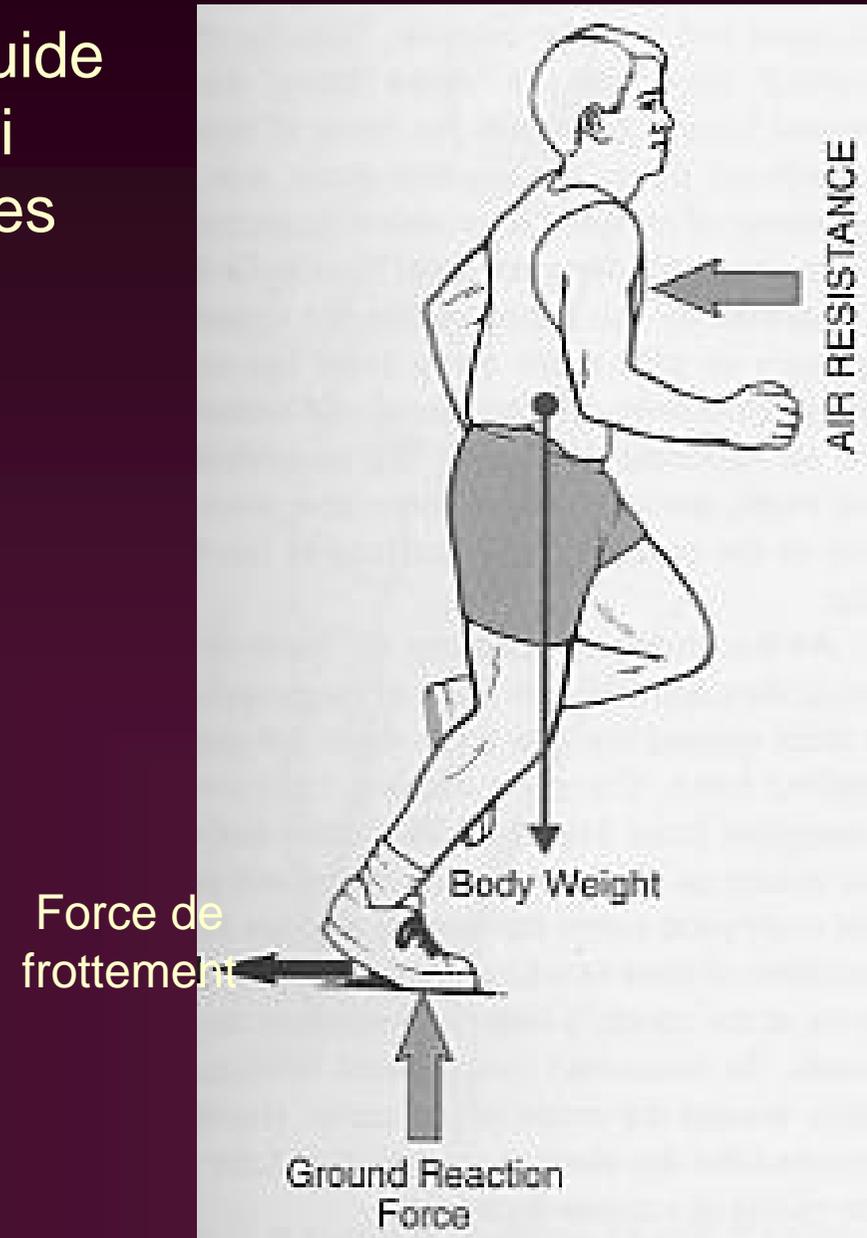
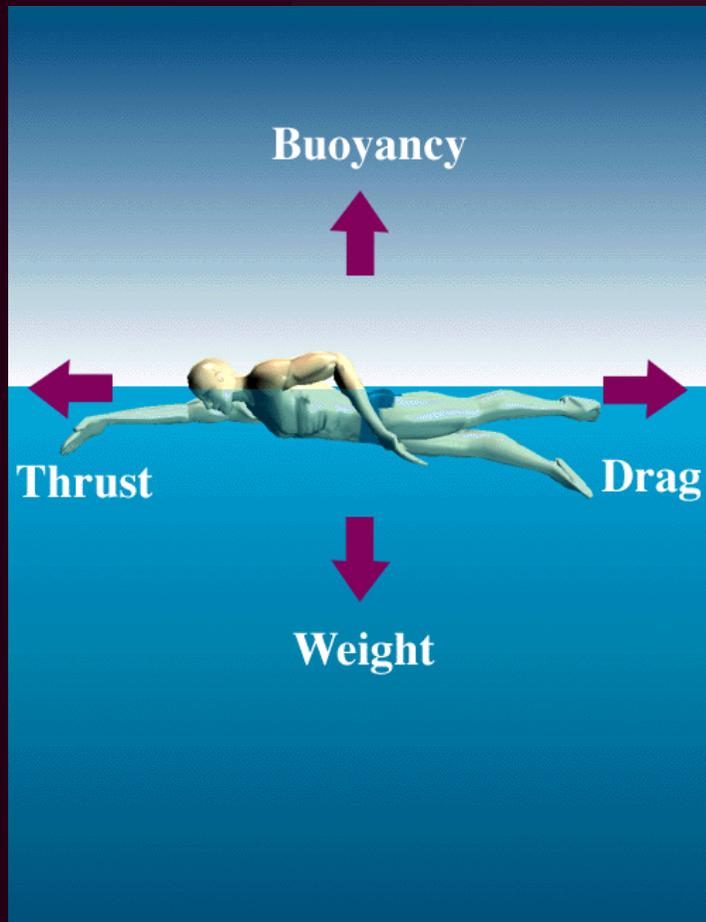
- **Graissage** des engrenages dans les pièces de transmission
 - **Fartage** des skis
 - **liquide synovial** dans les articulations

*à augmenter le frottement (l'adhérence)

- **Chauffage des pneus** en F1

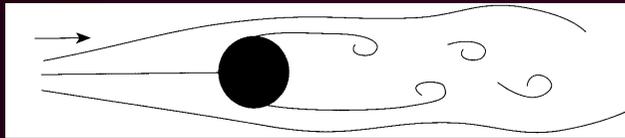
Frottement

Ce sont souvent les **frottements** avec le fluide qui entourent l'individu (**air, eau, ...**) qui créent les contraintes les plus importantes

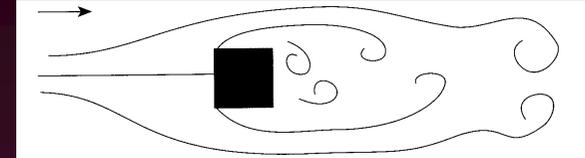


Frottement

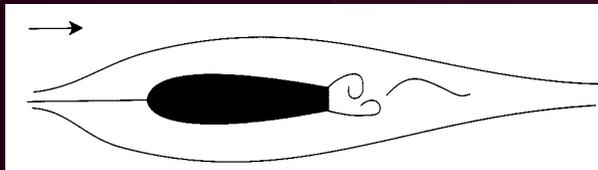
Pour les frottements fluides, on parle de **coefficient de traînée**



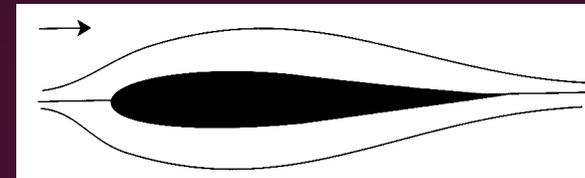
$C \approx 1,2$



$C \approx 1,7$



$C \approx 0,1$



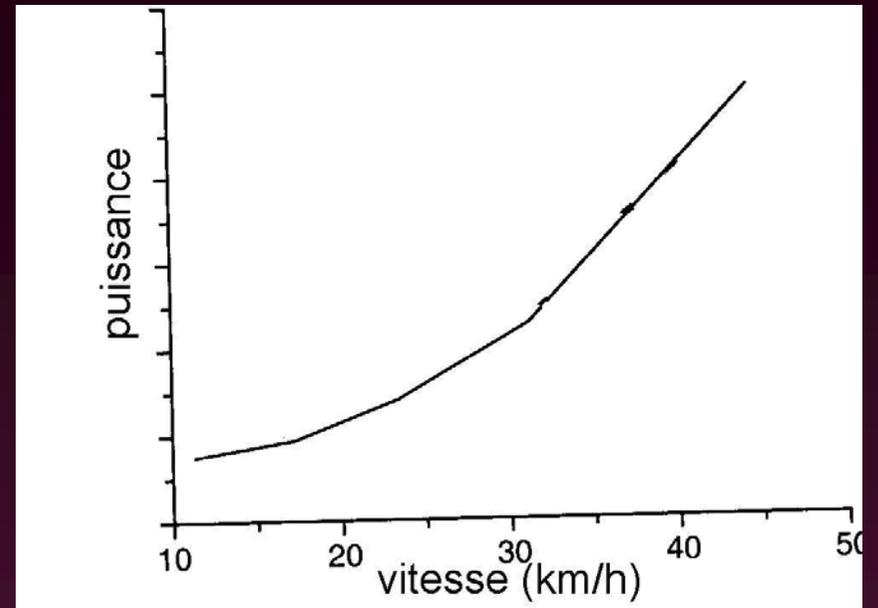
$C \approx 0,3$



$C \approx 0,6$

- Le coefficient de traînée varie en fonction de la **géométrie**
- Plus le coefficient de traînée est **faible**, plus les forces de frottement seront faibles

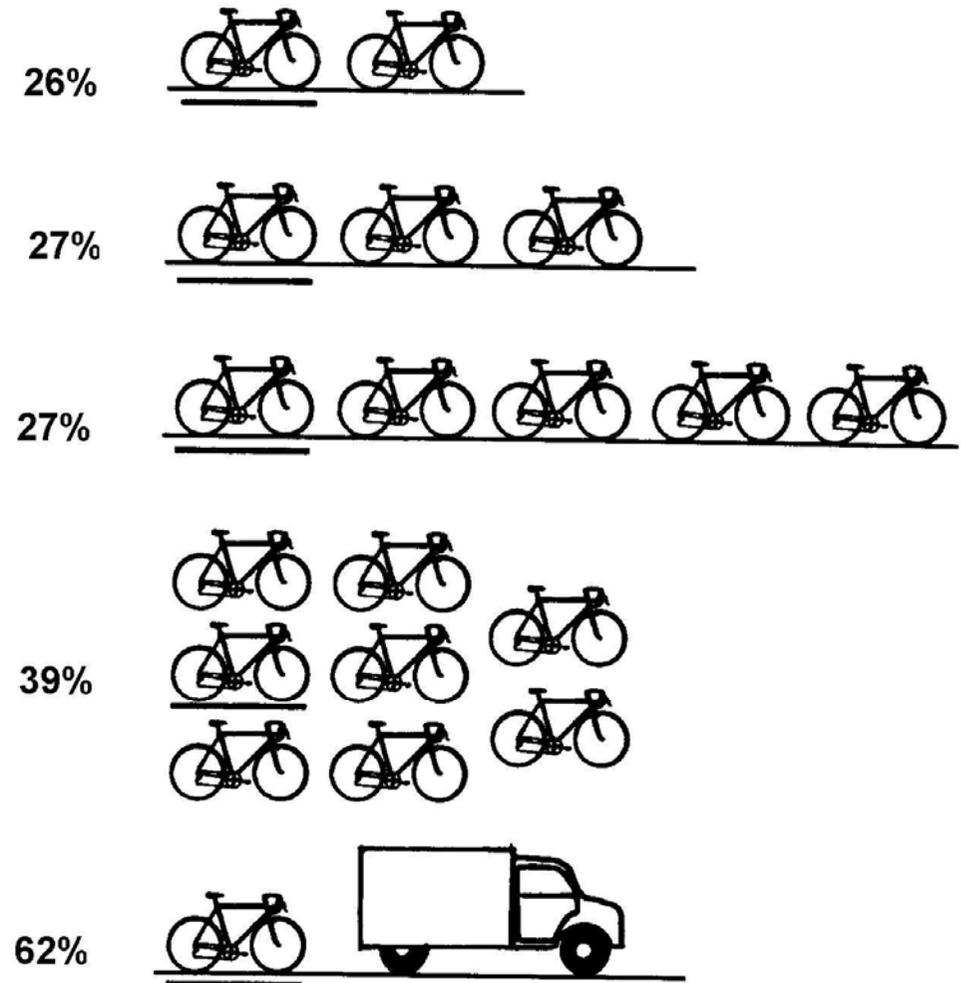
Frottement



Puissance requise à vélo en fonction de la vitesse: à partir de **20km/h** les frottements de l'air sont la principale source de dépense énergétique

Frottement

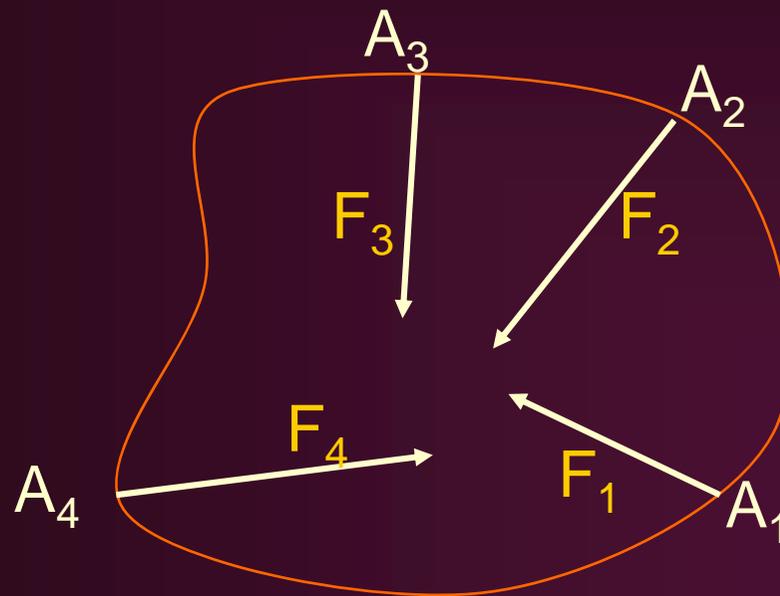
Economie d'énergie en cyclisme en fonction de la position dans le peloton



DETERMINATION DES EFFORTS MUSCULAIRES

Principe fondamental de la statique

Pour tout ensemble matériel S en équilibre par rapport à un repère galiléen R, la somme des forces appliquées sur S est nulle.

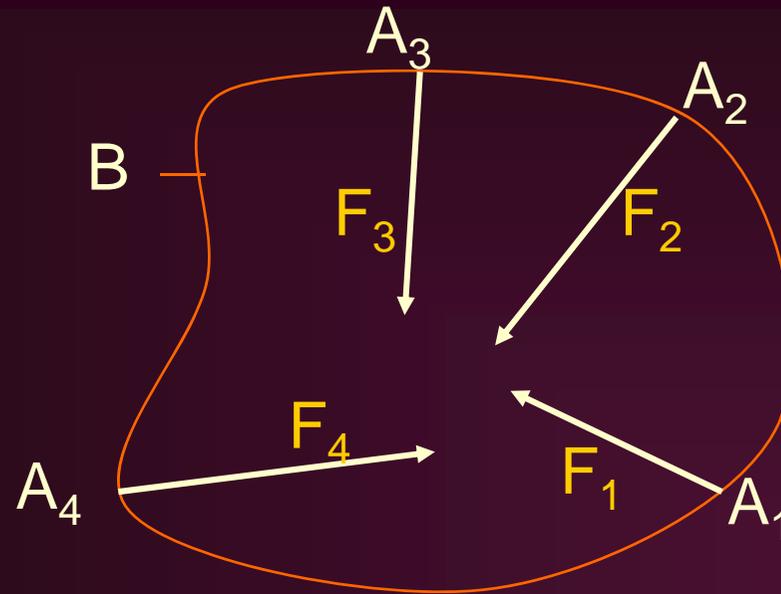


$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \dots = \vec{0}$$

Principe fondamental de la statique

Pour tout ensemble matériel S en équilibre par rapport à un repère galiléen R, la somme des moments des forces appliquées sur S est nulle.

(B quelconque)



$$M_B(\vec{F}_1) + M_B(\vec{F}_2) + M_B(\vec{F}_3) + M_B(\vec{F}_4) + \dots = 0$$

Soit

$$BA_1 \cdot F_1 \cdot \sin \alpha_1 + BA_2 \cdot F_2 \cdot \sin \alpha_2 + BA_3 \cdot F_3 \cdot \sin \alpha_3 + \dots = 0$$

Exemple: levier inter-appui

Système à l'équilibre: l'avant-bras

Résistance: 100 N (10 Kg)

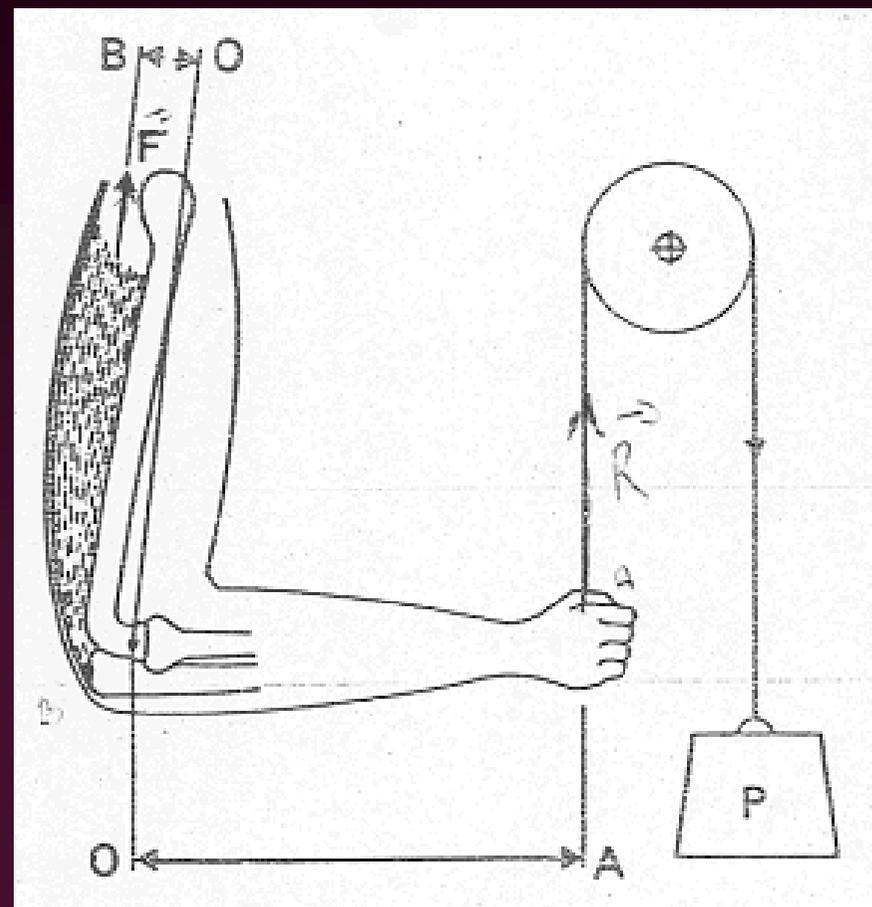
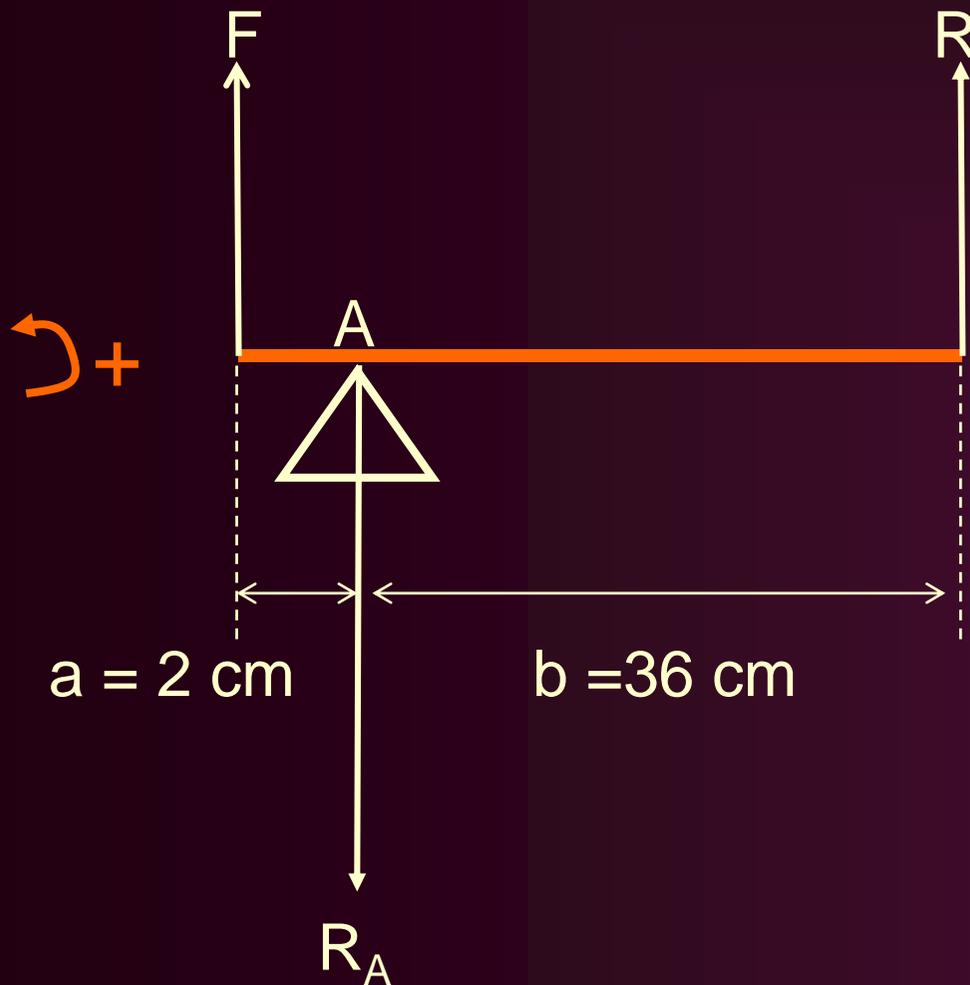


Figure: Système de levier inter-appui où F est la force musculaire du triceps et R la tension dans le câble. Le point d'appui est le centre articulaire du coude.

Exemple: levier inter-appui



Equilibre des forces

$$F + R_A + R = 0$$

$$R_A = -F - R$$

Equilibre des moments au point O

$$-F \cdot a + R \cdot b = 0$$

$$F \cdot a = R \cdot b$$

Soit ici: $F = R \cdot b / a = 18 \cdot R$

$$R = 100 \text{ N}$$

$$F = 1800 \text{ N}$$

$$R_A = -1900 \text{ N}$$

Exemple: levier inter-résistant

Systeme à l'équilibre: brouette

Résistance: 750 N (75 Kg)

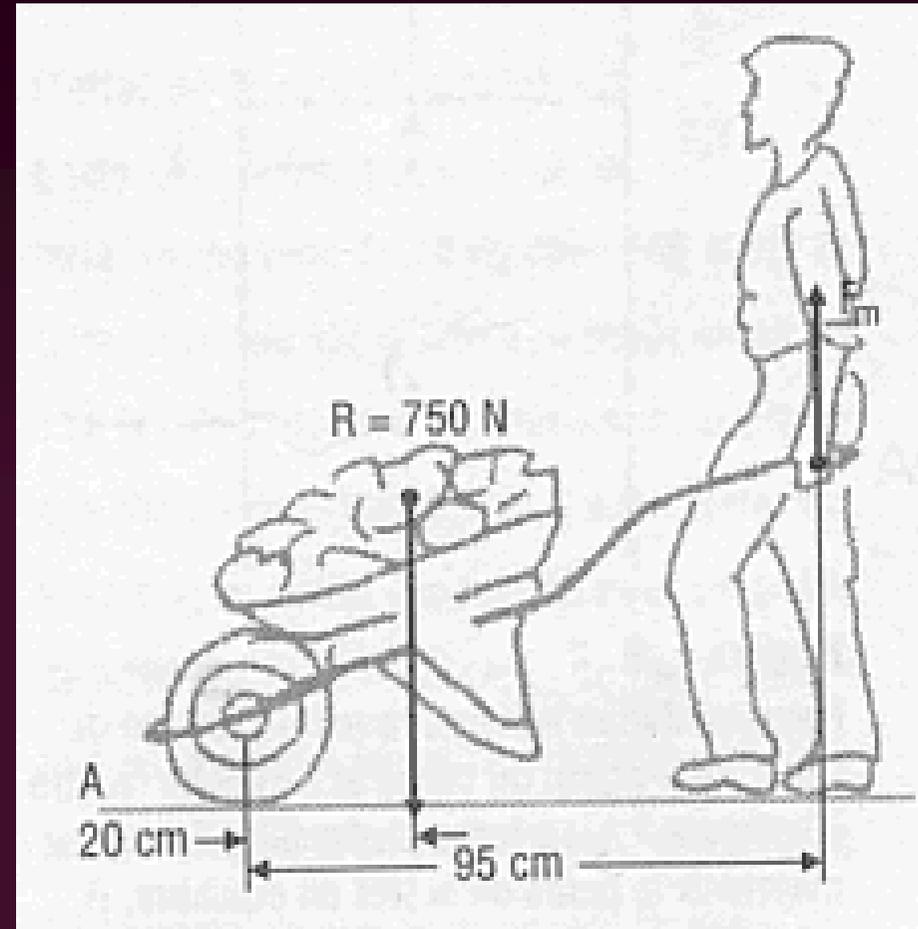
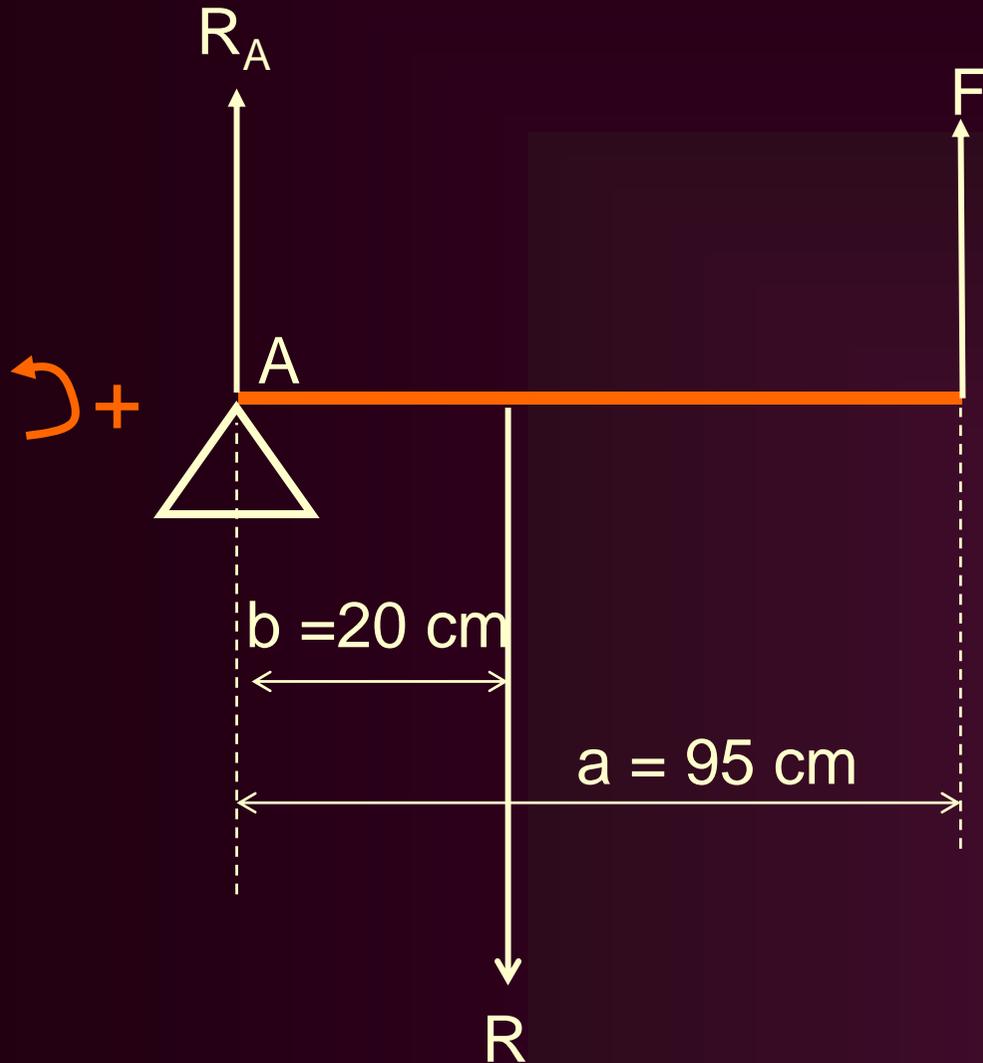


Figure: Systeme de levier inter-résistant où F est la force de traction des bras et R le poids de la brouette. Le point d'appui est le contact de la roue au sol.

Exemple: levier inter-résistant



Equilibre des forces

$$F_m + R + R_A = 0$$

$$R_A = R - F_m$$

Equilibre des moments au point A

$$F \cdot a - R \cdot b = 0$$

$$F \cdot a = R \cdot b$$

Soit ici: $F = R \cdot b / a = 0.21 \cdot R$

$$R = 750 \text{ N}$$

$$F = -158 \text{ N}$$

$$R_A = -592 \text{ N}$$

Exemple: levier inter-moteur

Système à l'équilibre: l'avant-bras

Résistance: 50 N (5 Kg)

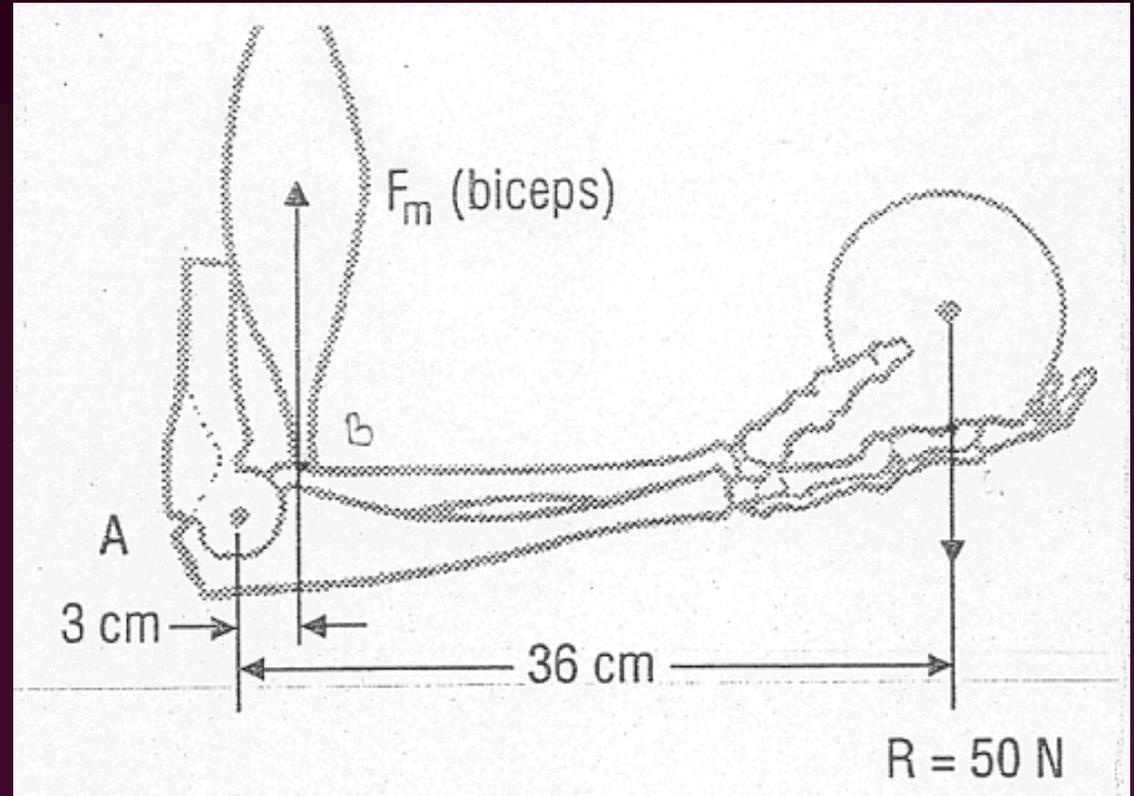
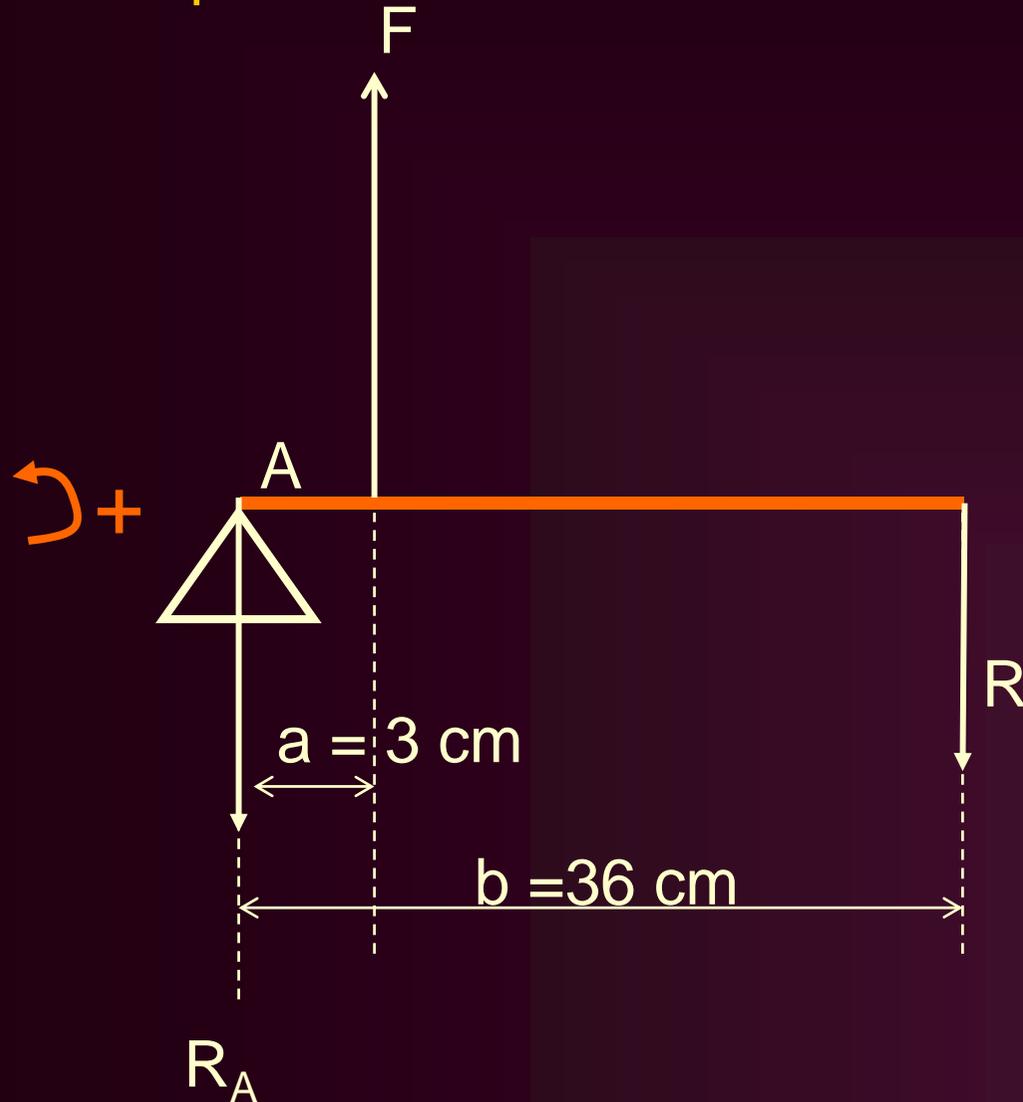


Figure: Système de levier inter-moteur où la force musculaire du biceps se situe entre le point d'appui A et le poids R de 50N.

Exemple: levier inter-moteur



Equilibre des forces

$$F + R_A + R = 0$$

$$F = -R - R_A$$

Equilibre des moments au point A

$$F \cdot a - R \cdot b = 0$$

$$F \cdot a = R \cdot b$$

$$\text{Soit ici: } F = 36/3 \cdot R_A = 12 \cdot R_A$$

$$R = -50 \text{ N}$$

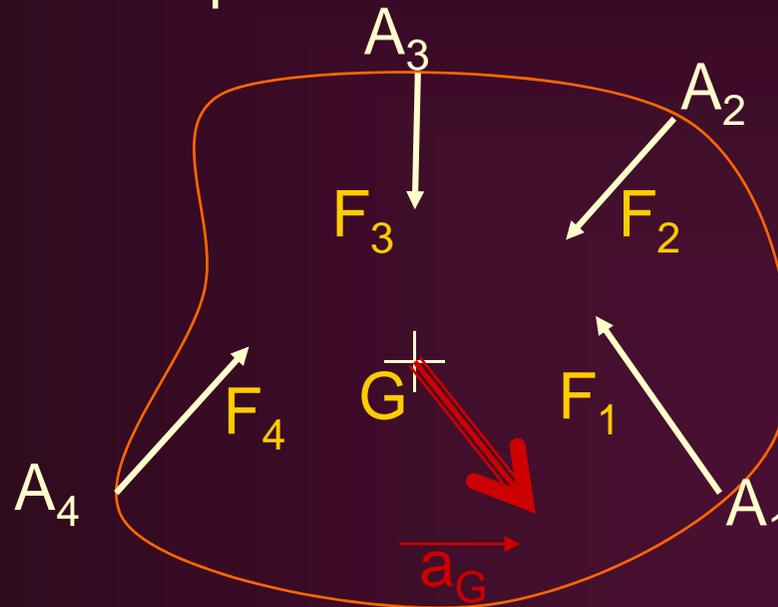
$$F = 600 \text{ N}$$

$$R_A = -550 \text{ N}$$

DYNAMIQUE

Principe fondamental de la dynamique

Pour tout ensemble matériel S en mouvement par rapport à un repère galiléen R, la somme des forces appliquées sur S est égal au produit de la masse de S par l'accélération de son centre de gravité.



$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \dots = m \cdot \vec{a}_G$$

2nd théorème de la Dynamique

La masse représente une résistance (un frein) à l'accélération linéaire:

$$m \cdot \vec{a}_G = \sum \vec{F} \quad \Longrightarrow \quad \vec{a}_G = \frac{\sum \vec{F}}{m}$$

Donc plus la masse est grande, plus l'accélération est faible

De la même façon, **le moment d'inertie** est un frein à l'accélération angulaire

Moment d'inertie

Pour les mouvements de rotation, la relation s'écrit:

$$\ddot{\alpha} = \frac{\sum M_A}{I_A} \implies I_A \cdot \ddot{\alpha} = \sum M_A$$

Ou :

| | |
|-----------------|--|
| $\ddot{\alpha}$ | est l'accélération angulaire |
| I_A | est le moment d'inertie au point A |
| $\sum M_A$ | est la somme des moments des forces au point A |

Les moments d'inertie s'expriment en kg.m^2

C'est la distribution de la masse par rapport à l'axe de rotation d'un solide modifie l'inertie de ce solide.

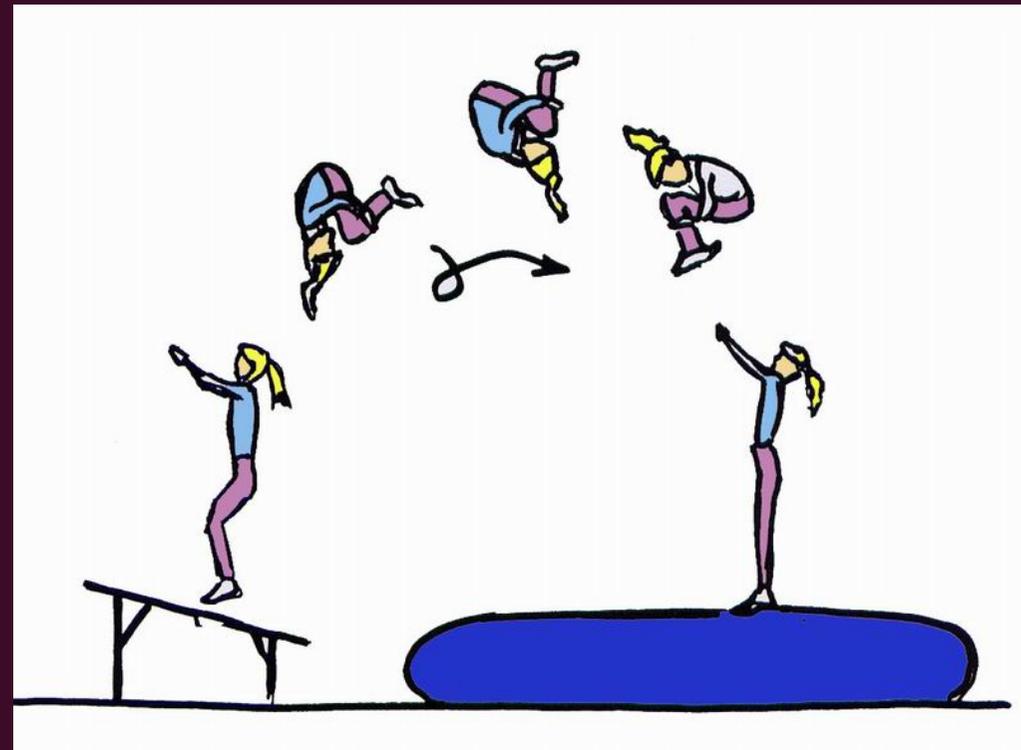


Le **moment d'inertie I** mesure la plus ou moins grande difficulté qu'un corps peut avoir pour tourner.

Moment d'inertie

Pour diminuer le moment d'inertie, il faut **rapprocher la masse** de l'axe de rotation

Exemple: patineuse, salto arrière



La gymnaste se recroqueville pour diminuer son moment d'inertie