



Cinétique pour l'analyse du mouvement: Principes & Méthodologies

Vincent POMERO (PhD)

Centre d'Analyse de Mouvement et Service Orthopédie Pédiatrique, Hôpital Timone-
Enfants, Marseille



Terminologie : Force

Principe fondamental de la dynamique:

$$F = m \cdot a$$

Notée par un vecteur

Exprimée en Newtons (N)



**Force due à la
gravitation: 30
N**

Définition de la cinématique

Cinématique: Description du mouvement
(position, vitesse, trajectoire, accélération...)

Cinétique: Étudie les causes du mouvement
(forces, moments, puissances, travail...)

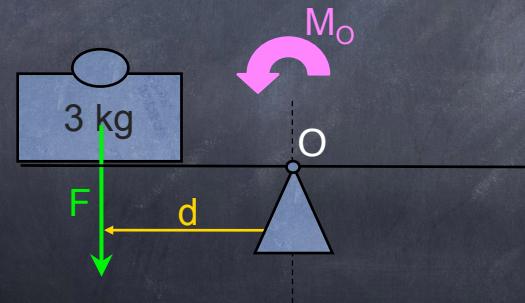
Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Terminologie : Moment

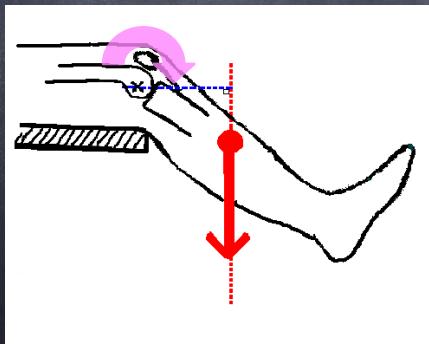
Défini par: $M_O = d \cdot F$

Exprimé en Newton*mètre (Nm)



Terminologie : Moment

$$M_O = d \cdot F$$



Un moment qui n'est pas contrebalancé produit une accélération angulaire autour de l'axe.

Terminologie : Puissance

Quantité d'énergie par unité de temps

Exprimé par:

$$P = M * \omega$$

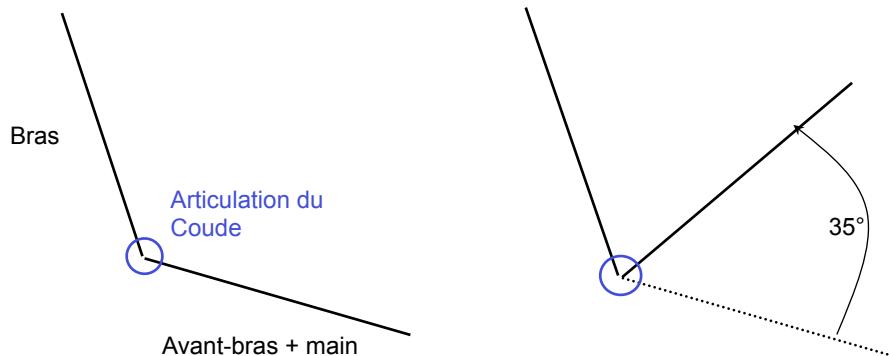
M: Moment (Nm)

ω : vitesse angulaire (rad/s)

P : Puissance, exprimée en Watt (W)

Définition de la cinématique

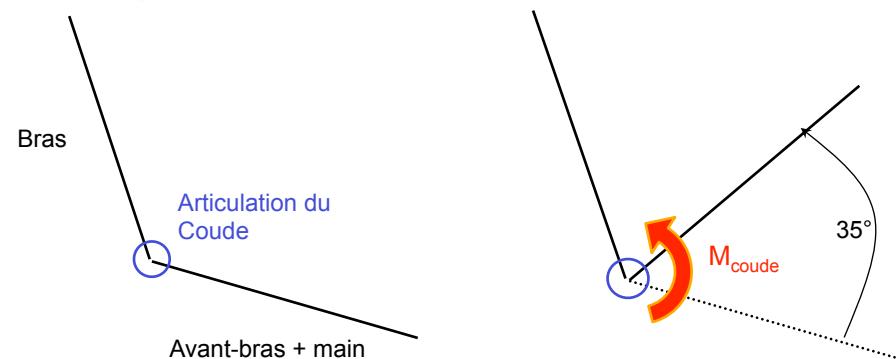
Exemple: Flexion du coude



Cinématique: On observe une flexion du coude de 35°

Définition de la cinématique

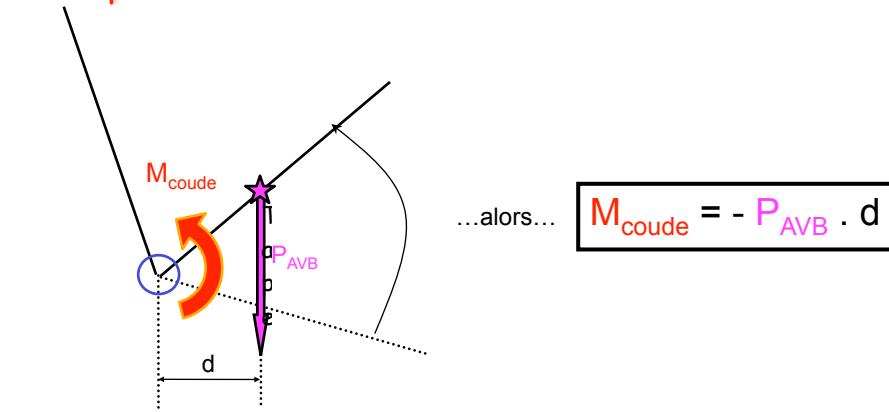
Exemple: Flexion du coude



Cinématique: Pour permettre ce mouvement, il faut que le système musculaire exerce un moment M_{coude} , pour contrecarrer l'effet de la pesanteur sur l'avant bras...

Définition de la cinétique

Exemple: Flexion du coude



Comment est calculé M_{coude} ?

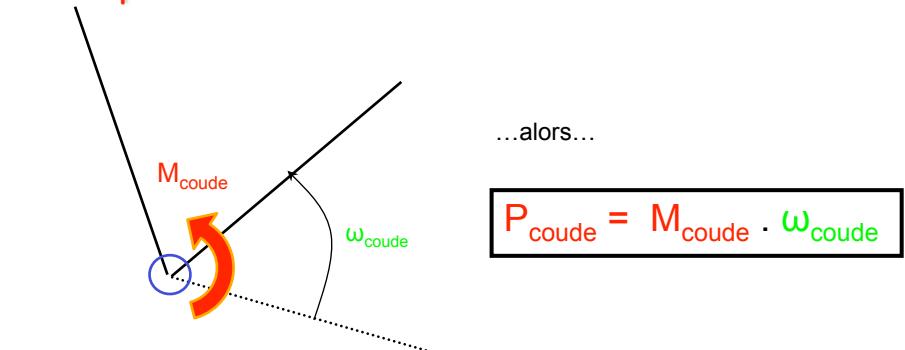
- Dépend du lieu du centre de masse de l'avant bras + main
- Dépend du poids de l'avant bras + main => P_{AVB}

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Définition de la cinétique

Exemple: Flexion du coude



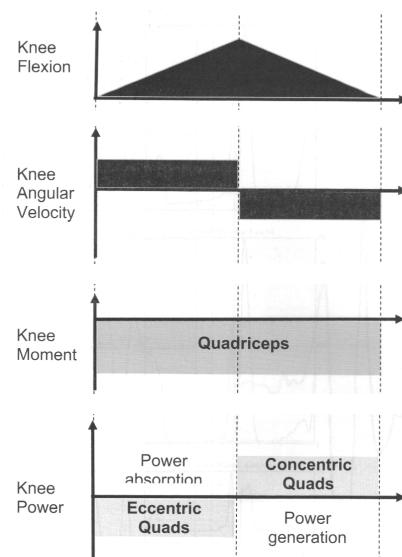
Comment est calculé P_{coude} ?

- Dépend du moment M_{coude}
- Dépend de la vitesse de rotation du coude ω_{coude}
(ex: 35° de flexion en 1 seconde)

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Relations cinématique - cinétique



Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

La cinétique dans l'AQM

Mise en œuvre

Analyse du vecteur

Les grandeurs calculées dans le rapport

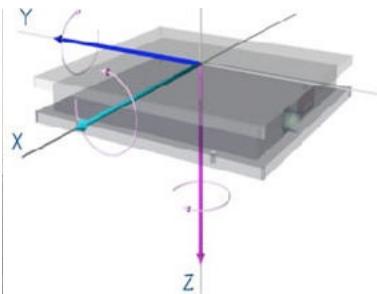
Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Mise en œuvre

Plateformes de force:

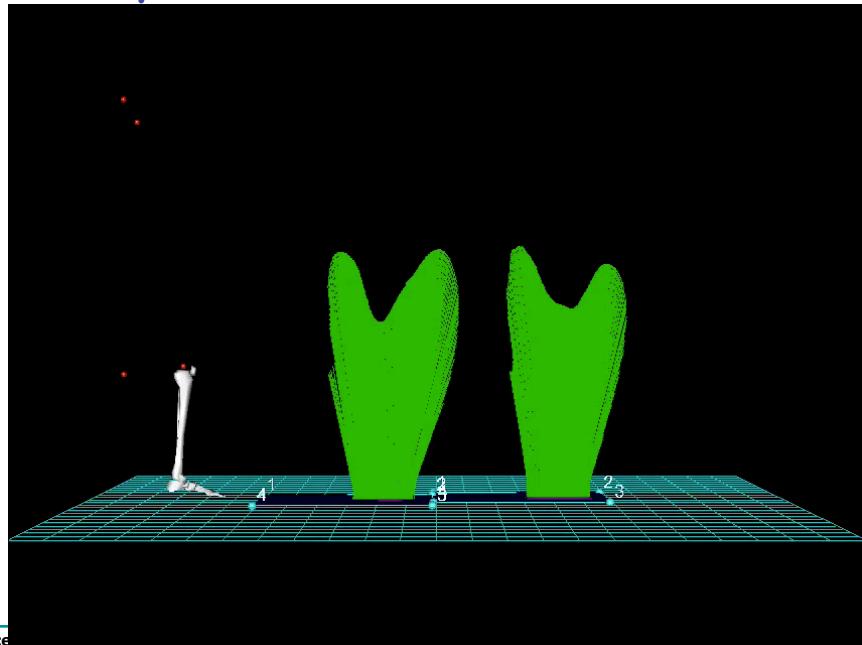
Enregistrement des efforts qu'exerce le sujet sur le sol



Vincent POMERO

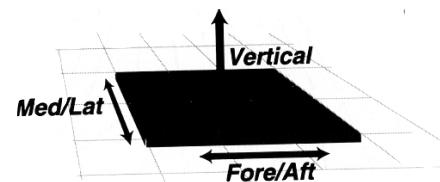


Analyse du vecteur

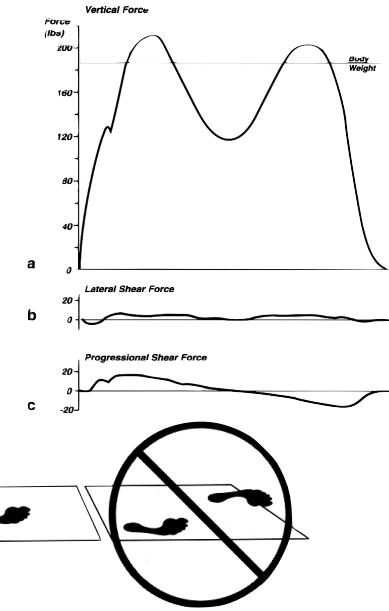


Vincent POMERO

Mise en œuvre



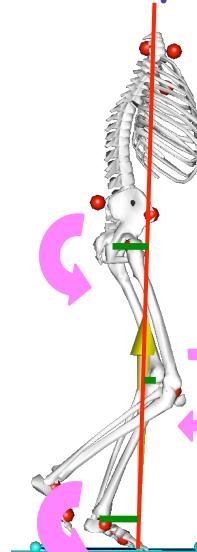
Vincent POMERO



DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Analyse du vecteur

Où passe le vecteur par rapport aux centres articulaires ?



Hanche: vecteur en avant

=> Moment d'extension de hanche nécessaire

Genoux: vecteur en arrière (un peu...)

=> Léger moment d'extension de genou nécessaire

Cheville: vecteur en avant

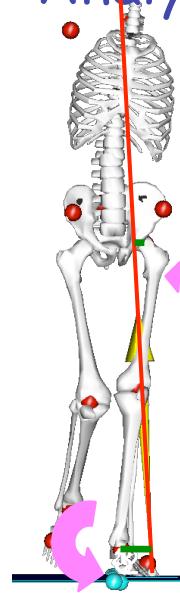
=> Moment de flexion plantaire de cheville nécessaire

Plan sagittal

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Analyse du vecteur



- Où passe le vecteur par rapport aux centres articulaires ?

Hanche: vecteur en dedans (un peu...)
=> Léger moment d'abduction de hanche nécessaire

Genoux: le vecteur passe par le centre
=> Aucun effort musculaire nécessaire dans ce plan d'analyse (à cet instant)

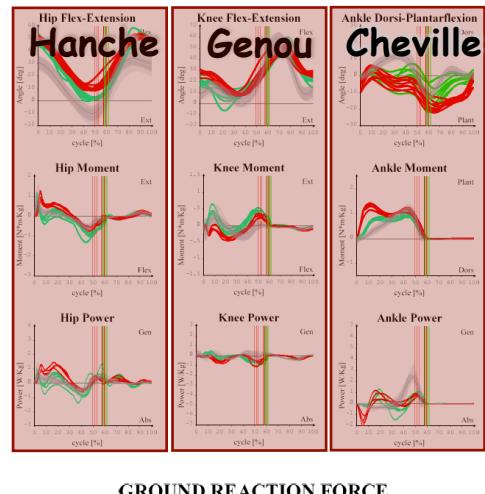
Cheville: vecteur en dehors
=> Moment de varisation de cheville nécessaire

Plan frontal

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

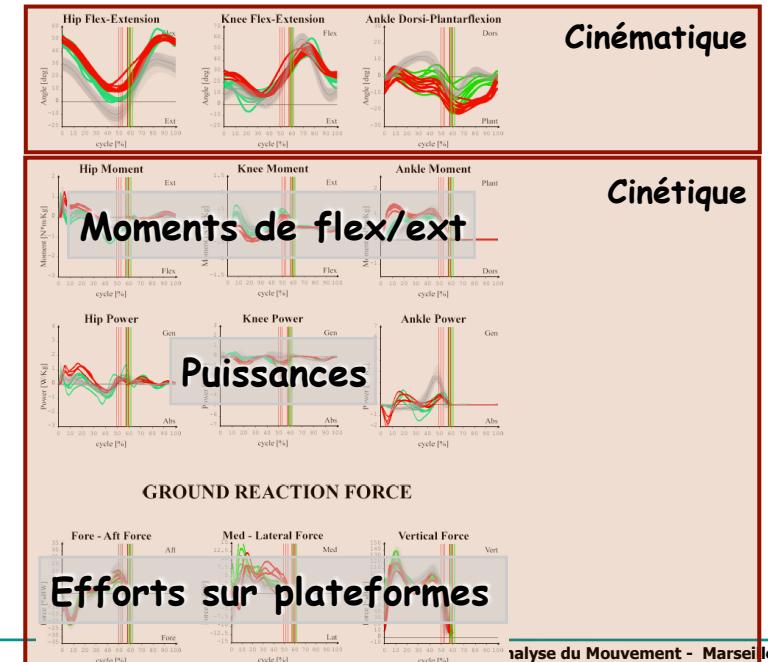
Les grandeurs calculées dans le rapport



Vincent POMERO

Analyse du Mouvement - Marseille

Les grandeurs calculées dans le rapport



Vincent POMERO

Analyse du Mouvement - Marseille

Actions musculaire vs. Efforts externes

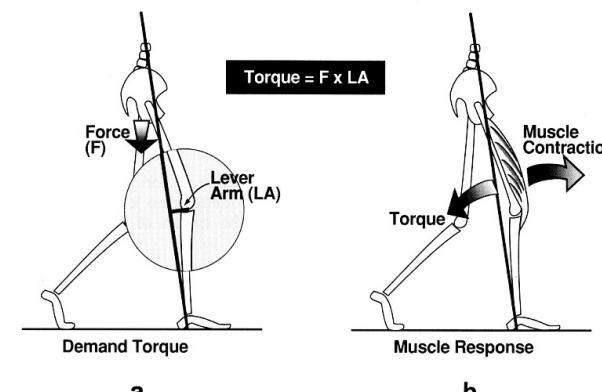


Figure 19.9 Sagittal vector at the knee. (a) Demand torque, vector alignment behind knee creates a flexor torque. (b) Response torque, joint stability is preserved by the quadriceps creating an equal extensor torque.

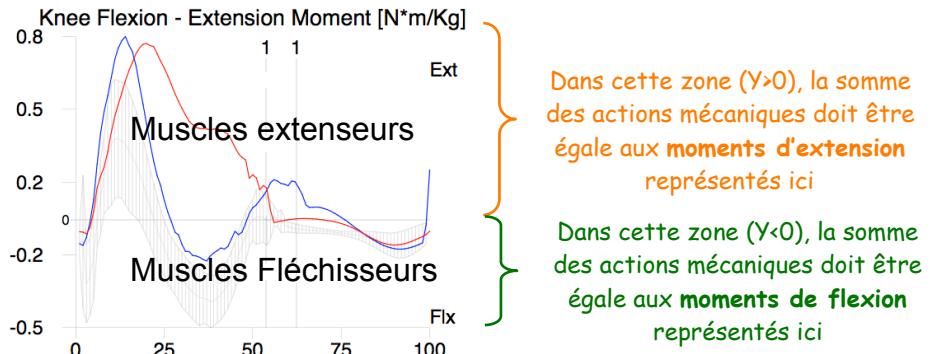
Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Que représentent les moments dans les rapports d'AQM?

CONVENTION analyse de la marche:

'C'est le **moment total à produire par le corps** pour décrire cinétiquement le mouvement observé'



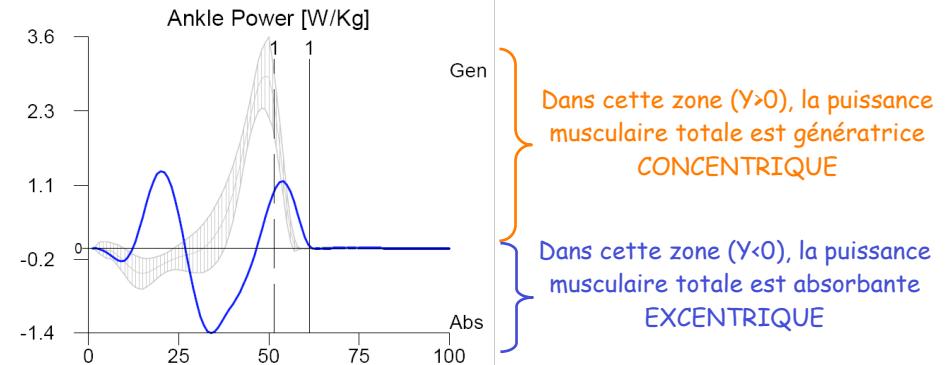
Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Que représentent les puissances dans les rapports d'AQM?

CONVENTION analyse de la marche:

'C'est la **puissance totale à produire par le corps** pour décrire le mouvement observé'

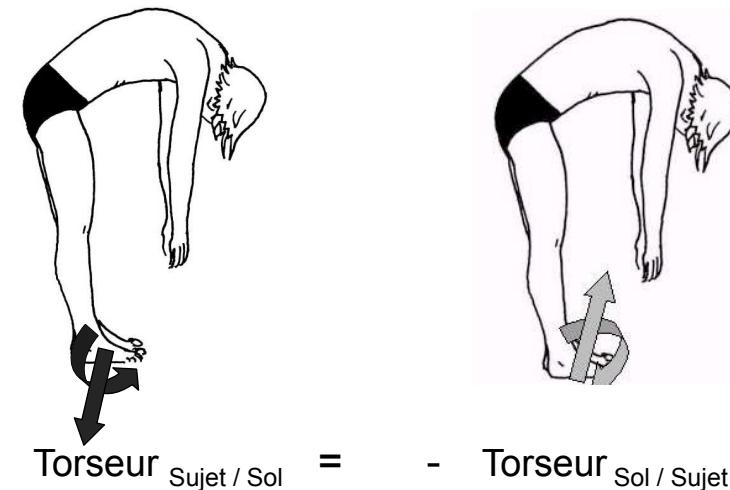


Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Formulation du problème

Exemple: Calculs pour le rachis.



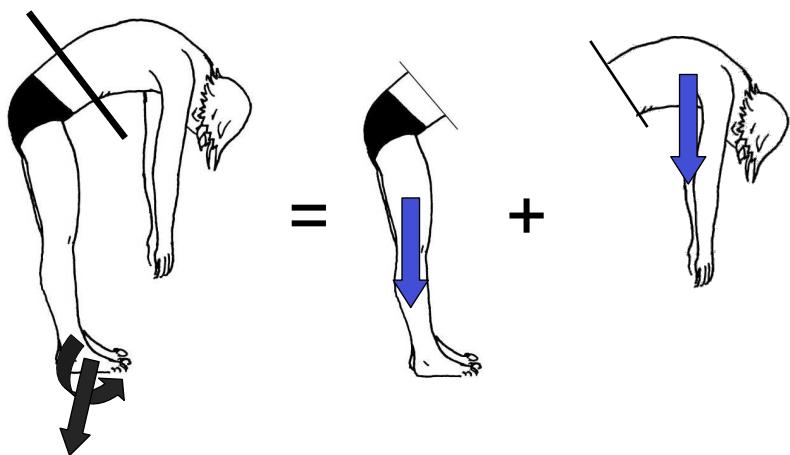
Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

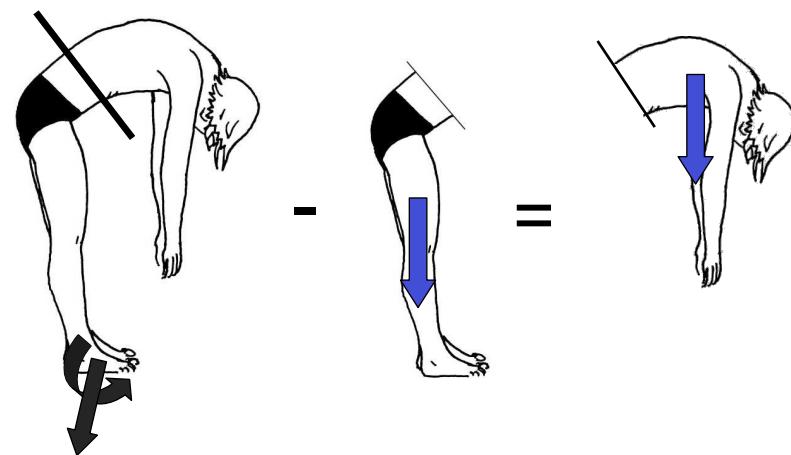
Formulation du problème



Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

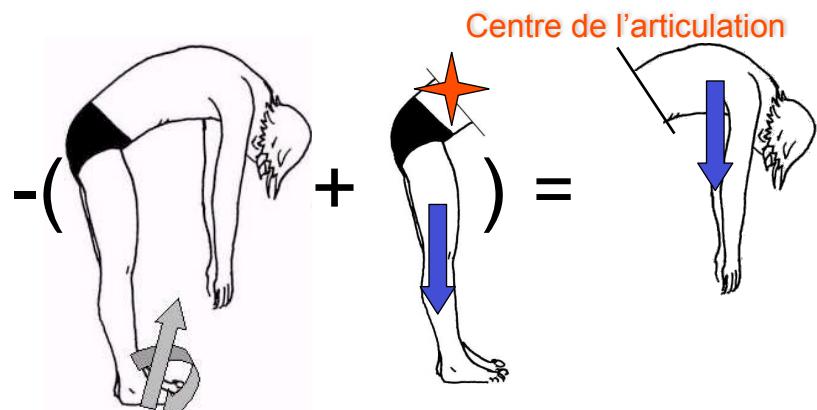
Formulation du problème



Vincent POMERO

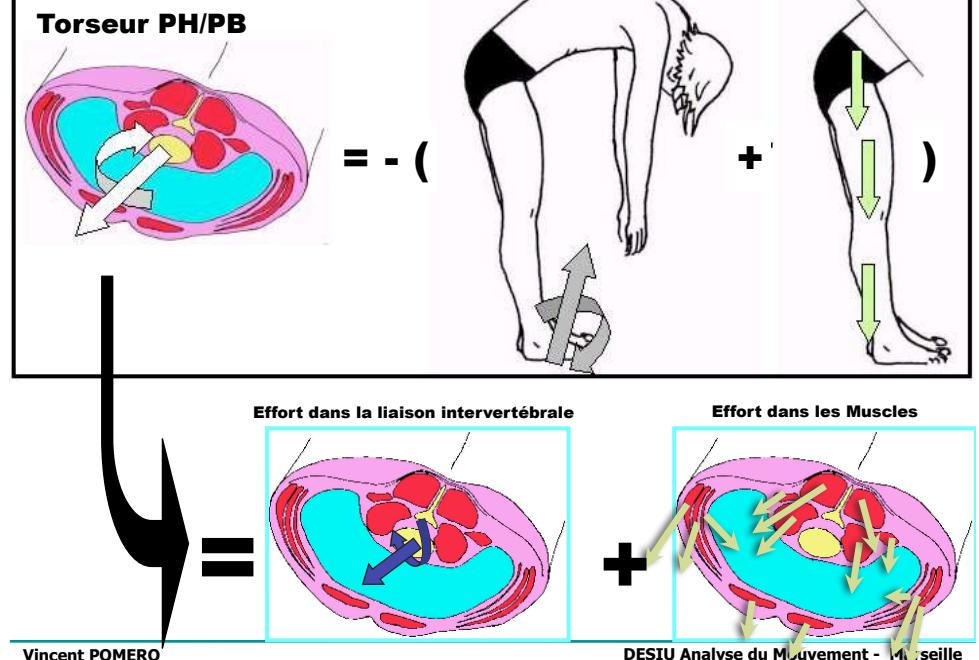
DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Formulation du problème



Vincent POMERO

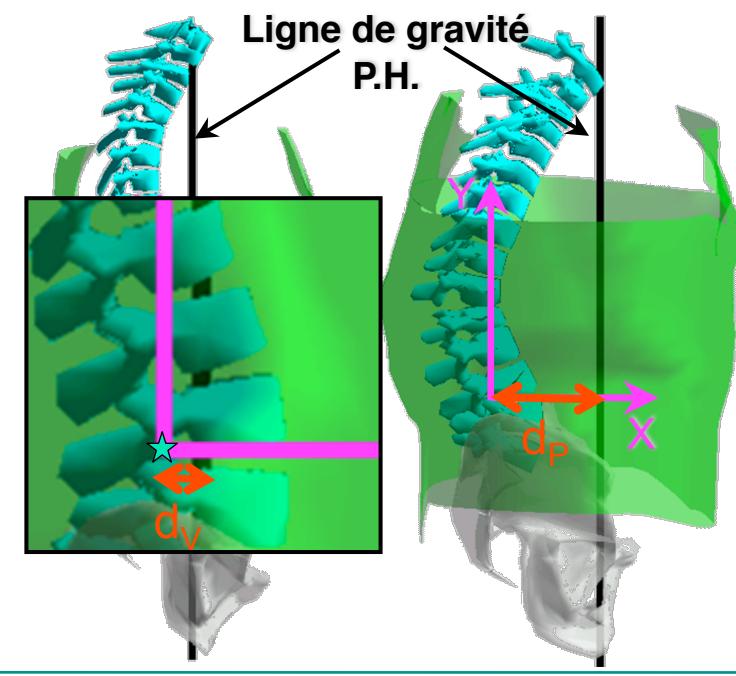
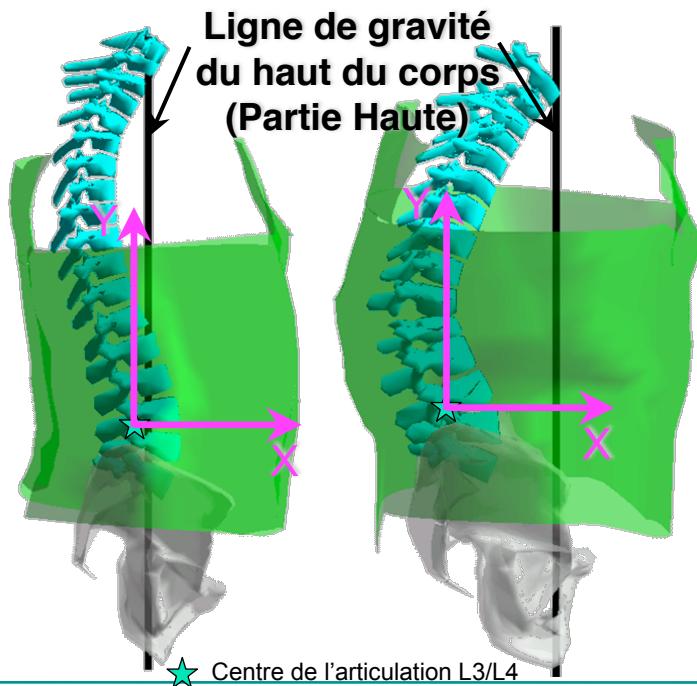
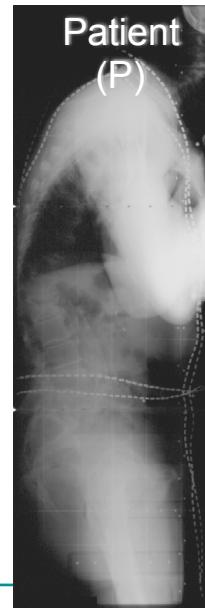
DESIU Analyse du Mouvement - Marseille



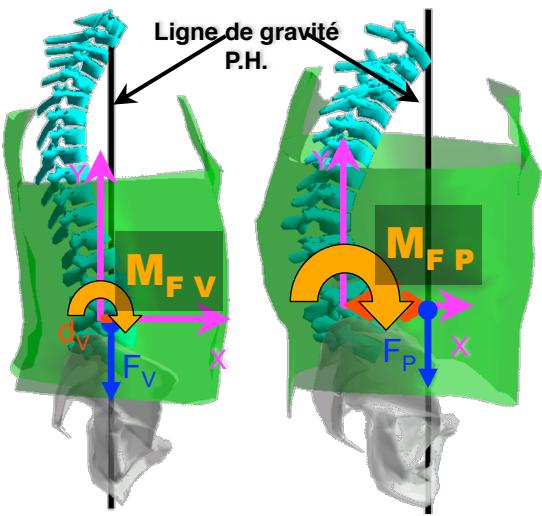
Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Position du problème



Quel est le moment de flexion (M_F) chez les deux sujets ?



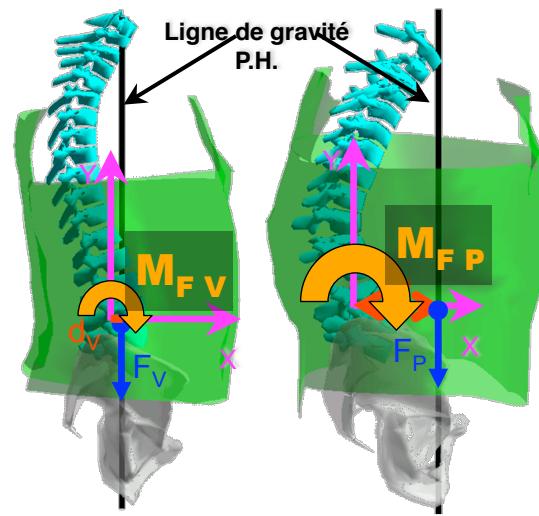
Données:

$$d_v = 1 \text{ cm}$$

$$d_p = 10 \text{ cm}$$

$$F_v = F_p = 350 \text{ N}$$

Quel est le moment de flexion (M_F) chez les deux sujets ?



Données:

$$d_v = 1 \text{ cm}$$

$$d_p = 10 \text{ cm}$$

$$F_v = F_p = 350 \text{ N}$$

Résultats:

$$M_F = d \wedge F$$

Soit, pour le volontaire:

$$M_{F_V} = 3.5 \text{ Nm}$$

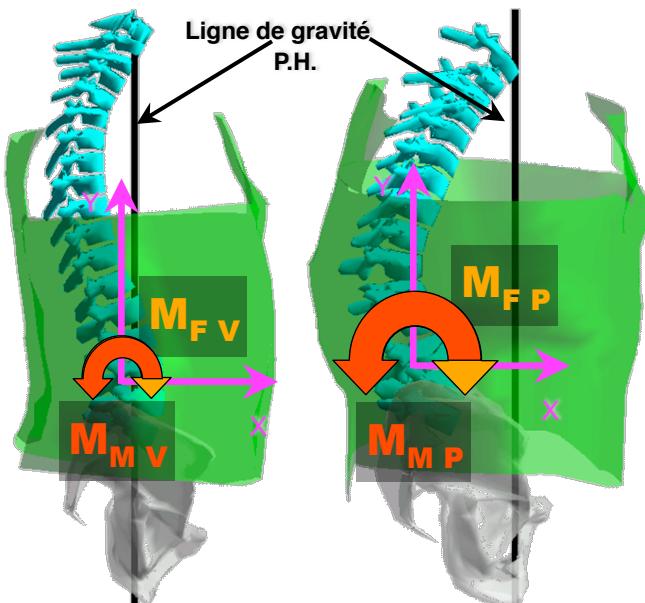
Et pour le patient:

$$M_{F_P} = 35 \text{ Nm}$$

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Action des muscles érecteurs pour maintenir la posture ?



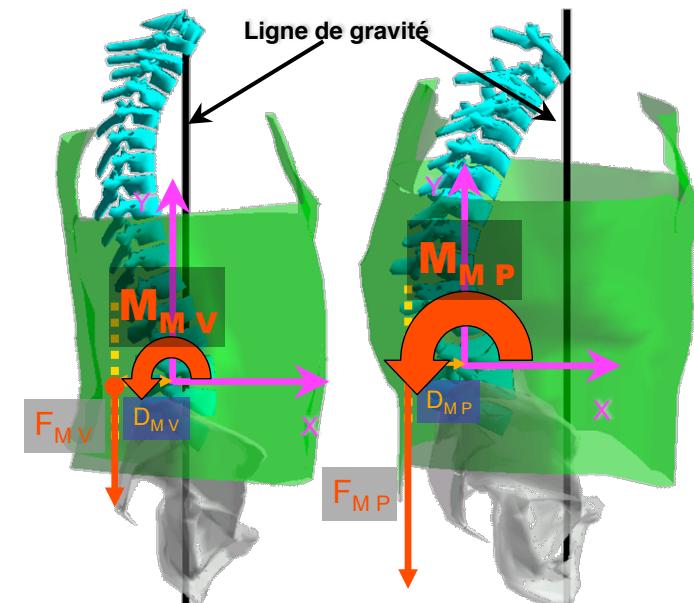
Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

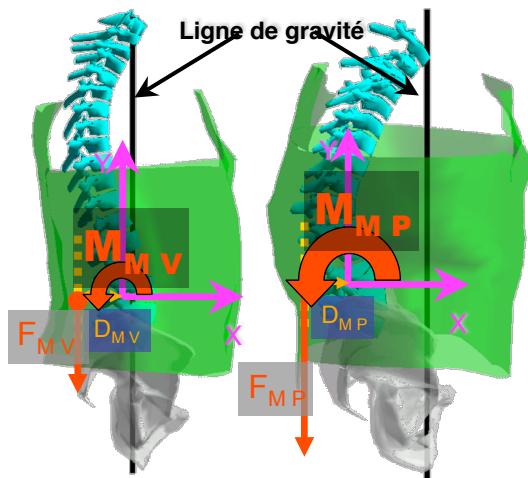
Action des muscles érecteurs pour maintenir la posture ?



Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Action des muscles érecteurs pour maintenir la posture ?



Données:

$$D_{MV} = D_{MP} = 5 \text{ cm}$$

Résultats:

$$M_F = d \wedge F$$

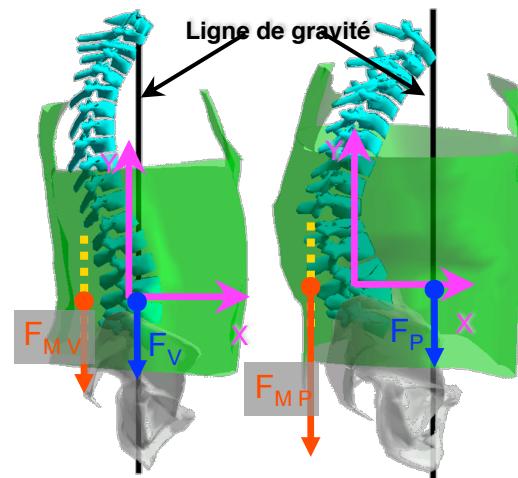
Soit, pour le volontaire:

$$F_{MV} = 70 \text{ N}$$

Et pour le patient:

$$F_{MP} = 700 \text{ N}$$

Quelle est la compression intervertébrale associée ?



Résultats:

$$F_{CIV} = F_M + F_{Poids}$$

Soit, pour le volontaire:

$$F_{cIVV} = 70 + 350 = 420 \text{ N}$$

Et pour le patient:

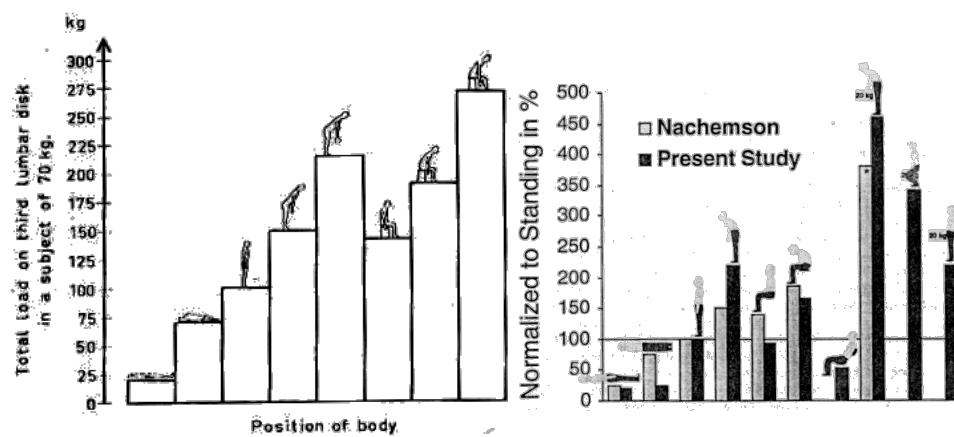
$$F_{MP} = 700 + 350 = 1050 \text{ N}$$

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Effort de compression in vivo?

Expérience: Mesure de la pression intradiscale, pour différentes postures
(Nachemson 1965, Wilke 2001)



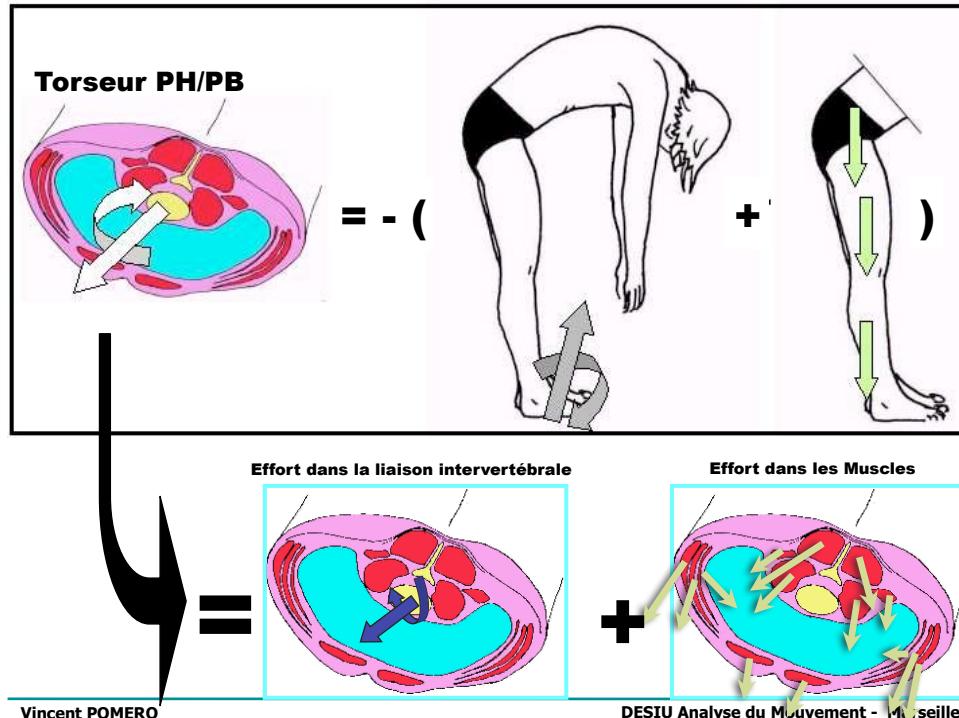
Un peu plus proche de la réalité...

Vincent POMERO

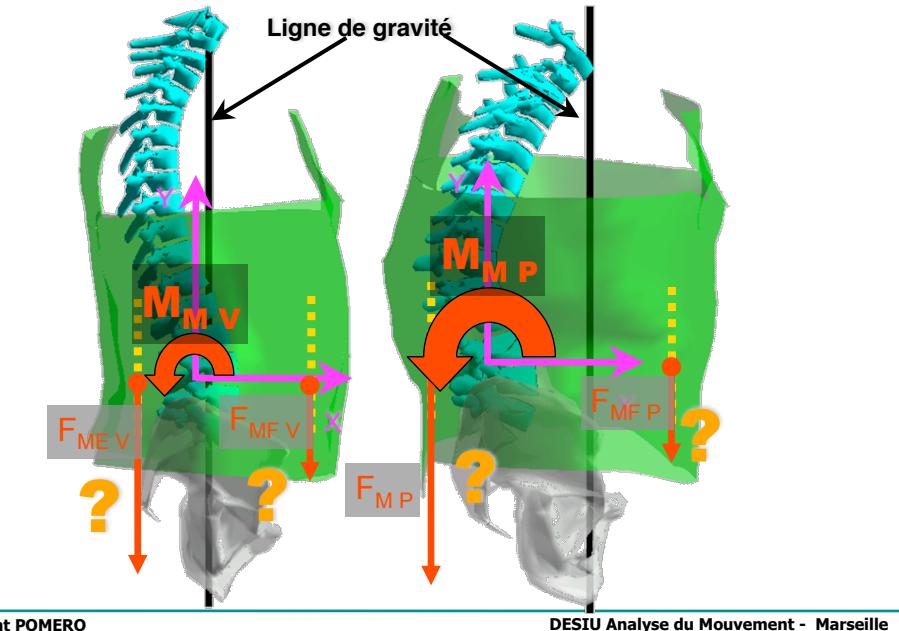
DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Vincent POMERO

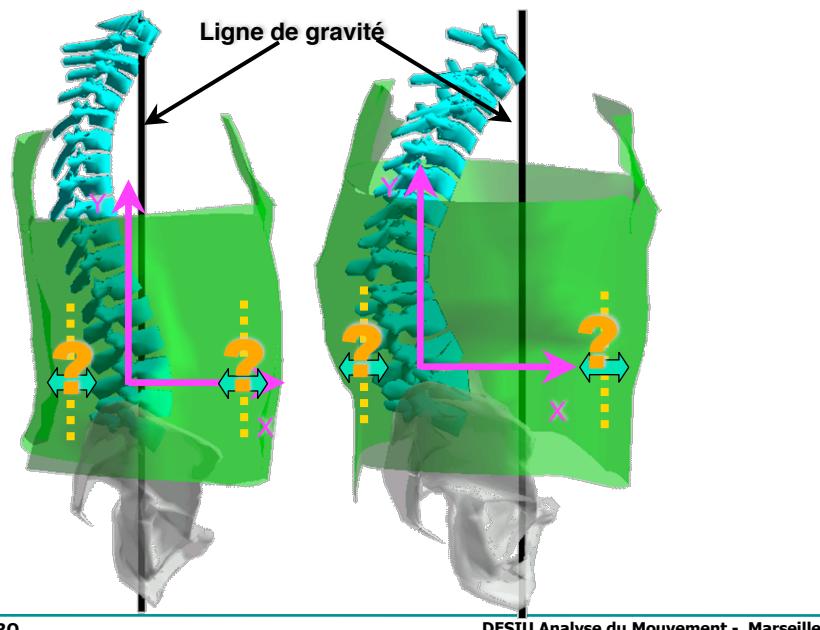
DESIU Analyse du Mouvement - Marseille



Problème de la REDONDANCE MUSCULAIRE

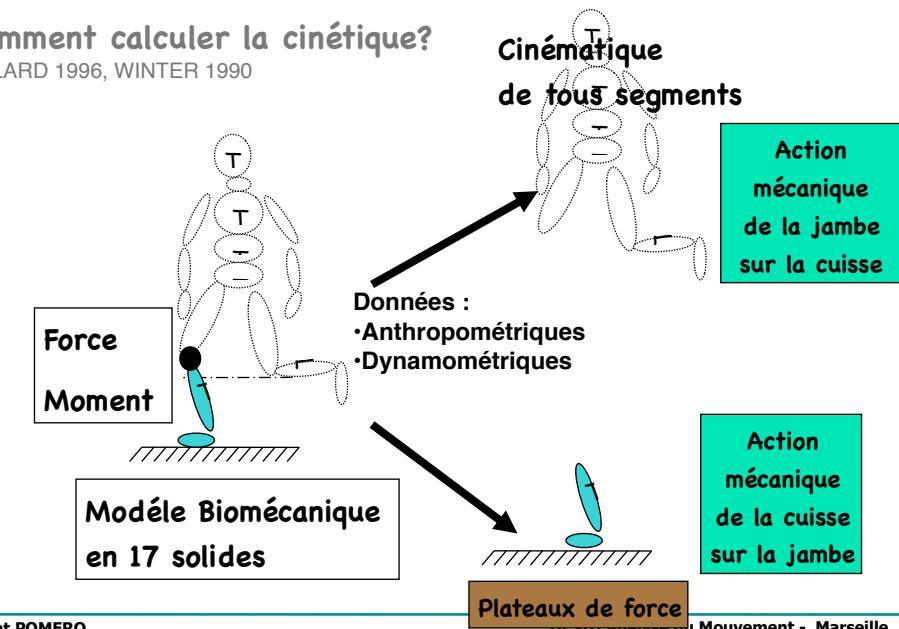


Problème de la GEOMETRIE MUSCULAIRE



Exemple du genou

Comment calculer la cinétique?
ALLARD 1996, WINTER 1990



Formalisation

La « Statique / Dynamique inverse »

On isole Jambe + pied

On distingue les torseurs des actions mécaniques:

de la cuisse sur la jambe

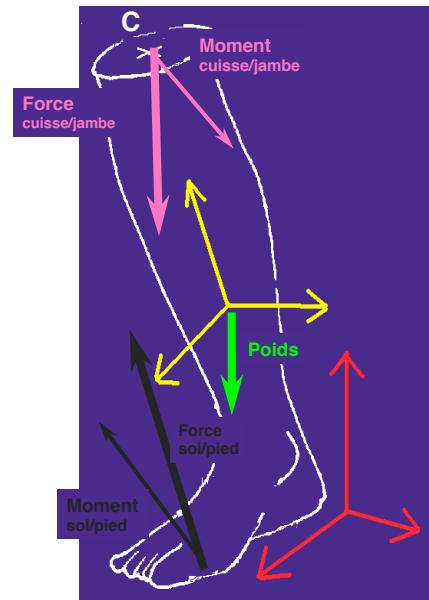
du sol sur le pied

de la pesanteur



Plateformes de

Vincent POMERO



DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Principe fondamental de la dynamique

Dans le repère du tibia

Somme des forces

$$\mathbf{F}_{\text{cuisse/jambe}} = -\mathbf{F}_{\text{sol/pied}} - \mathbf{Poids}$$

Somme des moments au point d'application C (centre des épicondyles)

$$(M_{\text{cuisse/jambe}})_C = -(M_{\text{sol/pied}})_C - (M_{\text{poids}})_C$$

Mais comment calcule-t-on le poids des segments ?

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Tables anthropométriques

Caractéristiques des segments corporels:

Étude sur des 'volontaires' de l'US Air Force...

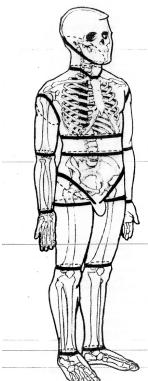
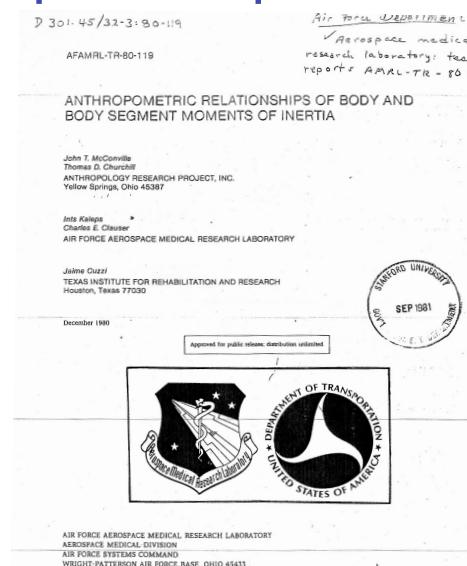


Figure 1. Total body segmentation scheme.



Vincent POMERO

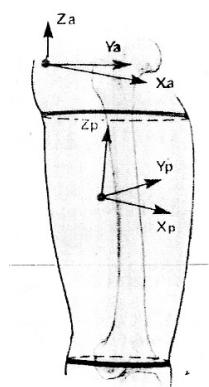
DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Tables anthropométriques

Volume = f(masse, taille)

d'où est calculé la masse du segment...

Moments d'inertie = f(masse, taille)



RIGHT THIGH MINUS FLAP REGRESSION EQUATIONS					
RIGHT THIGH MINUS FLAP VOLUME AND MOMENTS FROM STATURE AND WEIGHT					
STATURE	WEIGHT	CONSTANT	R	SE	EST
107.10	1,108	- 2,358,875	.931	.12.1%	
69.11 +	1,121	- 2,416,129	.934	.11.6%	
46.66 +	1,034	- 259,580	.945	.9.5%	
X MOMENT = 15,627 + 1,108 - 2,358,875 .931 12.1%					
Y MOMENT = 16,944 + 1,121 - 2,416,129 .934 11.6%					
Z MOMENT = 1,013 + 1,034 - 259,580 .945 .9.5%					
RIGHT THIGH MINUS FLAP VOLUME FROM STATURE, MOTHIGH C THIGH LENGTH CONSTANT R SE EST					
107.10	156.19	- 42,565.54	.925	.6.5%	
69.11 +	156.99 +	- 14,986.59	.966	.9.5%	
46.66 +	156.99 +	- 13,397.57	.971	.4.3%	
RIGHT THIGH MINUS FLAP X MOMENT FROM STATURE, MOTHIGH C THIGH LENGTH CONSTANT R SE EST					
107.10	21,188	- 2,769,242	.929	.12.1%	
69.11 +	21,454	- 2,497,060	.934	.11.0%	
46.66 +	21,481 +	- 16,808	.957	.7.9%	
RIGHT THIGH MINUS FLAP Y MOMENT FROM STATURE, MOTHIGH C THIGH LENGTH CONSTANT R SE EST					
107.10	21,188	- 2,555,672	.943	.10.7%	
69.11 +	21,454	- 2,657,796	.958	.9.7%	
RIGHT THIGH MINUS FLAP Z MOMENT FROM HEIGHT, MOTHIGH C STATURE CONSTANT R SE EST					
2,110	9,661	- 132,107	.943	.9.5%	
1,265 +	9,988 +	- 494,084	.964	.7.4%	
657 +	1,275	- 663,819	.971	.7.1%	

*SE EST EXPRESSED AS A PERCENTAGE OF THE MEAN

MOMENTS IN GM-CM-SQUARED
VOLUMES IN CUBIC CM
SKINFOLDS IN MM
WEIGHT IN POUNDS
ALL OTHER VALUES AND DISTANCES IN CM

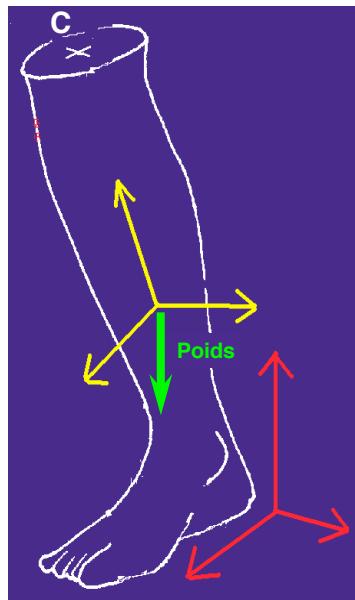
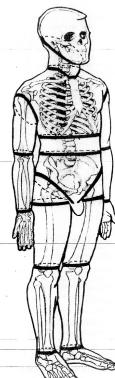
DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Formalisation

La « Statique / Dynamique inverse »

on isole la jambe + pied
on distingue le torseur de l'action
mécanique :

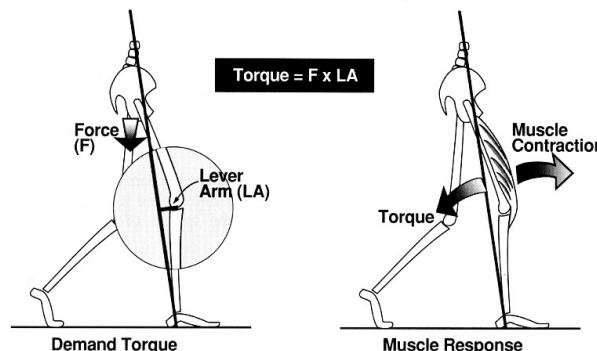
de la pesanteur



Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Actions musculaire vs. Efforts externes



Somme des efforts externes \leftrightarrow Somme des efforts internes

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Principe fondamental de la dynamique

Dans le repère du tibia

Somme des forces

$$F_{\text{cuisse/jambe}} = -F_{\text{sol}} \text{ OK} - F_{\text{ext}} \text{ OK}$$

Somme des moments au point d'application C (centre des épicondyles)

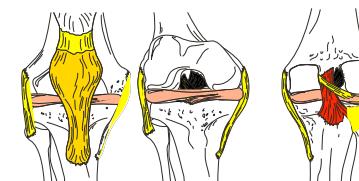
$$(M_{\text{cuisse/jambe}})_C = -(M_{\text{sol}})_{\text{OK}} - (M_{\text{ext}})_C \text{ OK}$$

J'ai donc calculé la résultante des efforts externes au niveau du genou...

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Les Ligaments et Ménisques



- latéral interne (collatérale tibiale)
- latéral externe (collatérale fibulaire)
- croisé antérieur (cruciatum anterius)
- croisé postérieur (cruciatum posterius)
- Tendon rotulien
- Menisque

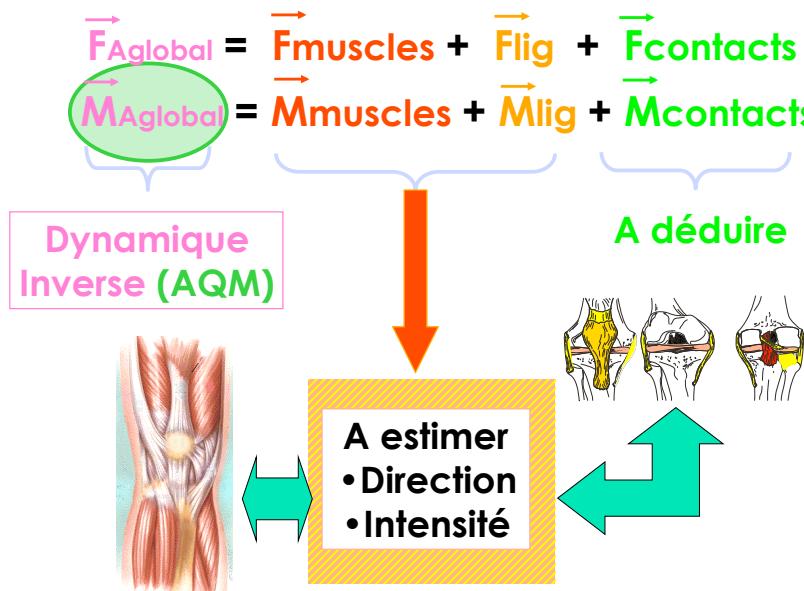
Les Muscles



- Couturier (sartorius)
- le tenseur du fascia lata (tensor fasciae latae)
- droit interne (gracilis)
- ischio-jambiers : demi-membraneux (semi-menbranosus)
demi-tendineux (semi-tendinosus)
bicep fémoral (biceps femoris)
- poplité (popliteus)
- quadriceps : droit antérieur (rectus femoris)
vaste externe (vastus lateralis)
vaste interne (vastus medialis)
- le crural (vastus intermedius)
- le jumeau interne et externe (gastrocnemius)
- le plantaire grêle (plantaris)

Vincent POMERO

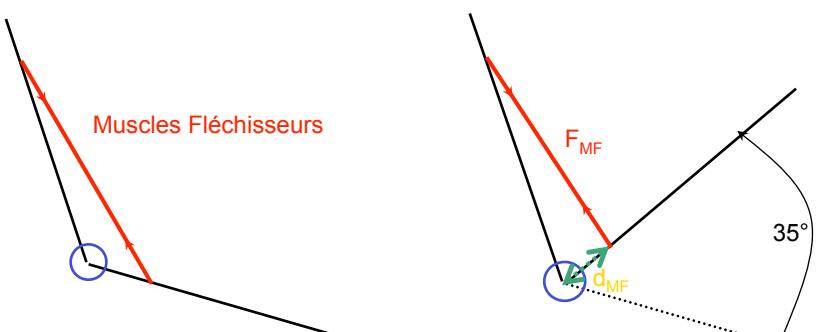
DESIU Analyse du Mouvement - Marseille



Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

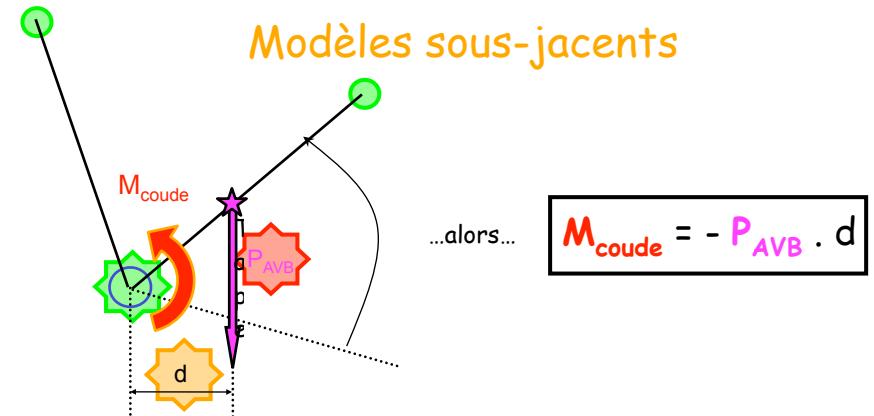
Comment interpréter les moments donnés par l'AQM ?



$$M_{\text{coude}} = d_{MF} \cdot F_{MF} \quad \rightarrow \quad F_{MF} = M_{\text{coude}} / d_{MF}$$

Protocole cinétique:

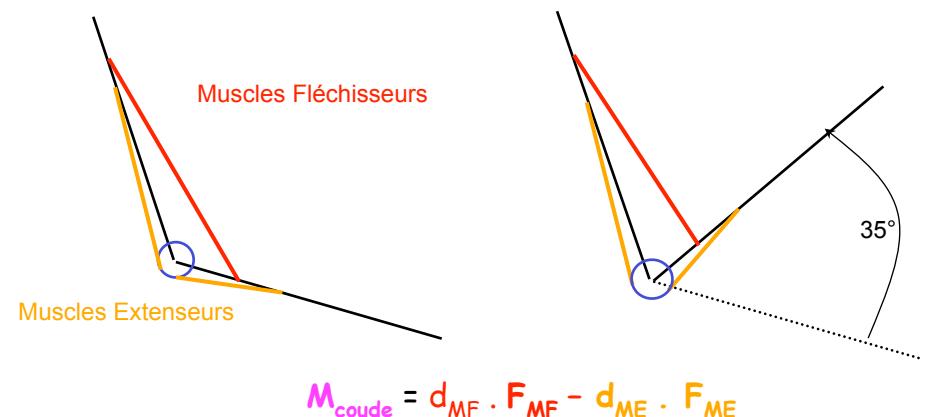
Modèles sous-jacents

Comment est calculé M_{coude} ?

- Dépend du lieu du centre de masse de l'avant bras + main
- Dépend du poids de l'avant bras + main $\Rightarrow P_{AVB}$
- De la position des segments dans l'espace

A déterminer...
Cinématique

Comment interpréter les moments donnés par l'AQM ?



On a une infinité de solutions possibles...
On ne sait pas dire la contribution de chaque groupe musculaire...

Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Vincent POMERO

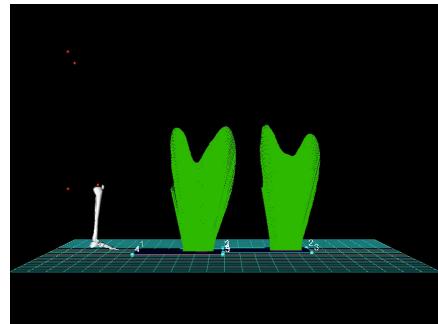
DESIU Analyse du Mouvement - Marseille

Messages à ramener chez soi...

De nombreux aspects de modélisations sont sous jacents aux résultats d'AQM,
souvent peu adaptées à l'enfant et aux pathologies

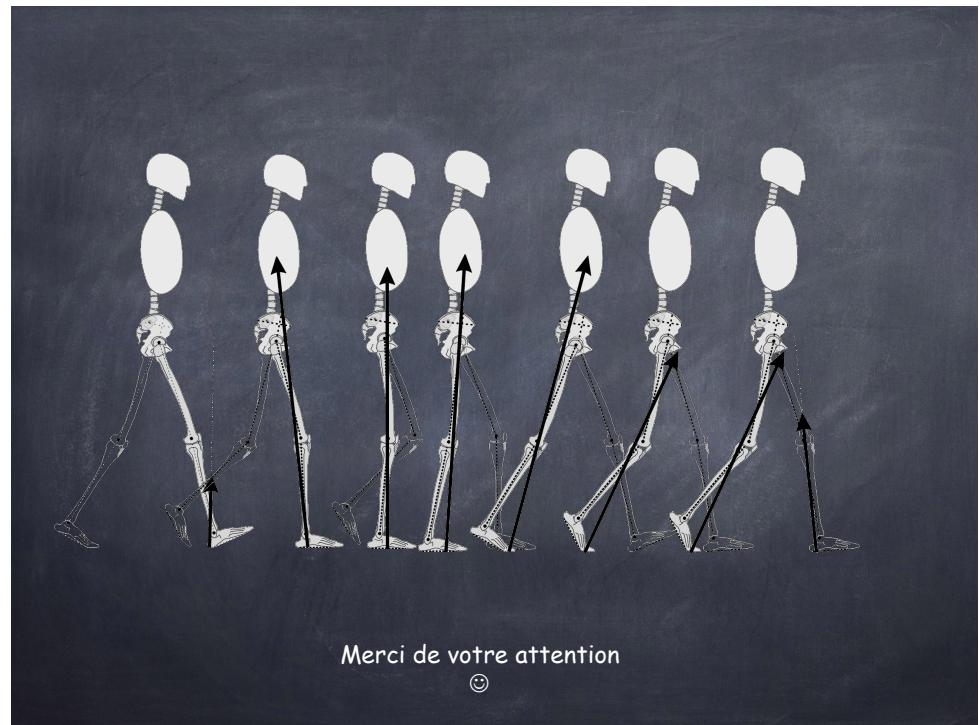
Ne décrit PAS les efforts musculaires.

Ne décrit ABSOLUMENT PAS les efforts dans l'articulation.



Vincent POMERO

DESIU Analyse du Mouvement - Marseille



Merci de votre attention
😊