

CENTRALE LYON
ENISE

Biomécanique et mouvement

3 février 2026



SOMMAIRE

1.

Introduction

2.

Modélisation du corps

3.

**Mécanique des
systèmes multicorps**

4.

**Anatomie et
modélisation**

1.

Introduction

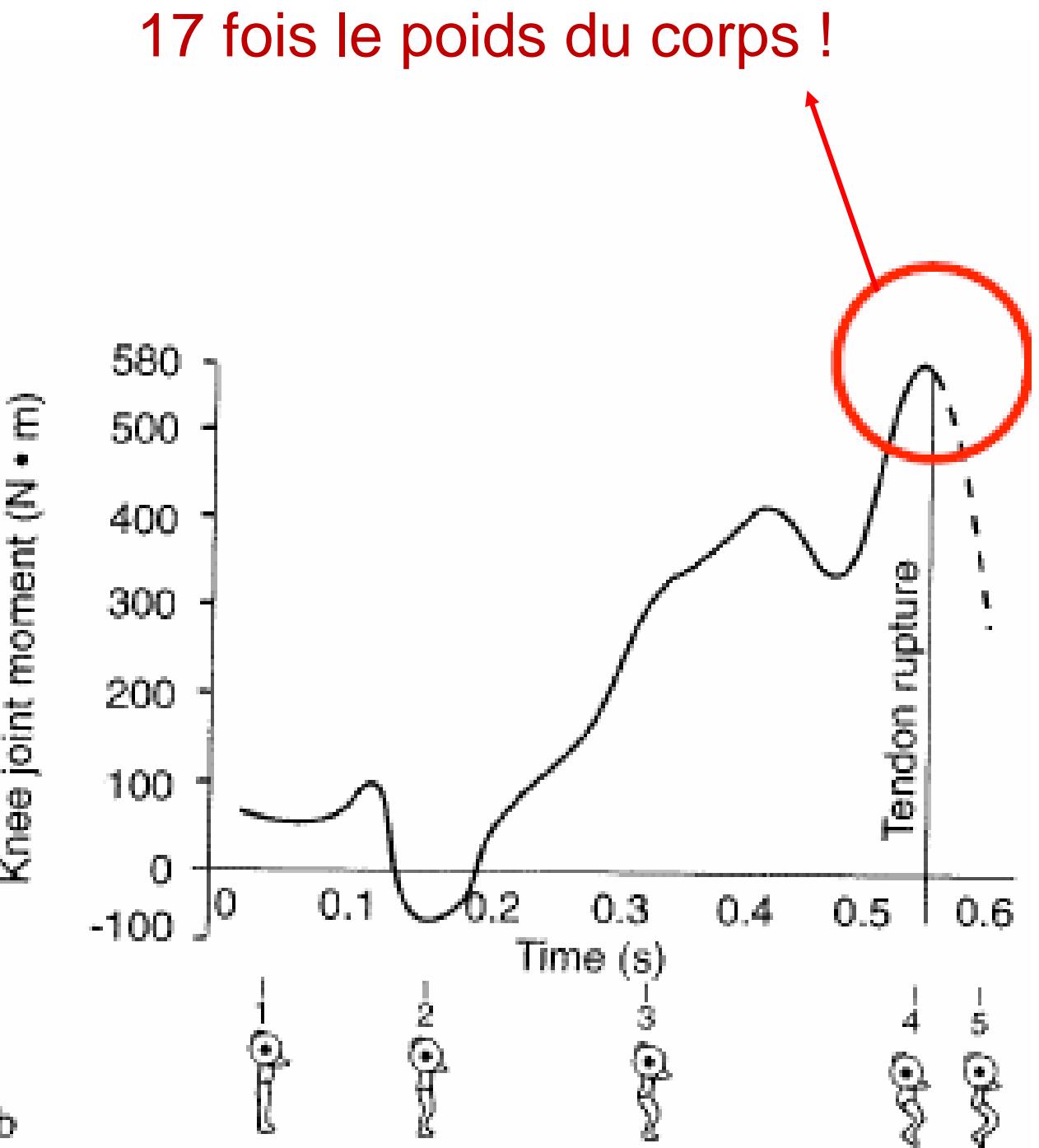
Exemple

Les activités sportives peuvent induire des forces extrêmes

- Comment modéliser, optimiser, se perfectionner ?
- Quelles conséquences sur le corps (os, muscles, tendon, organes) ?
- A quelle échelle (macro, méso, micro – cellulaire/fibres...) ?



[D. Pioletti]



La biomécanique

Mouvement ?

- La **statique** : étudie le corps dans des conditions d'équilibre
 - Maintient dans l'immobilité grâce à la force exercée par le biceps
- La **Cinétique**: impliquée quand les corps sont en mouvement
 - **Cinématique** : étudie le mouvement pour lui-même
 - Suivre le segment des jambes pendant la marche
 - **Dynamique** : étudie les mouvements en relation avec les forces qui les produisent
 - Mouvement de l'avant bras → Contraction en longueur du biceps et forces associées

→ Associe paramètres inertIELS (masse et moment d'inertIE) du système en mouvement aux paramètres cinÉmatiques pour obtenir

- les quantités d'accélération linéaire et angulaire
- les quantités de mouvement linéaire et angulaire
- les énergies cinétiques linéaire et angulaire et potentielle

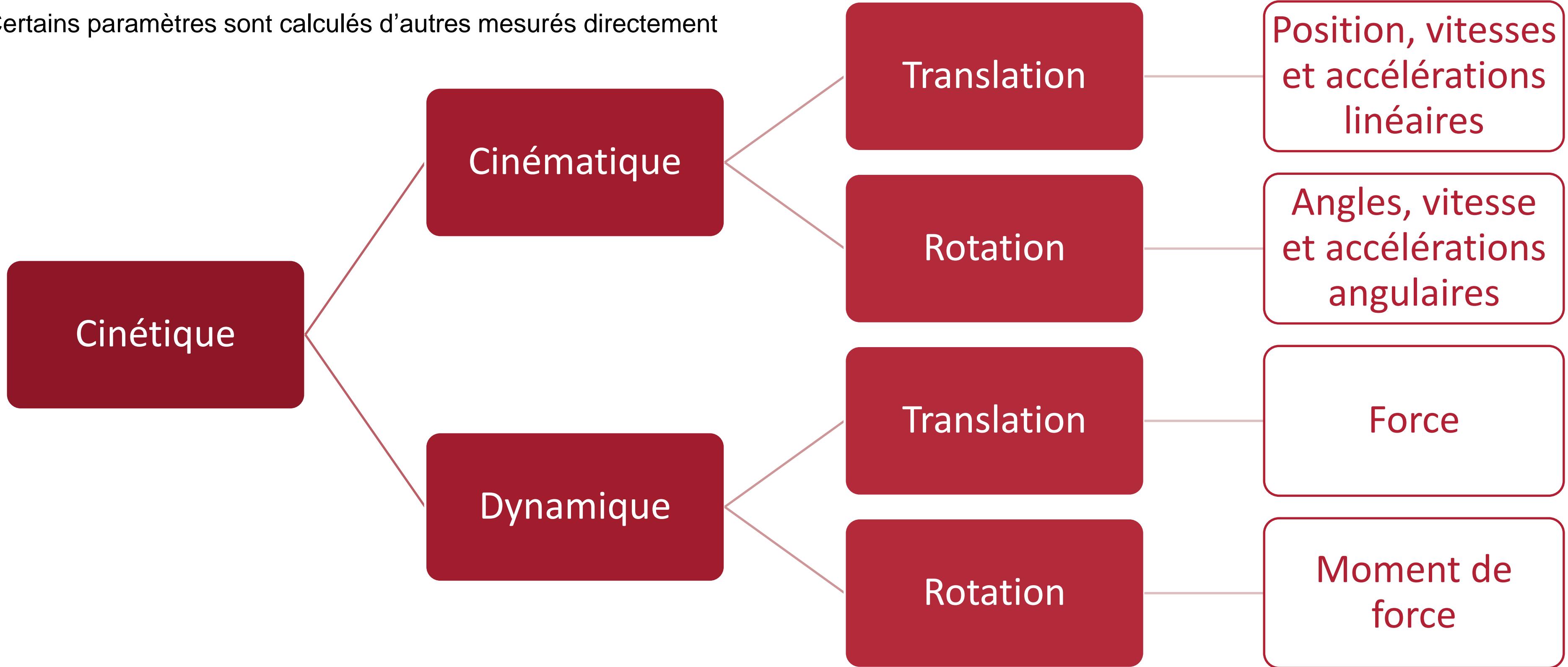


[D. Pioletti]

La biomécanique

Mouvement ?

Certains paramètres sont calculés d'autres mesurés directement

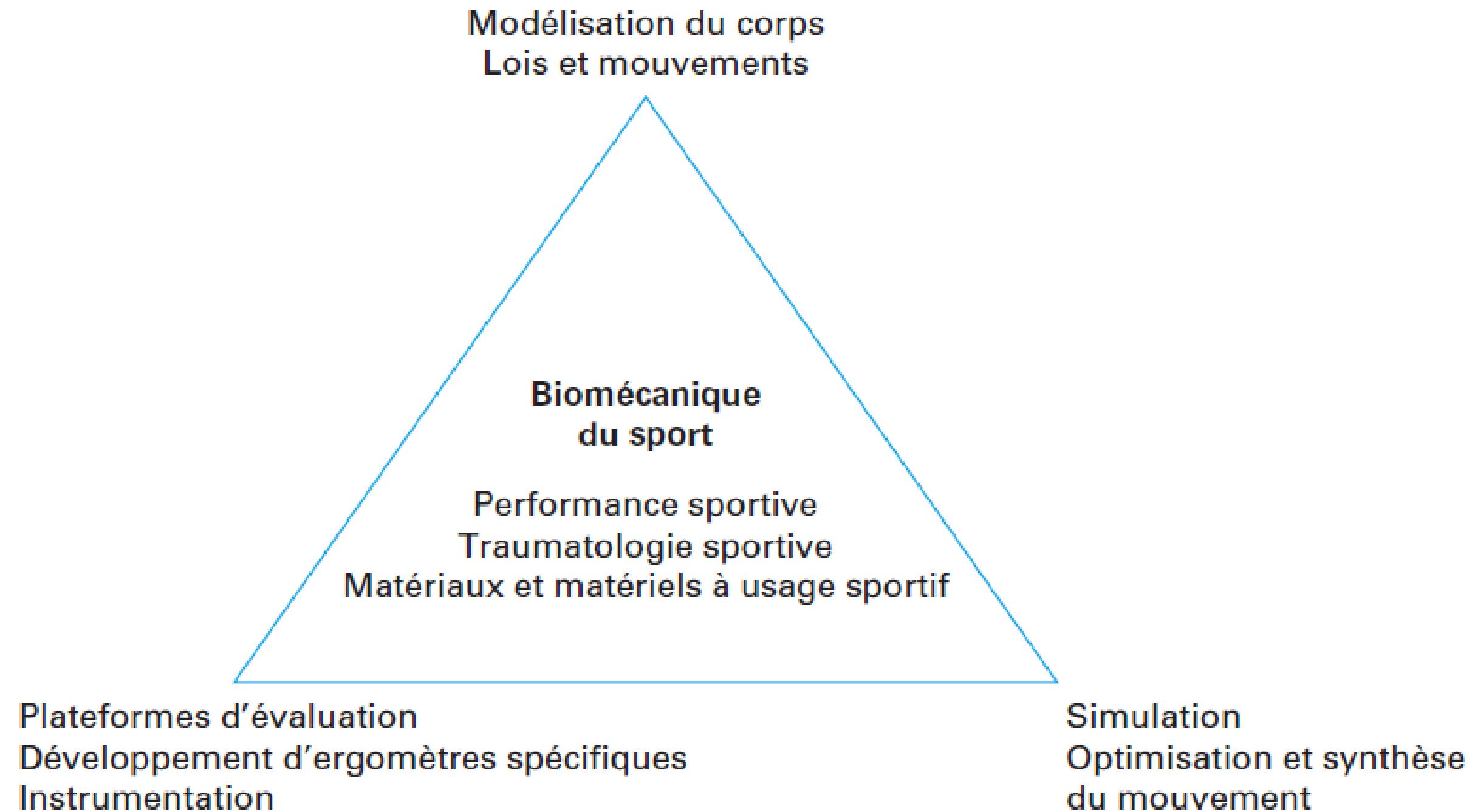
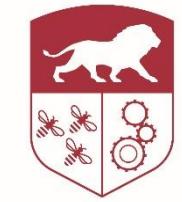


Mécanique du mouvement

Ou science du mouvement

- L'approche scientifique qui, à la fois décrit et explique les mouvements
- De plus en plus biomécanique
 - intégration de modèles musculaires
 - lois de commandes qui activent les muscles
- → Capacité à mettre en relation l'activité musculaire contrôlée et coordonnée, au service d'une analyse explicative de la locomotion humaine par l'application des lois de la mécanique des systèmes poly-articulés.
- Cas du sport
 - Relier et de comprendre les causes et leurs effets sur les mouvements
 - But : expertiser les gestes réalisés
 - Inclus 2 autres approches scientifiques : la physiologie (fonctionnement musculaire) et les neurosciences intégrées (formulation des lois de commandes du mouvement propres au contrôle moteur)

Biomécanique du sport



Réflexion préalable à toute mise en œuvre d'un protocole expérimental pour mesurer et analyser le mouvement humain [TI P. Lacouture]

Biomécanique du mouvement

Importance des référentiels

Les paramètres s'expriment (généralement) sous forme vectorielle dans un **référentiel galiléen direct** (ou inertiel) R_0 lié à la terre qu'il convient de préciser

ATTENTION : indispensable de préciser dans quel référentiel sont réalisées les mesures et les calculs effectués

Les paramètres mesurés sont connus dans **le référentiel R_C associé au capteur** qui les mesure, qui peut être lui-même en mouvement donc non inertiel

→ Nécessiter de connaître l'orientation de R_C à chaque instant par rapport au référentiel inertiel R_0 (sinon mesures inexploitables)

→ Calcul de la **matrice de passage de R_C dans R_0**

2.

Modélisation du corps



Types de modélisations

Dépend de ce qui nous intéresse statique ou mouvement ?

Modélisation géométrique : Représentation 3D des segments corporels (os, muscles, articulations)

Modélisation cinématique : Description des mouvements (sans les forces)

Défis de la modélisation

- **Variabilité anatomique :**
 - Chaque individu a une **géométrie unique** (ex. : longueur des os, angles articulaires)
- **Tissus déformables :**
 - Les muscles et la peau **bougent** pendant le mouvement (artefacts de marqueurs en mocap)
- **Redondance musculaire :**
 - Plusieurs muscles contribuent à un même mouvement (ex. : flexion du coude = biceps + brachial)
- **Complexité des articulations :**
 - Le genou ou l'épaule ont des **mouvements non linéaires** (rotations couplées)

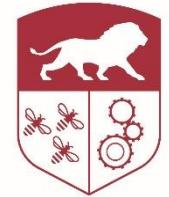
Modélisation du corps

Représentation (plus ou moins) simplifiée de la réalité

Dépend de ce que l'on se pose comme question (modélisation prédictive ou rendu de la captation ? Quel niveau de fidélité ? Etc.) → Etablissement d'hypothèses

Modélisation du corps

Modélisation par point



CENTRALE LYON
ENISE

Corps humain = point (simplification ultime)

Ce point correspond à son centre de gravité (\approx centre de masse, \approx centre d'inertie)

Avantages	Inconvénients
Très simple à traiter	Trop simple (pas de réponse à beaucoup de questions)
Certaines lois de la physique s'appliquent sur le centre de gravité	Ne permet de considérer que les mouvements de translation

Modélisation du corps

Modélisation par segment

- Corps humain = ensemble de segments reliés entre eux → INDEFORMABLE
 - + il y a de segments, + on est précis, + c'est compliqué à traiter
 - Un segment = un solide rigide (os ou ensemble d'os)
 - Ex : bras, colonne vertébrale, vertèbres
 - Une liaison = une articulation
- En fonction du problème on peut considérer un nombre différent de segments et articulations (ex : gymnaste)
- **Avantages**
 - Permet de considérer les mouvements en translation et rotation
 - Permet de mieux comprendre les mouvements du corps (efficacité d'une technique, origine blessure, etc.)
 - Modèle couramment utilisé : Modèle de Winter (1979) à 14 segments
 - Vocabulaire
 - Extrémité proximale (Ps) (extrémité anatomique la plus proche du tronc)
 - Extrémité distale (Ds)
 - Le centre de gravité est à une certaine distance par rapport aux extrémités



Modélisation du corps

Modélisation par segment

- À chaque segment S_i , on associe un centre de gravité G_i , dont la position est connue par rapport aux extrémités (distale ou proximale) du segment
- Les caractéristiques inertielles des segments (masse m_i , matrice d'inertie I_i) peuvent être déduites des tables anthropométriques propres aux modèles (proportionnels ou géométriques)
- Chaque segment est identifié par la notation : $S_i\{m_i; I_i; G_i\}$
- Un repère R_i anatomique lui est associé
 - Local, défini en fonction des mouvements de rotations articulaires (abduction/adduction, flexion/extension, rotation interne/rotation externe). Cf. recommandations de l'« International Society of Biomechanics (ISB) »
- L'estimation des paramètres inertIELS segmentaires PIS (masse et inertie segmentaires) constitue une problématique scientifique très étudiée

Modélisation du corps

Modélisation musculo-squelettique

Prise en compte, en plus des segments corporels (os) des muscles (activation musculaire, faisceaux, etc.) → cf cours précédents

Plus complexe, plus précis, plus représentatif



[M. Domalain]

3.

Mécanique des systèmes multicorps

Modèle Cinématique

- L'étude du mouvement du sportif suppose que l'on soit capable de mesurer et de quantifier précisément, au cours du temps, les positions des segments corporels dans l'espace 3D.
→ Evaluer la cinématique articulaire pour obtenir celle des centres de gravités segmentaires et du centre de gravité global.

- **Détermination des centres de gravité segmentaires**

- Nécessite de connaître les coordonnées 3D des extrémités (proximales et distales)
- Utilisation des tables anthropométrique
- $\overrightarrow{OG_i} = \overrightarrow{OP_i} + C_{i/P} \overrightarrow{P_iD_i}$

$$\overrightarrow{OG_i} = \overrightarrow{OP_i} + C_{i/P} \overrightarrow{P_iD_i}$$

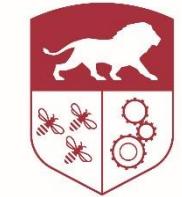
↑ ↑ ↑
Vecteur extrémités proximale/distale de ce segment S_i exprimé dans R_0
Donnée issue de la table anthropométrique qui localise la position de G_i du segment S_i en % de la longueur du segment par rapport à l'extrémité (proximale ou distale)
Vecteur position de l'extrémité proximale P_i du segment S_i exprimé dans R_0

Cinématique

- Quand les centres de gravités segmentaires sont connus dans R_0 , on calcule
 - la vitesse (dérivée première de la position) ${}^{R_0}\vec{v}_{G_i}^{S_i} = \dot{\overrightarrow{OG_i}}$
 - l'accélération (dérivée seconde de la position)
- En associant les paramètres inertIELS aux paramètres cinématiques, on obtient les quantités de mouvement et d'accélération segmentaires
- Utilisation de l'écriture matricielle et de matlab et ses toolbox pour la résolution

Centre de gravité global

Détermination de la cinématique et de la cinétique



CENTRALE LYON
ENISE

- On modélise le corps de l'athlète (système S), de masse m , en 14 solides (14 segments corporels) Si
- A chaque instant t du mouvement, on peut connaître dans R_0

- La position du CG $\overrightarrow{OG} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{14} m_i \overrightarrow{OG_i}$

- La vitesse du CG ${}^{R_0}\vec{V}_G^S = \dot{\overrightarrow{OG}}$

- Ou encore

$${}^{R_0}\vec{V}_G^S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{14} m_i ({}^{R_0}\vec{V}_{G_i}^{S_i}) \quad (1)$$

ou

$$m ({}^{R_0}\vec{V}_G^S) = \sum_{i=1}^{14} m_i ({}^{R_0}\vec{V}_{G_i}^{S_i}) \quad (2)$$

- Ce qui revient à dire que la quantité de mouvement globale du corps est égale à la somme des quantités d'accélération segmentaires
- L'accélération du CG :

- ${}^{R_0}\vec{a}_G^S = {}^{R_0}\vec{V}_G^S$ ou

$$({}^{R_0}\vec{a}_G^S) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{14} m_i ({}^{R_0}\vec{a}_{G_i}^{S_i}) \quad (3)$$

$$m ({}^{R_0}\vec{a}_G^S) = \sum_{i=1}^{14} m_i ({}^{R_0}\vec{a}_{G_i}^{S_i}) \quad (4)$$

- La quantité d'accélération globale du corps est égale à la somme vectorielle des quantités d'accélération segmentaires

Centre de gravité global

Détermination de la cinématique et de la cinétique

- Les équations (1) à (4) présentent l'avantage d'appréhender la notion de coordination gestuelle.

$${}^{\text{R}_0} \vec{\mathbf{V}}_{\text{G}}^{\text{S}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{14} m_i \left({}^{\text{R}_0} \vec{\mathbf{V}}_{\text{G}_i}^{\text{S}_i} \right)$$

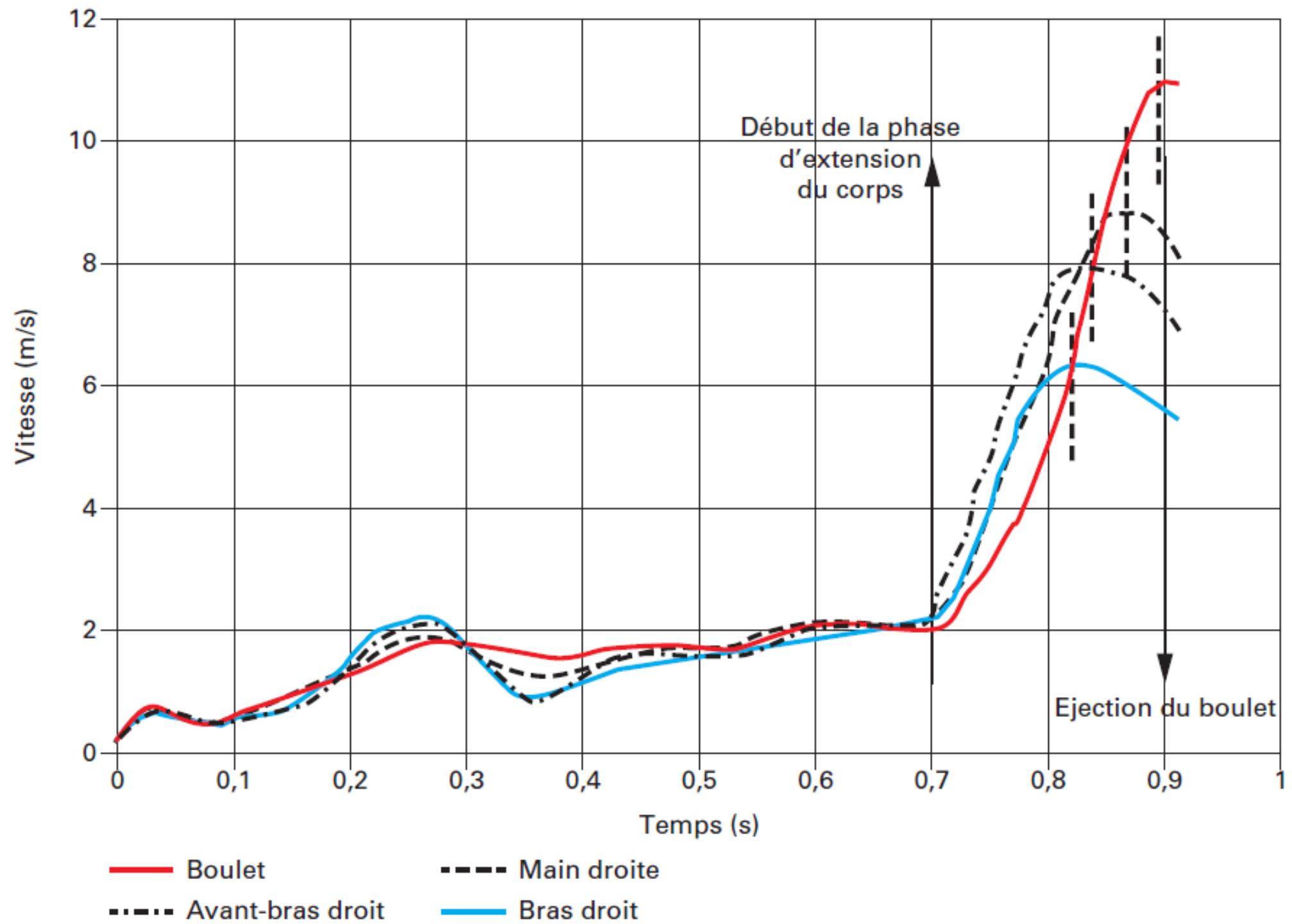
$$m \left({}^{\text{R}_0} \vec{\mathbf{a}}_{\text{G}}^{\text{S}} \right) = \sum_{i=1}^{14} m_i \left({}^{\text{R}_0} \vec{\mathbf{a}}_{\text{G}_i}^{\text{S}_i} \right)$$

- Elles mettent en évidence que la cinétique du CG global du corps de l'athlète est dépendante de celle des centres de gravité segmentaires.
- Or, cette dernière est créée par les muscles (actionneurs du mouvement).
- Possibilité d'appréhender la qualité d'une technique gestuelle, ie. la contribution de chaque segment, dans la création par exemple de la vitesse du CG global d'un coureur [équations (1) et (2)]

Exemple 1

Coordination gestuelle des segments du bras lors d'un lancer de poids

- On peut observer
 - Les décalages temporels des maxima de vitesse du bras, puis de l'avant-bras, puis de la main qui précèdent l'instant d'éjection du boulet.
 - La vitesse d'éjection est plus importante que celle de la main (supposant ainsi le rôle joué par le fouetté de la main, mécanisme recherché par le lanceur)



Les traits verticaux en tiretés montrent la filiation temporelle des extrema des vitesses résultantes des centres de gravité des différents segments du bras lanceur

Coordination du membre supérieur propulseur lors d'un lancer de boulet en translation [T. P. Lacouture]

Exemple 2

Coordination gestuelle lors d'un départ de sprint

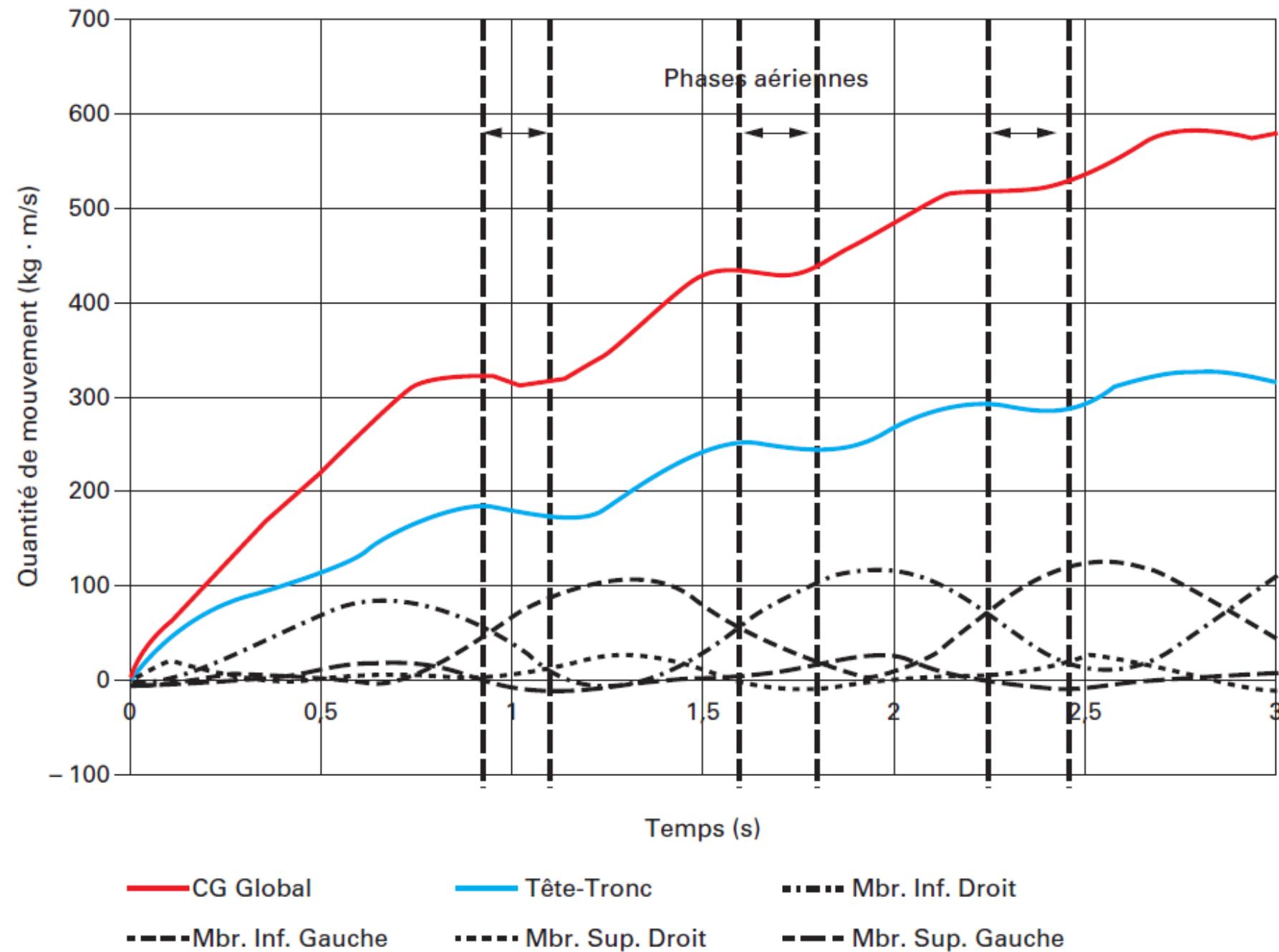
Objectif du sprinteur : communiquer à son CG global la plus grande quantité de mouvement

Contribution des différents membres du corps résumés en :

- tête/tronc,
- membres inférieurs droit et gauche
- membres supérieurs droit et gauche

conformément à l'équation (2), projetée sur l'axe antéro-postérieur Oy de R_0 , soit :

$$m\left({}^{R_0}V_{G_y}^S\right) = \sum_{i=1}^{14} m_i \left({}^{R_0}V_{G_{iy}}^{S_i}\right)$$



Contribution des qdm des CG des différents membres du corps d'un sprinteur à la qdm globale de son CG lors du départ [T. P. Lacouture]

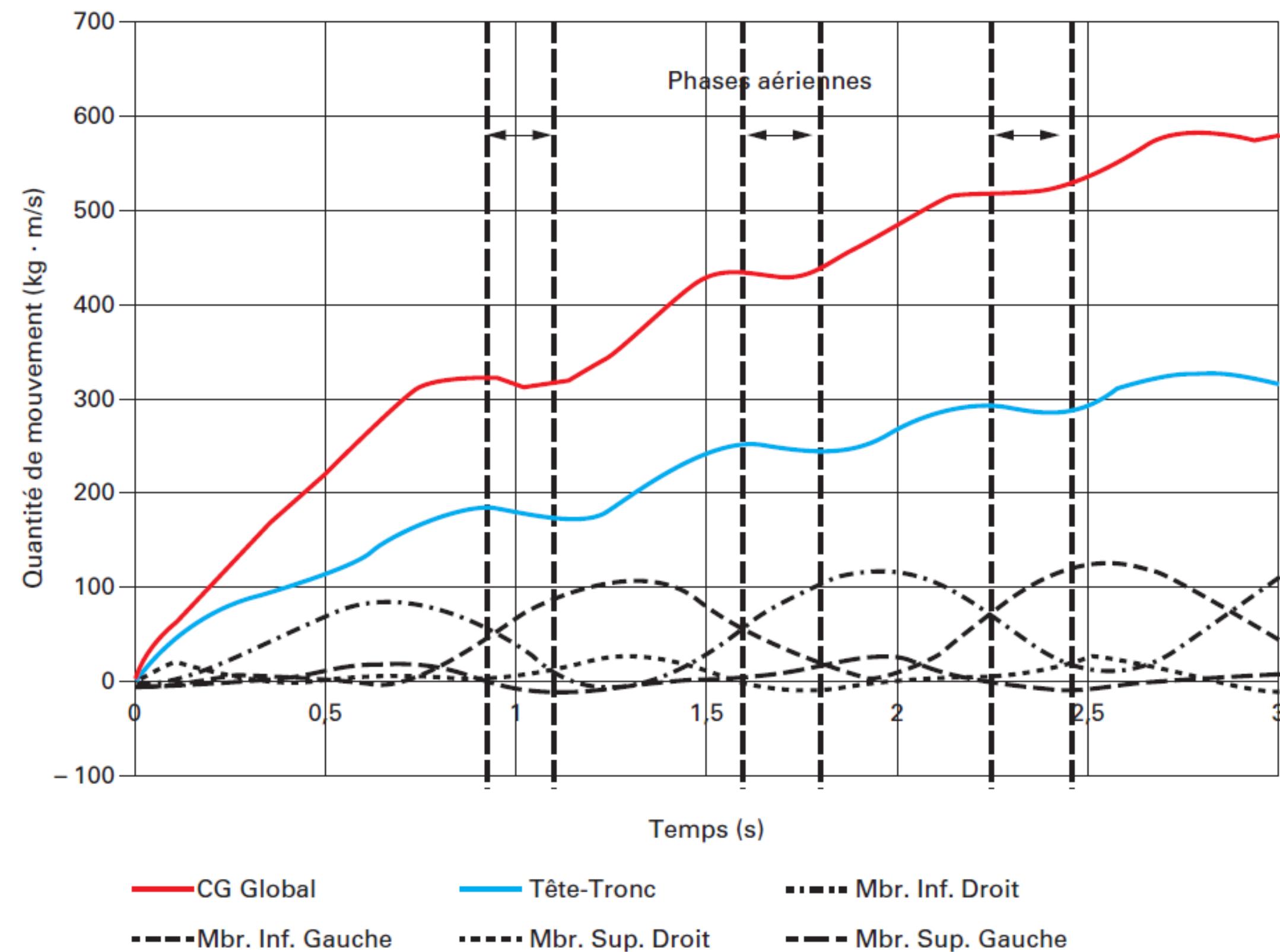
Exemple 2

Coordination gestuelle lors d'un départ de sprint

Au regard de sa plus grande masse (~50 % de la masse totale), le tronc contribue le plus

On remarque

- Ce sprinteur lance d'abord sa jambe droite
- Le mouvement alterné des côtés droit et gauche
- Pendant les phases aériennes (traits verticaux), la quantité de mouvement globale est quasi conservée



Contribution des qdm des CG des différents membres du corps d'un sprinteur à la qdm globale de son CG lors du départ [T. P. Lacouture]

Approche dynamique

- L'analyse dynamique met en relation les efforts externes qui s'exercent sur le corps de l'athlète et son mouvement
- Elle se limite à une modélisation globale du corps
- Les deux grands théorèmes de cette approche sont
 - **Équation de la résultante dynamique (ou 2e loi de Newton, ou encore principe fondamental de la dynamique)**
 - La somme des forces extérieures qui s'exercent sur le corps est égale à la quantité d'accélération globale de ce corps
 - **Théorème du moment dynamique (ou théorème du moment cinétique)**
 - Le bilan des moments extérieurs qui s'exercent sur le corps S est égal à la variation par rapport au temps du moment cinétique global

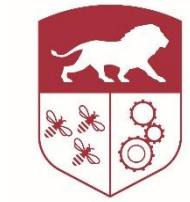
4.

Anatomie et modélisation



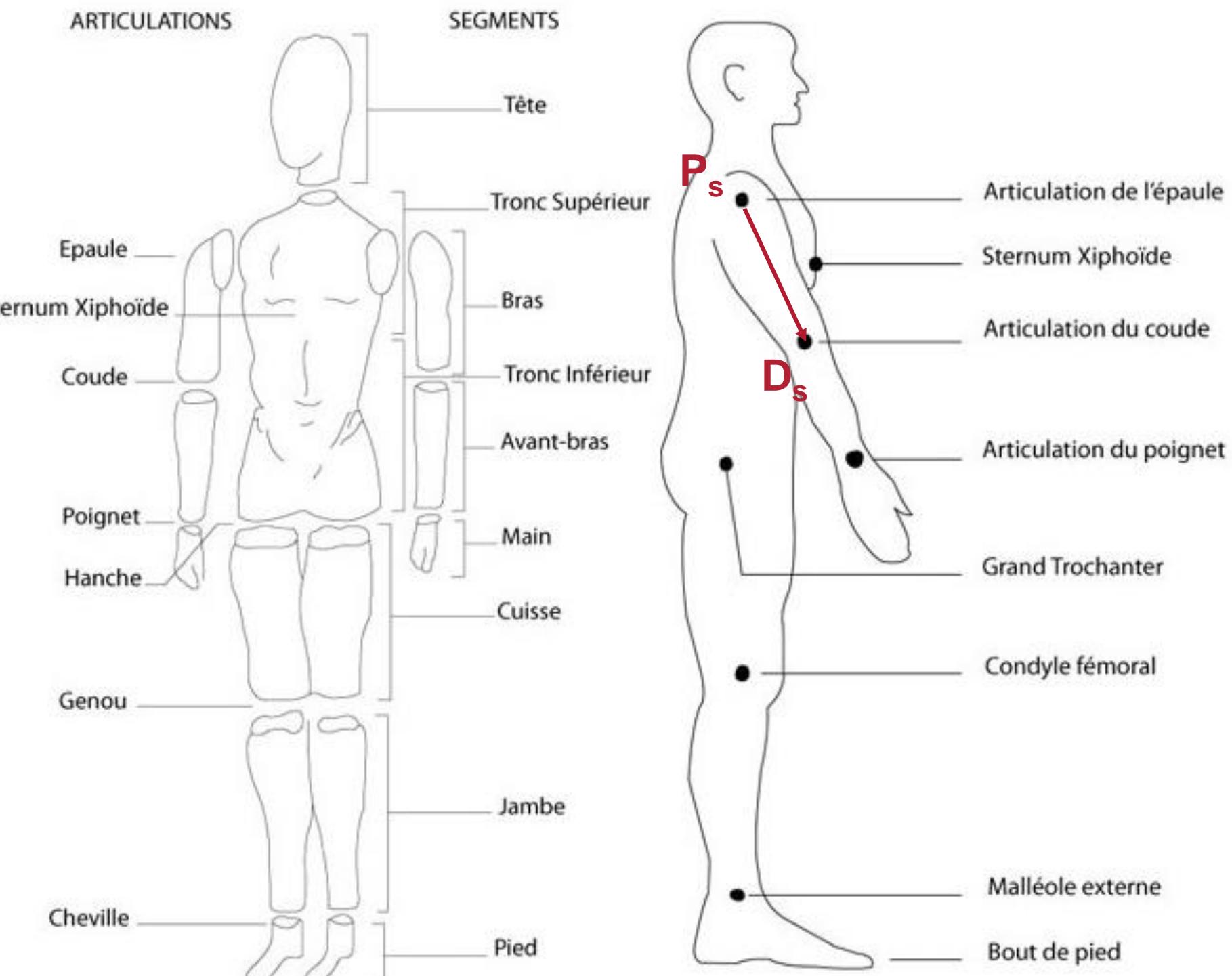
Connaître

Segments corporels

CENTRALE LYON
ENISE

- La description géométrique d'un segment corporel s'appuie sur des mesures anthropométriques → délimitation des segments corporels à l'aide de marqueurs anatomiques placés sur des repères articulaires précis
- Modèle simplifié (15–20 segments) :**
 - Tête, tronc (thorax + bassin), membres supérieurs/inférieurs
- Modèle détaillé (>50 segments) :**
 - Inclut les doigts, orteils, et segments individuels des vertèbres
- Un segment corporel (noté s) est modélisé par un vecteur $\overrightarrow{P_s D_s}$
 - Origine : point proximal du segment (P_s)
 - Extrémité : point distal du segment (D_s)

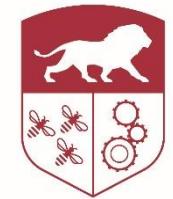
→ Repères anatomiques palpables (ex : malléole externe, le point proximal du pied)



Segmentation du corps humain à partir de repères anatomiques articulaires externes
[biomecanique3d.univ-lyon1.fr]

Segments corporels

Articulations et degrés de libertés (DDL)

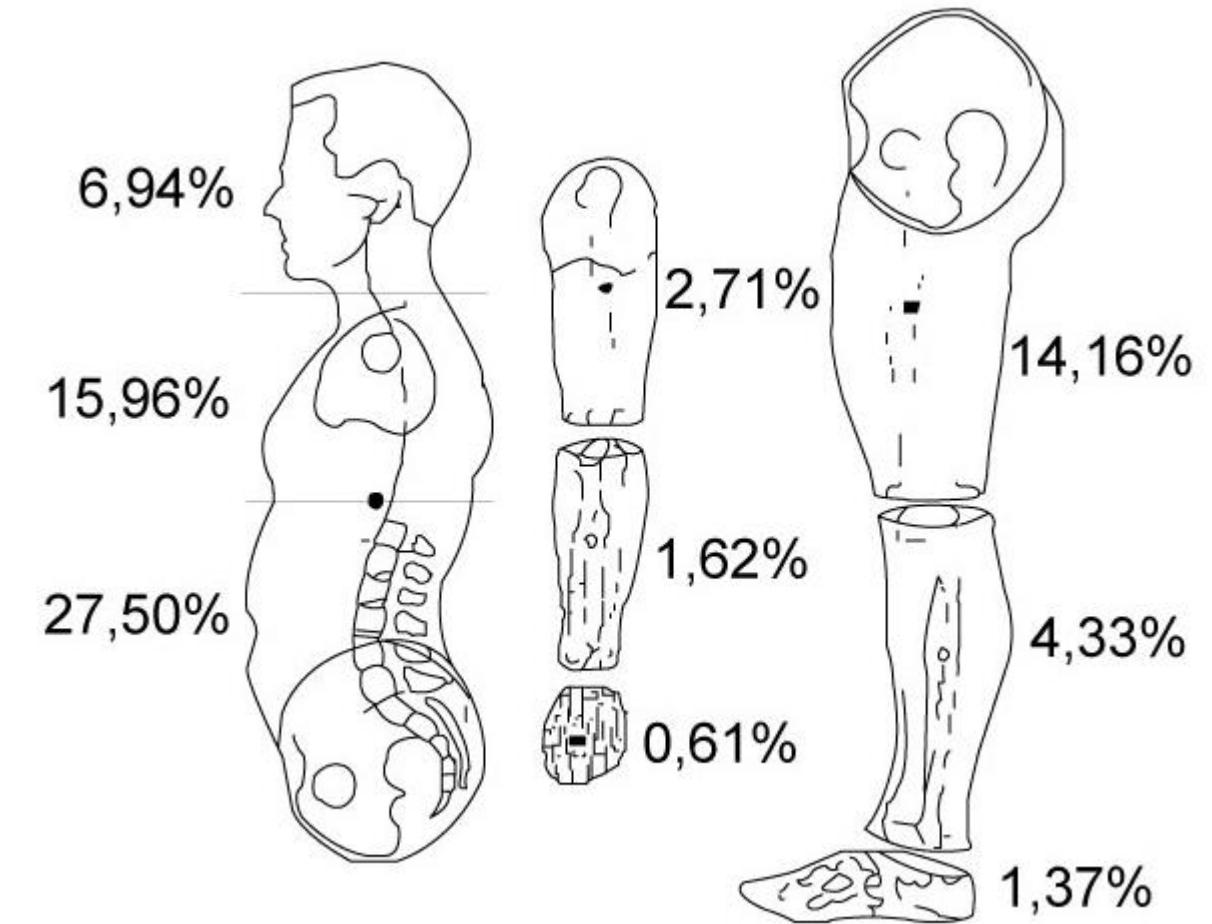


CENTRALE LYON
ENISE

Articulation	Type	DDL	Mouvements
Épaule	Synoviale (énarthrose)	3 DDL : Flexion/extension, abduction/adduction, rotation interne/externe	Lancer, nage
Coude	Synoviale (ginglyme)	1 DDL : Flexion/extension	Flexion du bras
Poignet	Synoviale (condylienne)	2 DDL : Flexion/extension, abduction/adduction	Mouvements fins (écriture)
Hanche	Synoviale (énarthrose)	3 DDL : Flexion/extension, abduction/adduction, rotation interne/externe	Marche, course
Genou	Synoviale (ginglyme)	1 DDL principal (flexion/extension) + rotations limitées	Flexion lors de la marche
Cheville	Synoviale (trochléenne)	1 DDL principal (dorsiflexion/plantarflexion) + inversions/éversions limitées.	Propulsion lors de la marche

Masse segmentaire

- Masse d'un segment (m_s) : valeur identifiant sa quantité de matière
 - Dépend de la nature des différents tissus (os, muscles, fascias, graisse, peau, liquides) qui le composent
- Caractéristique inertielle du segment
 - Représente la résistance du segment à sa mise en mouvement : plus la masse est importante, plus il est difficile de modifier le mouvement du segment
- Valeur constante en kilogramme (kg)
- **Calcul de la masse d'un segment corporel**
 - Différentes méthodes de mesures anthropométriques (pesée des segments après dissection par exemple)
 - Détermination du coefficient de masse (cm) à utiliser pour calculer la masse de chaque segment à partir de la masse totale du corps
 - Calcul de la masse d'un segment (m_s) ! $M_s = C_m * M$
 - Données par les tables anthropométriques



Segments	Coefficient de Masse (cm) de De Leva
Tête + Cou	6,94%
Tronc sup	15,96%
Tronc inf	27,50%
Bras	2,71%
Avant bras	1,62%
Main	0,61%
Cuisse	14,16%
Jambe	4,33%
Pied	1,37%
Total	100,00%

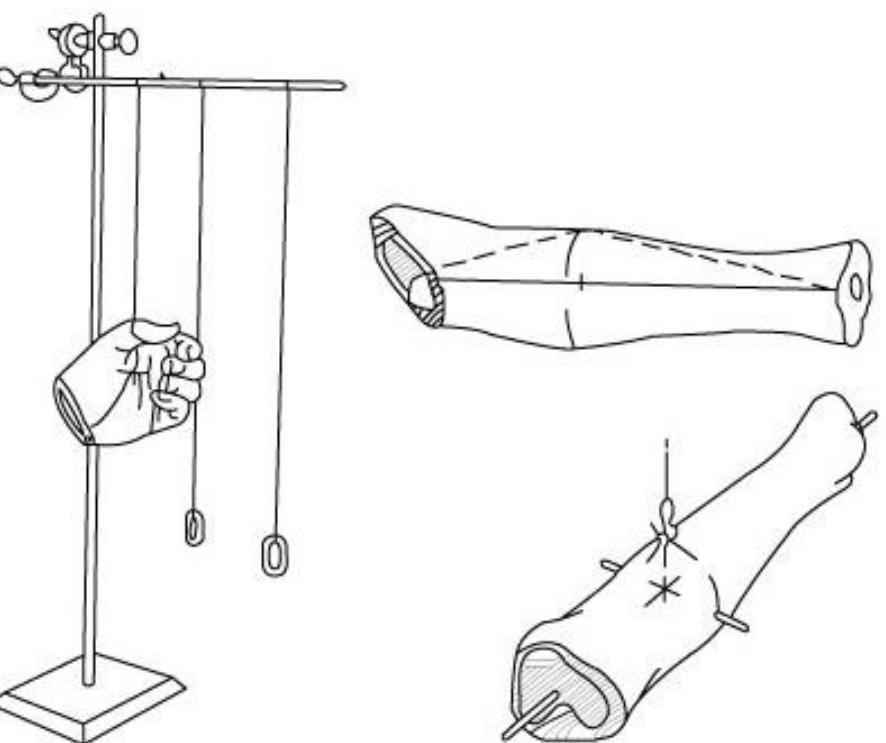
Centre de masse segmentaire

Détermination du centre de masse d'un segment corporel

- Le centre de masse d'un segment correspond au point d'équilibre ou au point où pourrait être concentrée toute sa masse. Il est noté G_s
- Rq : C'est aussi le point où s'applique le poids du segment P_s

Calcul de la position du centre de masse d'un segment corporel

- Différentes méthodes de mesures anthropométriques (par exemple la méthode par suspension et oscillation)
- Propositions de tables anthropométriques regroupant coefficient propre (c_s) → calcul de la position du centre de masse à partir de l'équation : $\overrightarrow{P_s G_s} = c_s \cdot \overrightarrow{P_s D_s}$



[biomecanique3d.univ-lyon1.fr]

Segments	%(m_s)/M (De Leva)
Tête + Cou	50,00%
Tronc supérieur	29,99%
Tronc inférieur	38,06%
Bras	57,72%
Avant bras	45,74%
Main	79,00%
Cuisse	40,95%
Jambe	44,59%
Pied	44,15%

Table de Leva [biomecanique3d.univ-lyon1.fr]

Centre de gravité corporel

- Point où serait concentrée toute la masse du corps
- Position définie, déterminée à partir de la moyenne des positions des centres de masse segmentaires pondérées par la masse des segments
- Permet en mécanique de réduire le corps humain à un point

Remarques :

- Le poids du corps s'applique en ce point
- La position du centre de gravité change à chaque instant car elle dépend de la localisation des masses segmentaires qui varie dès qu'il se produit un déplacement d'un segment corporel dans l'espace

Calcul de la position du centre de gravité du corps

$$\overrightarrow{OG} = \frac{\sum_{i=1}^n \overrightarrow{OG_i} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$
$$\left\{ \begin{array}{l} x_G = \frac{\sum_{i=1}^n x_{G_i} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ y_G = \frac{\sum_{i=1}^n y_{G_i} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ z_G = \frac{\sum_{i=1}^n z_{G_i} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{array} \right.$$

- Le centre de gravité du corps s'élève sous l'effet du grandissement du corps et de l'élévation des membres supérieurs,
- Dans le cas de postures extrêmes du corps en hyperflexion ou hyperextension, la localisation du centre de gravité du corps peut se situer à l'extérieur du corps

5.

Coordonnées et repères

Analyse cinématique

Repères

- **Pour effectuer l'analyse cinématique, il est nécessaire de définir :**
 - les référentiels d'espace dans lesquels l'observation du mouvement est effectuée
 - le découpage du temps qui détermine les intervalles de temps séparant 2 observations consécutives
- L'association des analyses cinématique et temporelle permet l'étude de l'organisation spatio-temporelle du geste
- Le référentiel temporel permet d'effectuer un découpage temporel du mouvement étudié → Concrètement détermination des phases bornées par des instants clefs qui caractérisent le mouvement
 - Un instant-clé correspond à un événement particulier facilement observable qui apparaît à un instant donné pendant la réalisation du mouvement. Il constitue un repère temporel indispensable à la description temporelle du mouvement
 - 2 instants-clés vont déterminer une phase particulière du mouvement
 - Un découpage temporel précis présente la plupart du temps une hiérarchie des phases décomposée en phases principales (appelées phases) regroupant des phases secondaires (appelées sous-phases) du mouvement.

Analyse cinématique

Référentiel

- **Un référentiel d'espace est un système de référence qui permet de repérer la position dans l'espace des différents points qui définissent les segments corporels**
- Différents référentiels peuvent être choisis selon que les mouvements absolu ou relatif du corps et de ses segments sont étudiés
- Un référentiel spatial est déterminé à l'aide d'un repère R défini par:
 - un point O défini comme l'origine du repère,
 - 3 axes orthonormés directs x, y, z, orientés chacun par des vecteurs unitaires $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ (un repère est orthonormé et direct si les 3 vecteurs sont perpendiculaires (ortho), si leurs normes sont égales à 1 (normés) et s'il respectent la règle des 3 doigts de la main droite)
- Les 3 axes du référentiel déterminent 3 plans qui vont constituer 3 plans d'observation caractéristiques extrêmement utilisés pour analyser le mouvement:
 - Plan sagittal déterminé dans les exemples suivants par les axes y et z
 - Plan frontal déterminé dans les exemples suivants par les axes x et z
 - Plan transversal (horizontal) déterminé dans les exemples suivants par les axes x et y
- On note R Oxyz, le repère associé qui va permettre de situer le corps dans le référentiel choisi

Repères anatomiques

Repère global

- Origine : souvent au **sol** (pour la marche) ou au **centre de masse** du corps
- Axes:
 - **X** : antéro-postérieur (avant/arrière)
 - **Y** : latéral (gauche/droite)
 - **Z** : vertical (haut/bas)
- **Exemple** : dans l'analyse de la marche, l'axe Z est vertical et X est la direction de la marche

Repères anatomiques

Repères locaux

- Centré sur **chaque articulation** (ex. : genou, hanche)
- Axes alignés avec les **mouvements anatomiques** :
 - **Genou** :
 - **X** : Antéro-postérieur
 - **Y** : Médio-latéral (axe de rotation pour la flexion/extension)
 - **Z** : Longitudinal (axe de la jambe)
 - **Épaule** :
 - **X** : Antéro-postérieur
 - **Y** : Latéral
 - **Z** : Axial (rotation interne/externe)
- **Exemple** : Pour le **genou**, la flexion/extension se fait autour de l'axe Y

Conventions

Positions

- Le repérage des différents marqueurs anatomiques délimitant les segments corporels s'effectue en déterminant leurs positions dans l'espace défini par le référentiel retenu pour l'analyse cinématique
- Dans le cas de l'analyse (3D) du mouvement humain, le système de coordonnées cartésiennes des marqueurs anatomiques permet de quantifier leurs positions dans le référentiel choisi
 - Coordonnées cartésiennes des marqueurs anatomiques dans R(Oxyz)
Dans un repère orthonormé R(Oxyz) la position d'un marqueur anatomique à un instant donné, s'obtient en effectuant la projection orthogonale de M sur les 3 axes de R(Oxyz)
 - Détermination des positions des marqueurs anatomiques dans le référentiel du centre de gravité du corps R* (Gxyz) :
La position d'un marqueur M dans le référentiel R* est calculée en utilisant la relation de Chasles : $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OG} + \overrightarrow{GM} \rightarrow \overrightarrow{GM} = \overrightarrow{OM} - \overrightarrow{OG}$ La position du marqueur M dans R* est obtenue par soustraction de la position du centre de gravité du corps dans R à la position de M dans R
 - Trajectoire des repères anatomiques d'un marqueur (M) dans un référentiel donné est l'ensemble des positions successives de M. Cette représentation spatiale du mouvement des repères anatomiques est essentielle pour l'analyse cinématique
La trajectoire 3D d'un marqueur est souvent projetée dans les 3 plans (sagittal, frontal et transversal) définis par le référentiel pour effectuer une analyse planaire, c'est-à-dire, plan par plan

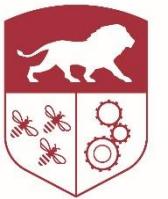
Conventions

Déplacements segmentaires

- Un segment corporel est modélisé par un vecteur défini par :
 - son origine est le point proximal du segment (P_s) et son extrémité est le point distal du segment (D_s),
 - sa direction correspond à la droite (P_sD_s)
 - son sens est défini de P_s vers D_s .
 - sa longueur correspond à la norme du vecteur $\overrightarrow{P_sD_s}$ ou P_sD_s

Le déplacement d'un segment corporel est déterminé par les variations de position et d'orientation de ce vecteur dans l'espace défini par un référentiel donné. Les changements d'orientation du vecteur décrivent le mouvement de rotation du segment

Conventions de rotation



Angles d'Euler

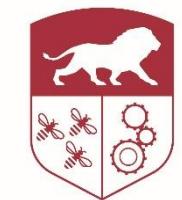
- Séquence de **trois rotations** autour des axes principaux (ex. : ZYX)
- **Problème : Singularités** (ex. : "gimbal lock" quand deux axes se superposent)
- **Exemple pour l'épaule :**
 - Rotation autour de **Z** (rotation interne/externe)
 - Rotation autour de **Y** (abduction/adduction)
 - Rotation autour de **X** (flexion/extension)

Conventions

Angles segmentaires

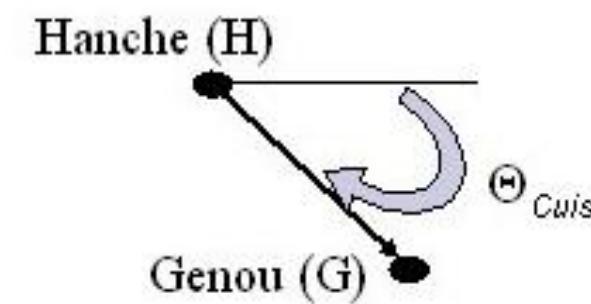
- Ici on ne considère que l'angle segmentaire projeté dans le plan sagittal
- Pour décrire le mouvement de rotation du segment on mesure/calcule l'angle compris entre l'horizontale et le vecteur modélisant le segment
Calcul de l'angle segmentaire projeté dans le plan sagittal → arc tangente → permet de déterminer à un instant donné, la valeur de l'angle (exprimée en radians) à partir du rapport (composante verticale/composante sagittale) du vecteur segment

Conventions



Angles segmentaires

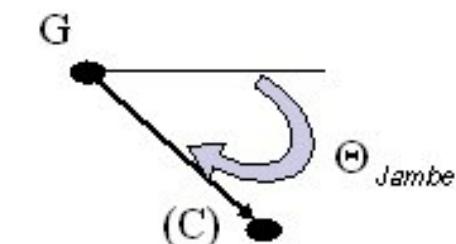
Segment cuisse-hanche



$$\tan(\theta_{cuisse}) = \frac{z_{HG}}{y_{HG}}$$

$$\theta_{cuisse} = \text{ArcTan}\left(\frac{z_{HG}}{y_{HG}}\right) \text{ ou } \text{ATAN2}(y_{HG}, z_{HG})$$

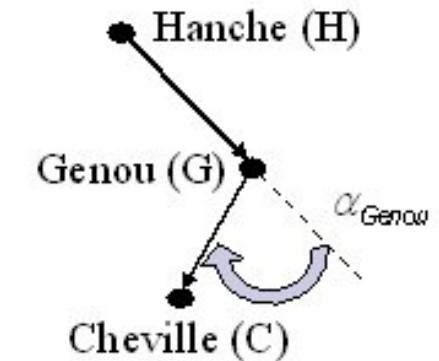
Angle du segment Jambe



$$\tan(\theta_{jambe}) = \frac{z_{GC}}{y_{GC}}$$

$$\theta_{jambe} = \text{ArcTan}\left(\frac{z_{GC}}{y_{GC}}\right) \text{ ou } \text{ATAN2}(y_{GC}, z_{GC})$$

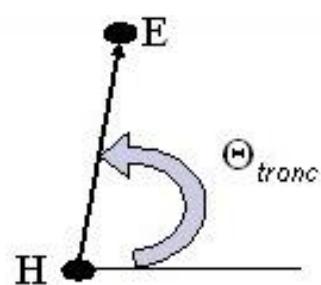
Différence de deux angles segmentaires



$$\alpha_{genou} = \alpha_{cuisse} - \alpha_{jambe}$$



Angle du segment tronc

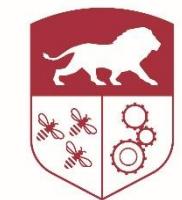


$$\tan(\theta_{tronc}) = \frac{z_{HE}}{y_{HE}}$$

$$\theta_{tronc} = \text{ArcTan}\left(\frac{z_{HE}}{y_{HE}}\right) \text{ ou } \text{ATAN2}(y_{HE}, z_{HE})$$

Conventions

Angles articulaires



CENTRALE LYON
ENISE

- Angles articulaires
Les angles segmentaires indiquent l'orientation des segments. Or l'analyse du mouvement du corps nécessite aussi de connaître le mouvement réalisé à chaque articulation
- Le mouvement articulaire représente le mouvement de rotation de 2 segments adjacents reliés à une articulation commune
- Il décrit alors les variations de l'angle articulaire en fonction du temps
- L'angle articulaire est obtenu en combinant les 2 angles segmentaires de segments adjacents

$$\Theta_{cheville} = \Theta_{pied} - \Theta_{jambe} - 90^\circ$$

$$\Theta_{poignet} = \Theta_{main} - \Theta_{avant bras}$$

$$\Theta_{genou} = \Theta_{cuisse} - \Theta_{jambe}$$

$$\Theta_{coude} = \Theta_{avant bras} - \Theta_{bras}$$

$$\Theta_{hanche} = \Theta_{cuisse} + \Theta_{tronc}$$

$$\Theta_{Epaule} = \Theta_{bras} + \Theta_{tronc}$$

[biomecanique3d.univ-lyon1.fr]

Dynamique

Quid des efforts ?

- Notion de force est très souvent considérée comme une qualité physique décrivant la force musculaire
- On distingue
 - les forces internes engendrées par les contractions musculaires sur le système musculo-squelettique
 - les forces externes produites par un système extérieur (au sens de la mécanique) comme un adversaire ou comme la réaction du sol qui s'exerce sur l'athlète lors de la phase d'appel d'un saut

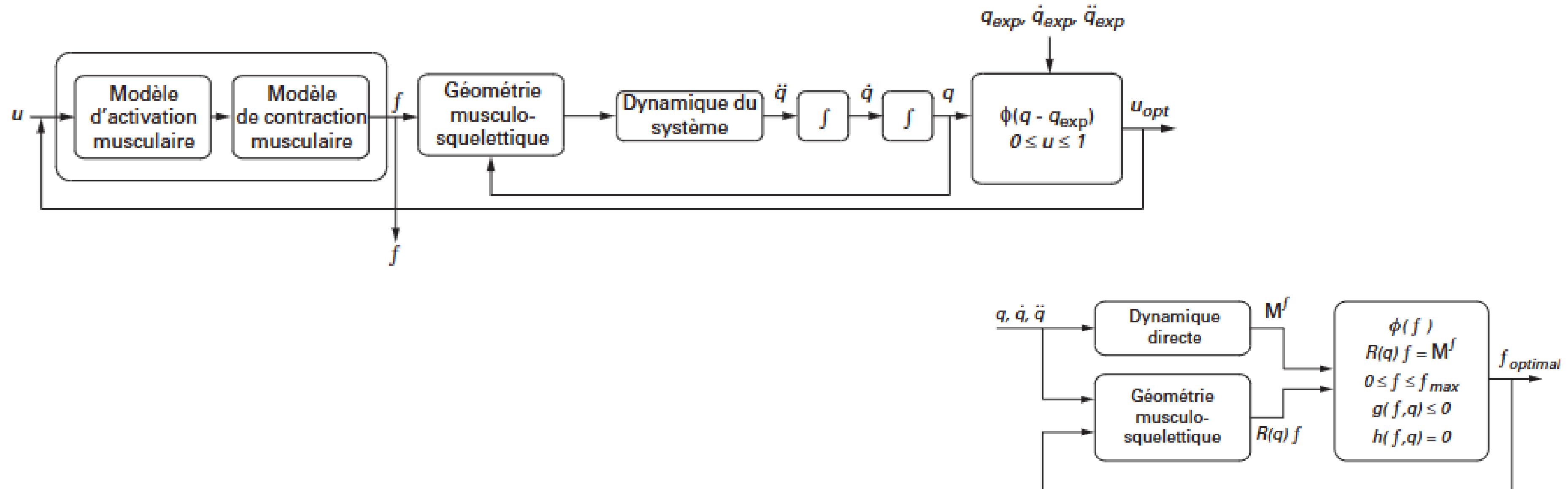
→ Cf cours de cycle préparatoire sur les forces et les lois de Newton

→ 3^{ème} loi de Newton : lorsqu'un corps exerce une force sur un autre, le second exerce toujours sur le premier une force d'intensité égale, selon la même direction mais de sens opposé → notion de force interne et réaction/force externe

Dynamique directe

Dynamique directe assistée

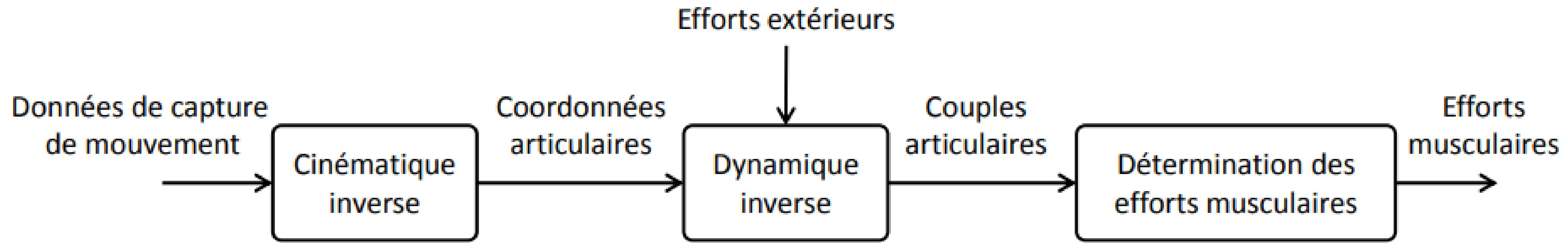
$$M(q)\ddot{q} + C(q)\dot{q} + G(q) + R(q)\hat{f} + E(q, \dot{q}) = 0$$



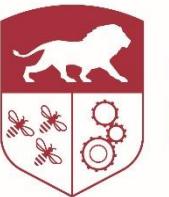
Dynamique inverse



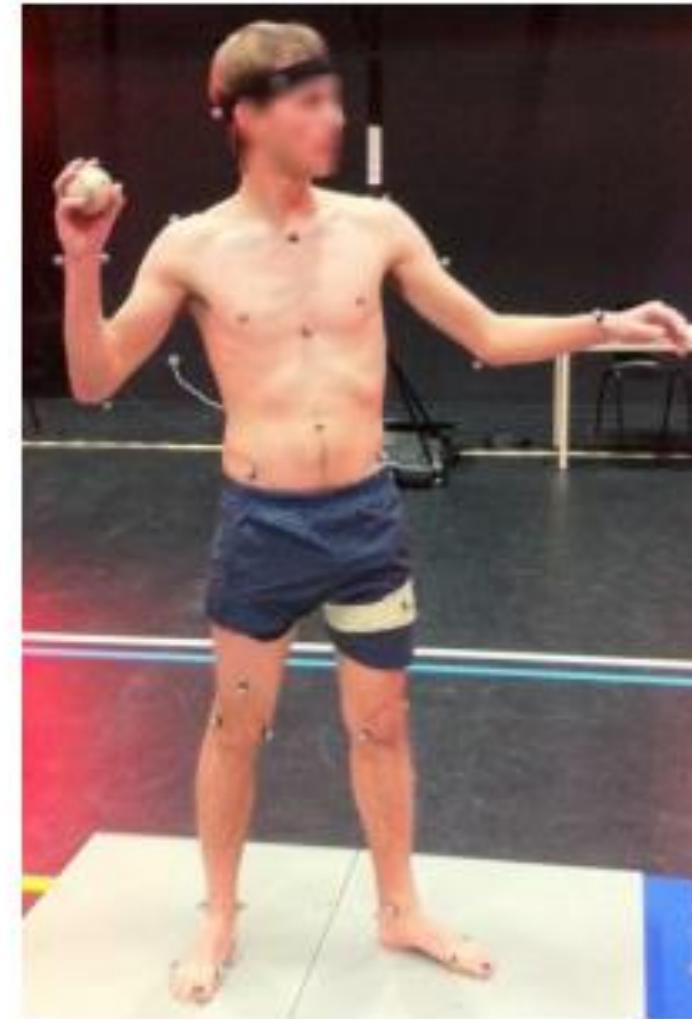
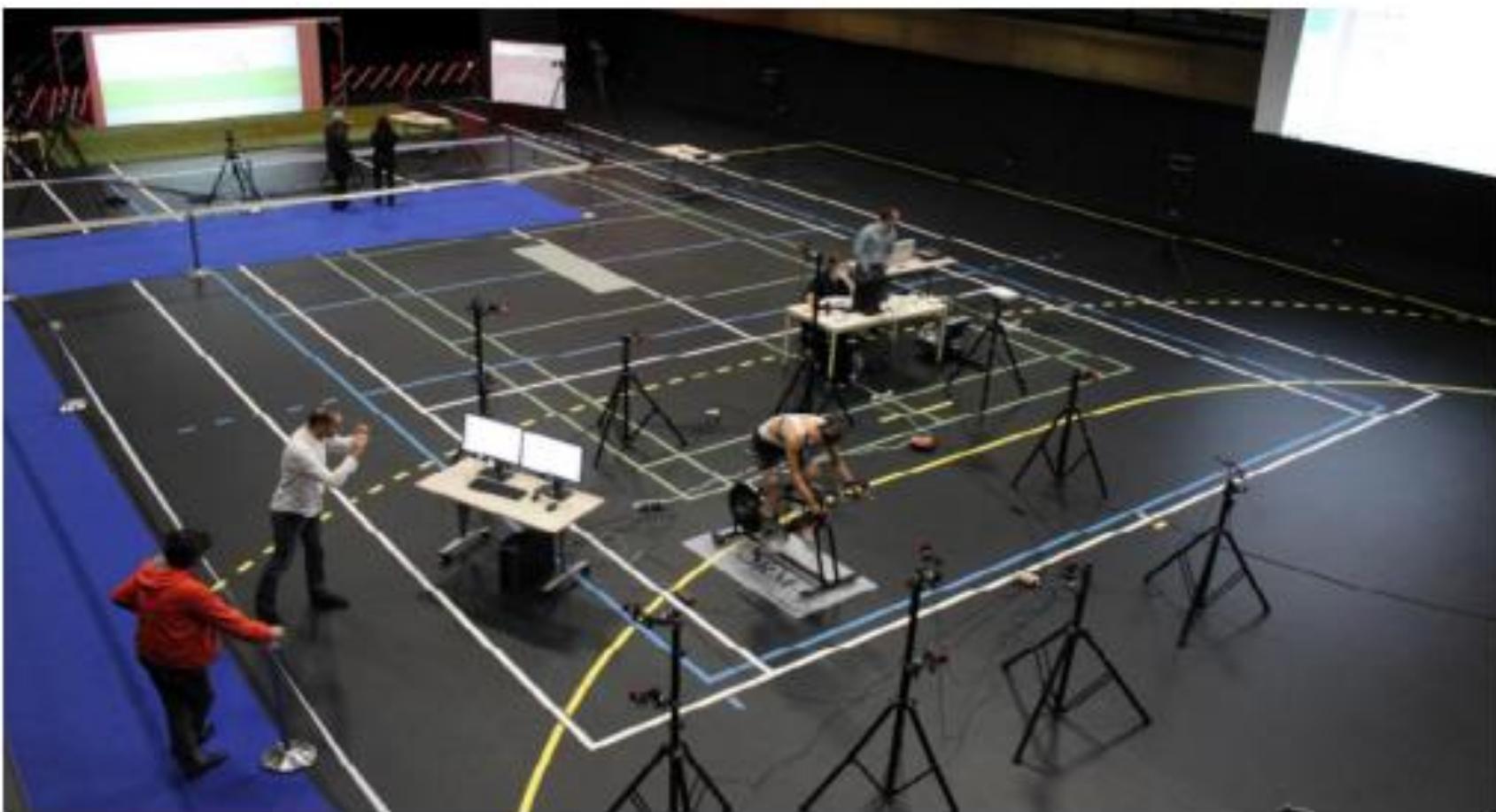
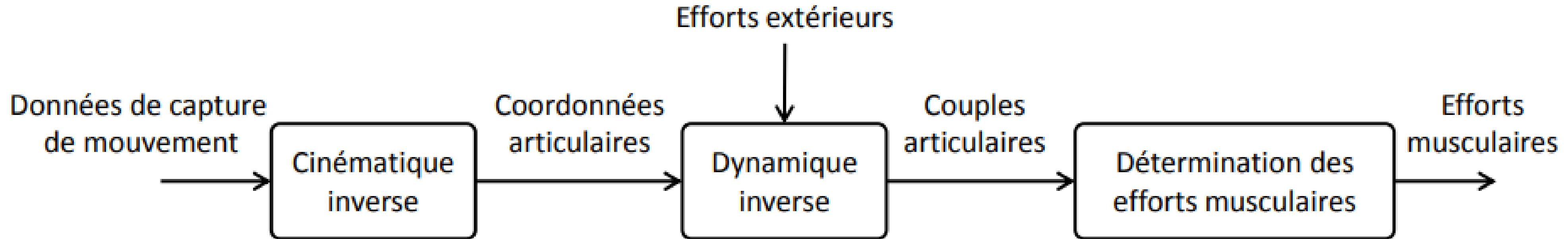
Quésaco ?



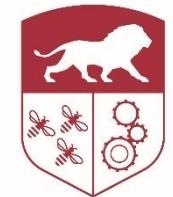
Dynamique inverse



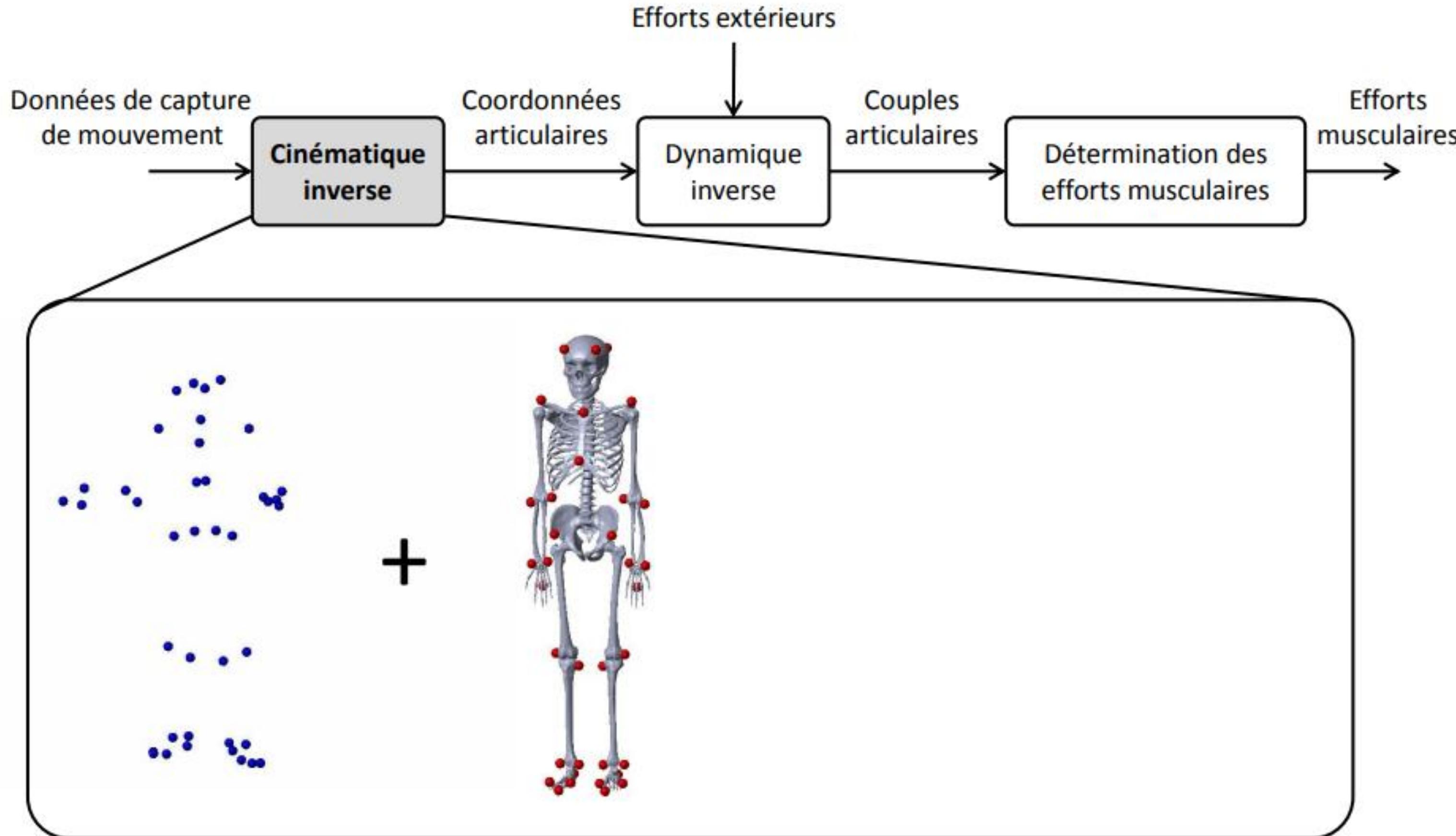
Quésaco ?



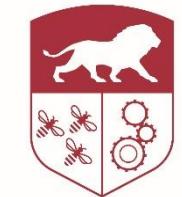
Dynamique inverse



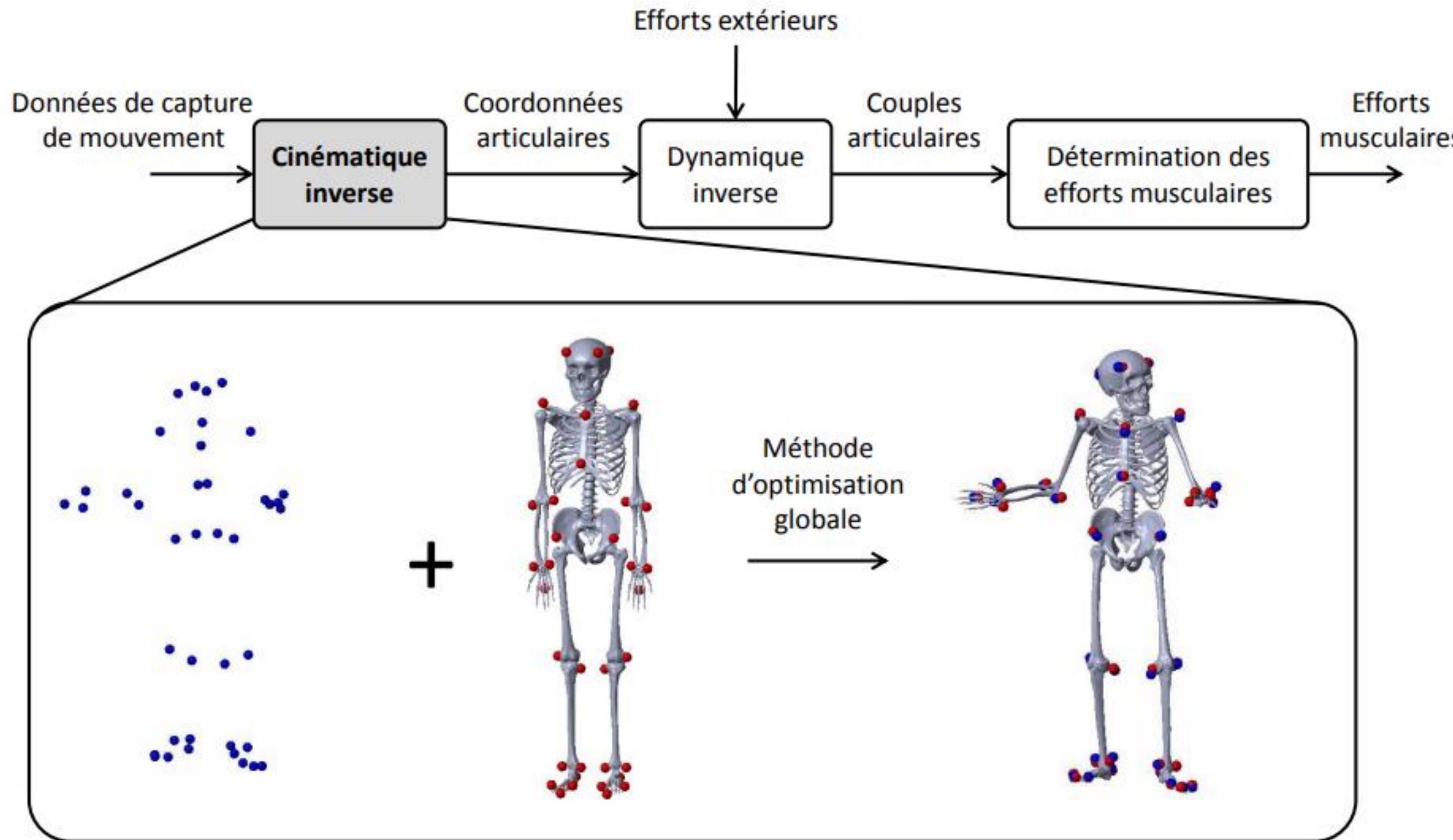
Quésaco ?



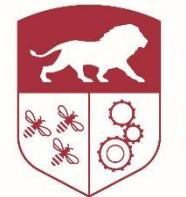
Dynamique inverse



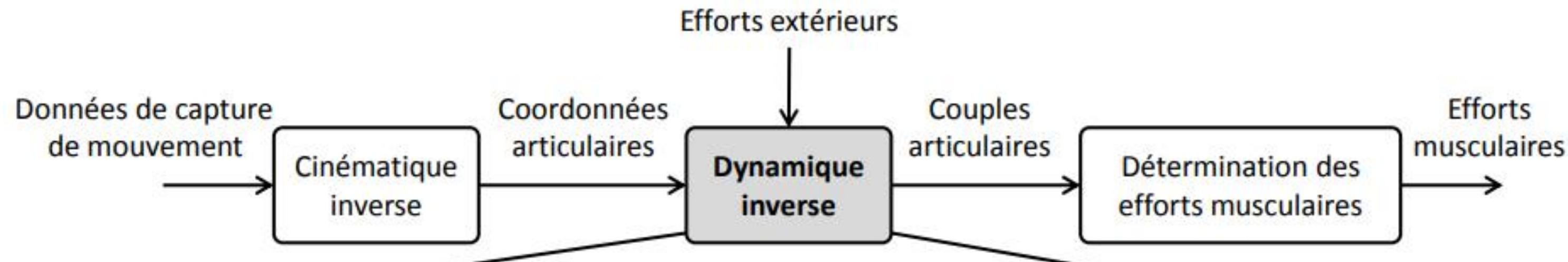
Quésaco ?



Dynamique inverse



Quésaco ?



Détermination des couples articulaires λ

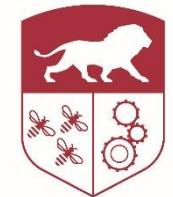
$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq + \lambda + E = 0$$

Algorithme récursif de Newton-Euler

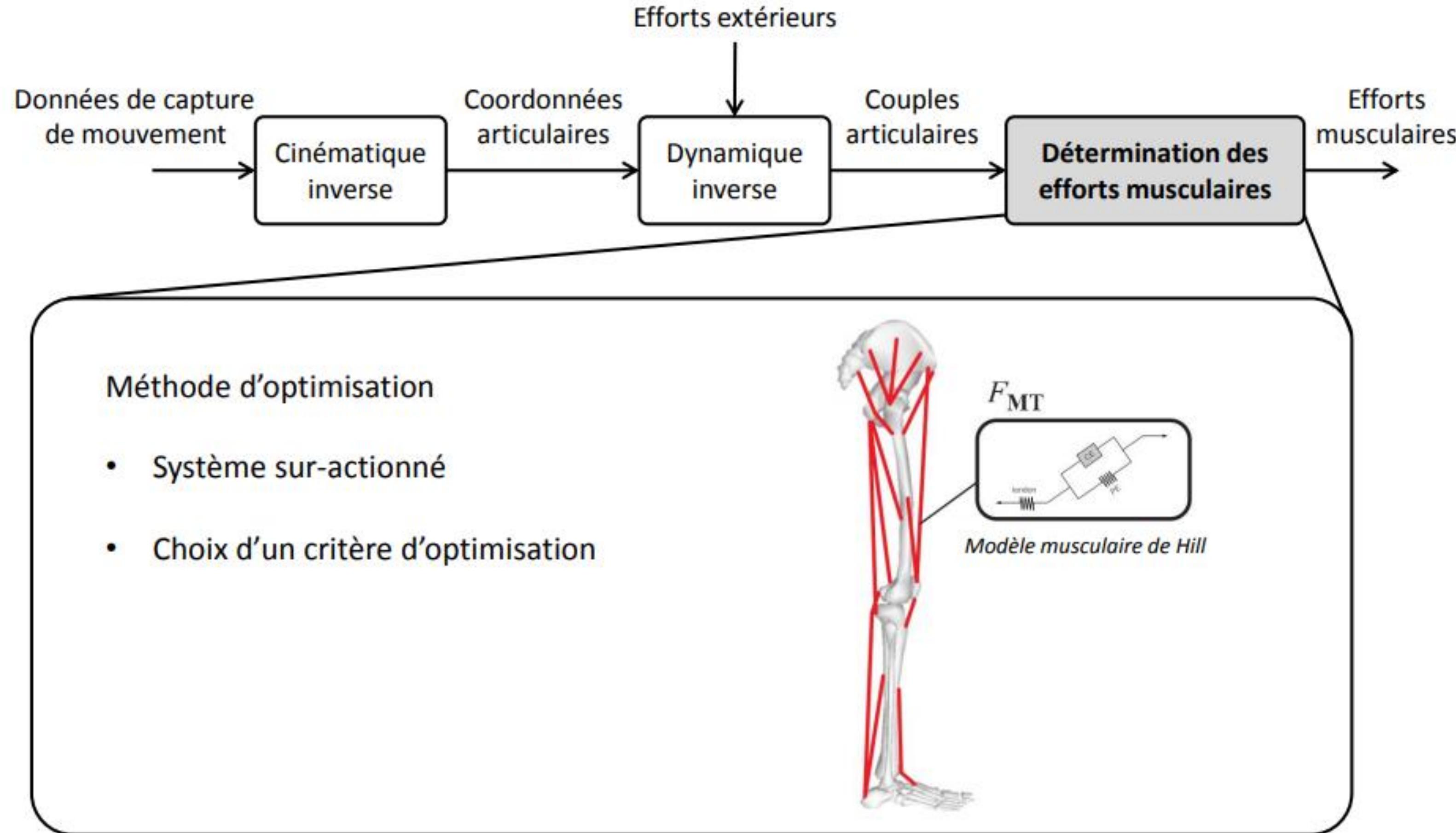
Utilisation des plateformes de force



Dynamique inverse

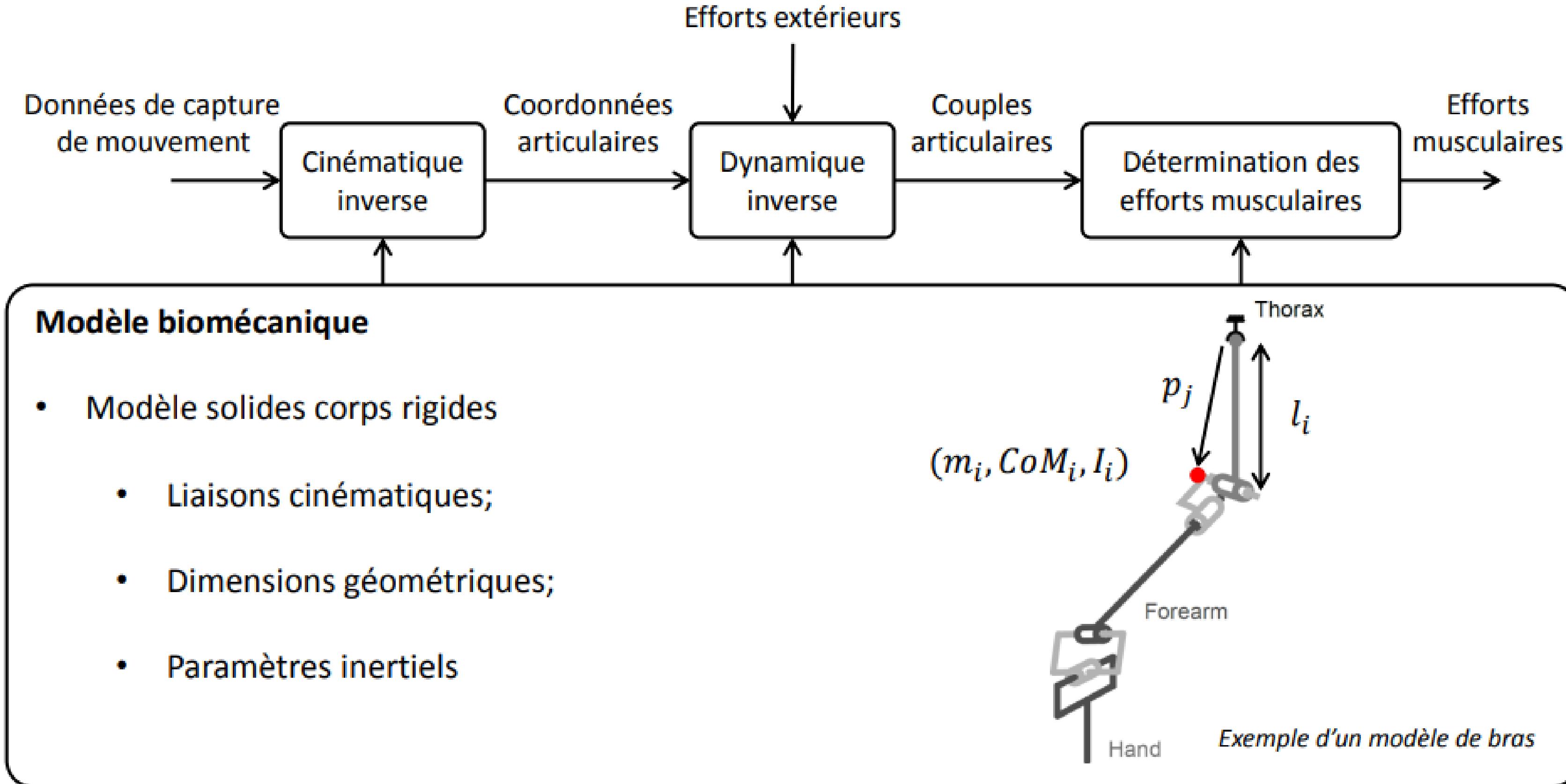


Quésaco ?



Dynamique inverse

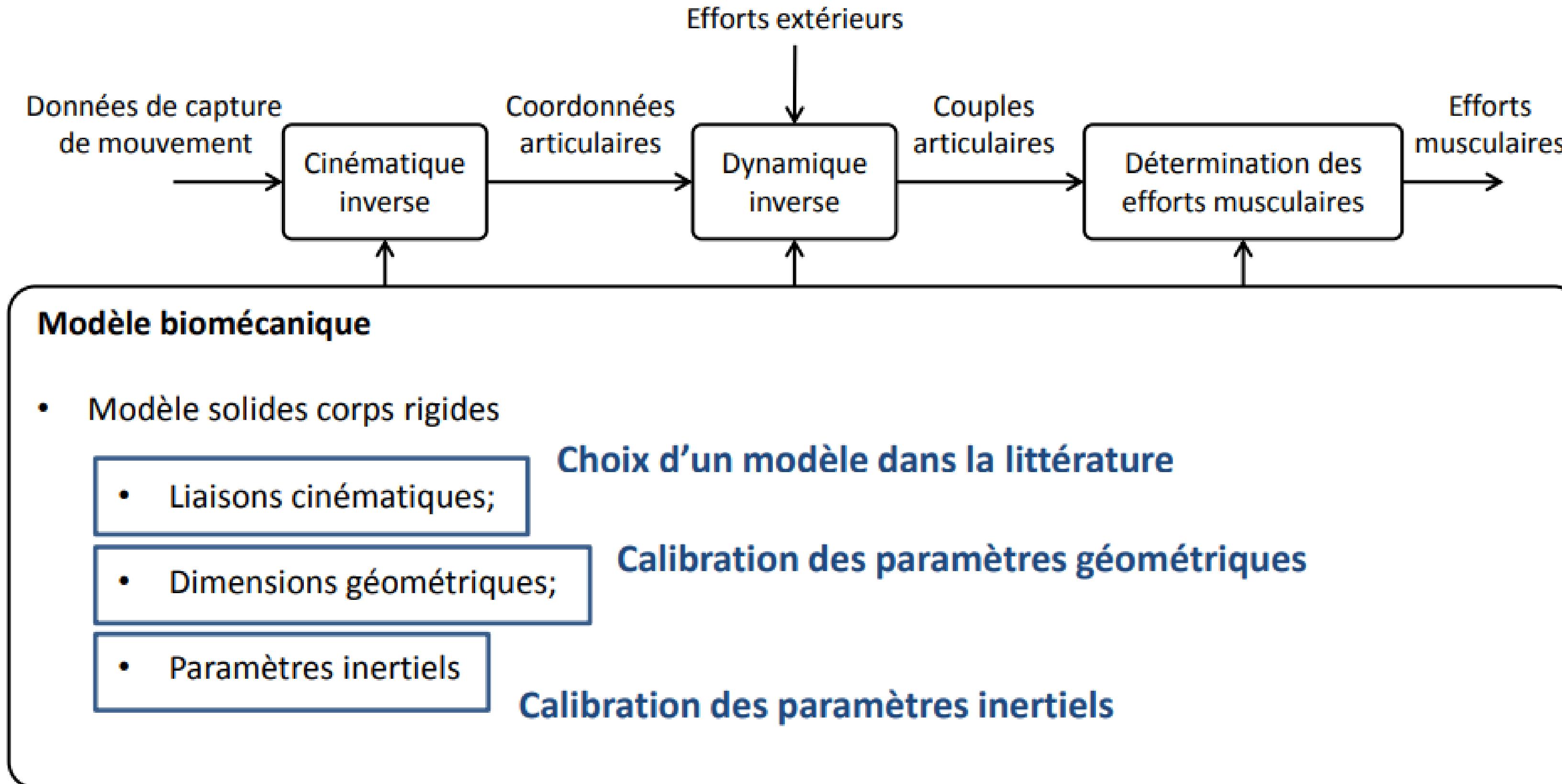
Quésaco ?



Détermination d'un modèle biomécanique personnalisé avec l'utilisation d'une capture de mouvement

Dynamique inverse

Quésaco ?



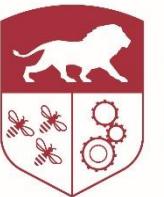
Détermination d'un modèle biomécanique personnalisé avec l'utilisation d'une capture de mouvement

Dynamique inverse

Expérimentations

- Nombre de sujets / testeurs
- Choix des paramètres
 - Taille
 - Masse
 - Genre
- Définition, calibration du dispositif expérimental

Dynamique inverse



Pré-calibration

Utilisation de données anthropométriques

Taille du sujet

Mise à l'échelle uniforme
dans toutes les directions



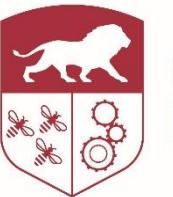
Masse du sujet

Régression linéaire

$$(m_i^{init}, CoM_i^{init}, I_i^{init})$$

Calibration réalisée à partir d'un modèle pré-calibré

Dynamique inverse



Méthode d'optimisation



Pour un ensemble de postures :

- Paramètres géométriques : invariants cinématiques
- Identification des paramètres géométriques permettant de minimiser l'erreur de reconstruction

Dynamique inverse

Méthode d'optimisation

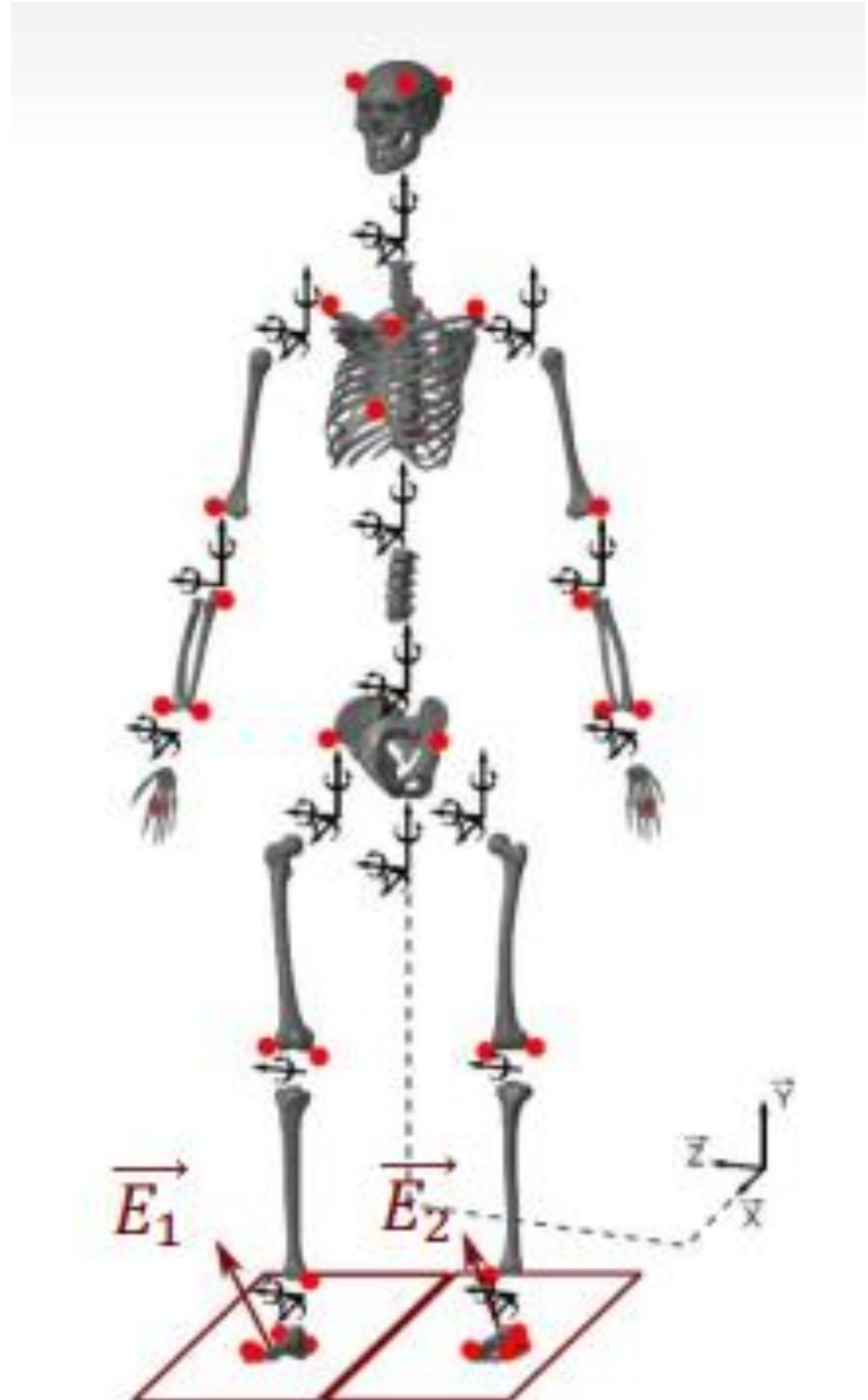
- Liaison 6 degrés de liberté (6 DoF) → floating base

- Résolution dynamique

$$M \begin{pmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}}_{6dof} \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_* \end{pmatrix} + C \begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{q}}_{6dof} \\ \dot{\boldsymbol{q}}_* \end{pmatrix} + K \begin{pmatrix} \boldsymbol{q}_{6dof} \\ \boldsymbol{q}_* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{6dof} \\ \boldsymbol{\lambda}_* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{E}_{6dof} \\ \boldsymbol{E}_* \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$

- S'il n'y a aucune erreur dans la résolution dynamique : $\boldsymbol{\lambda}_{6dof} = \mathbf{0}$

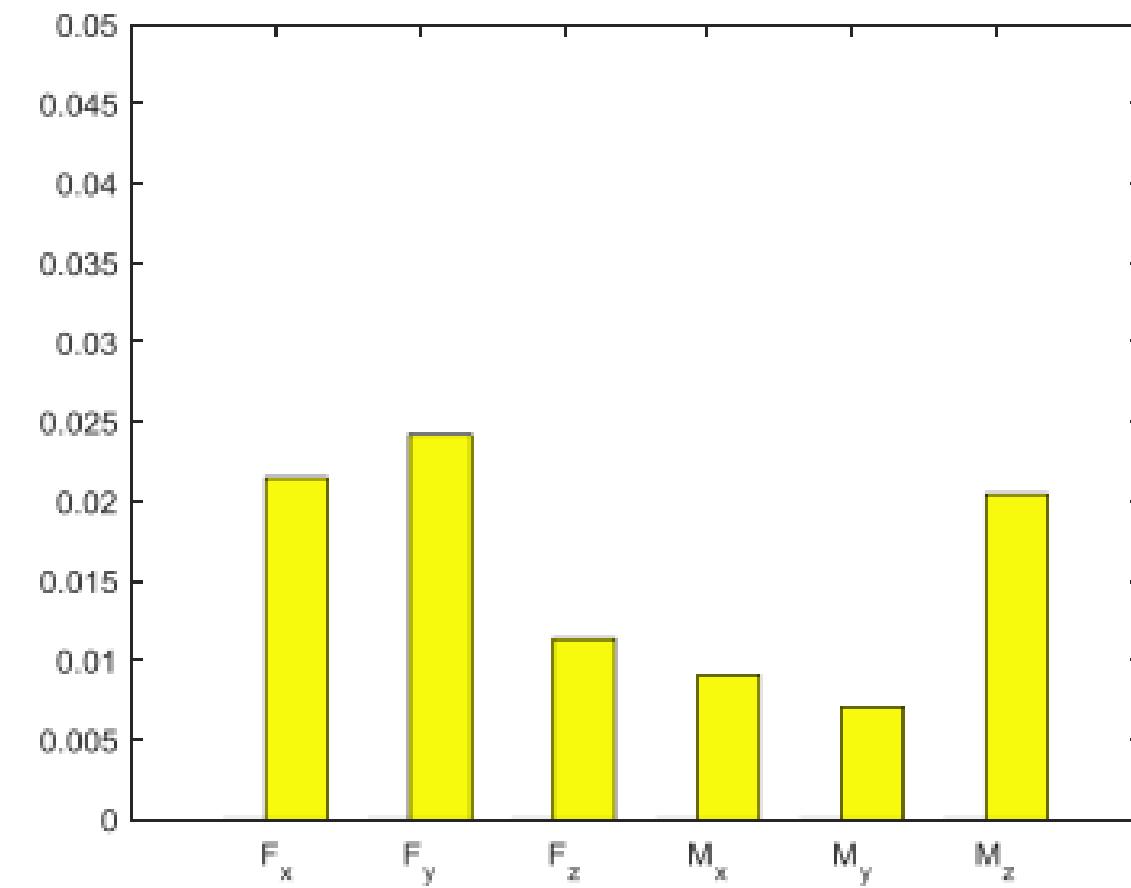
Principe de la méthode : Utilisation des efforts généralisés dans la liaison 6Dof pour identifier les paramètres inertIELS



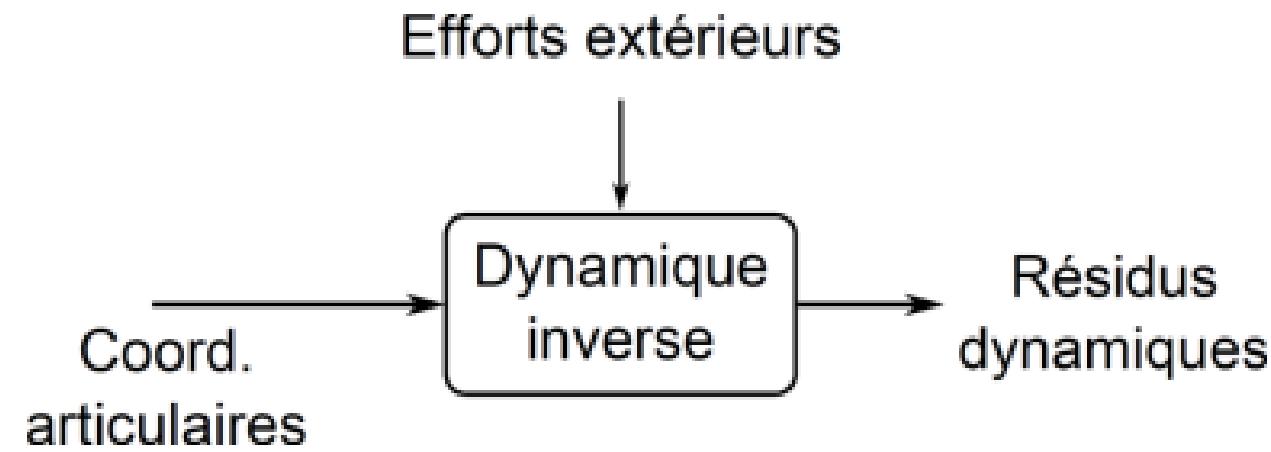
Dynamique inverse

Calibration des paramètres inertIELS

Problématique : répercussion des erreurs cinématiques et des erreurs de plateformes dans la résolution dynamique



Résidus dynamiques (efforts normalisés par mg et moments par mgh)

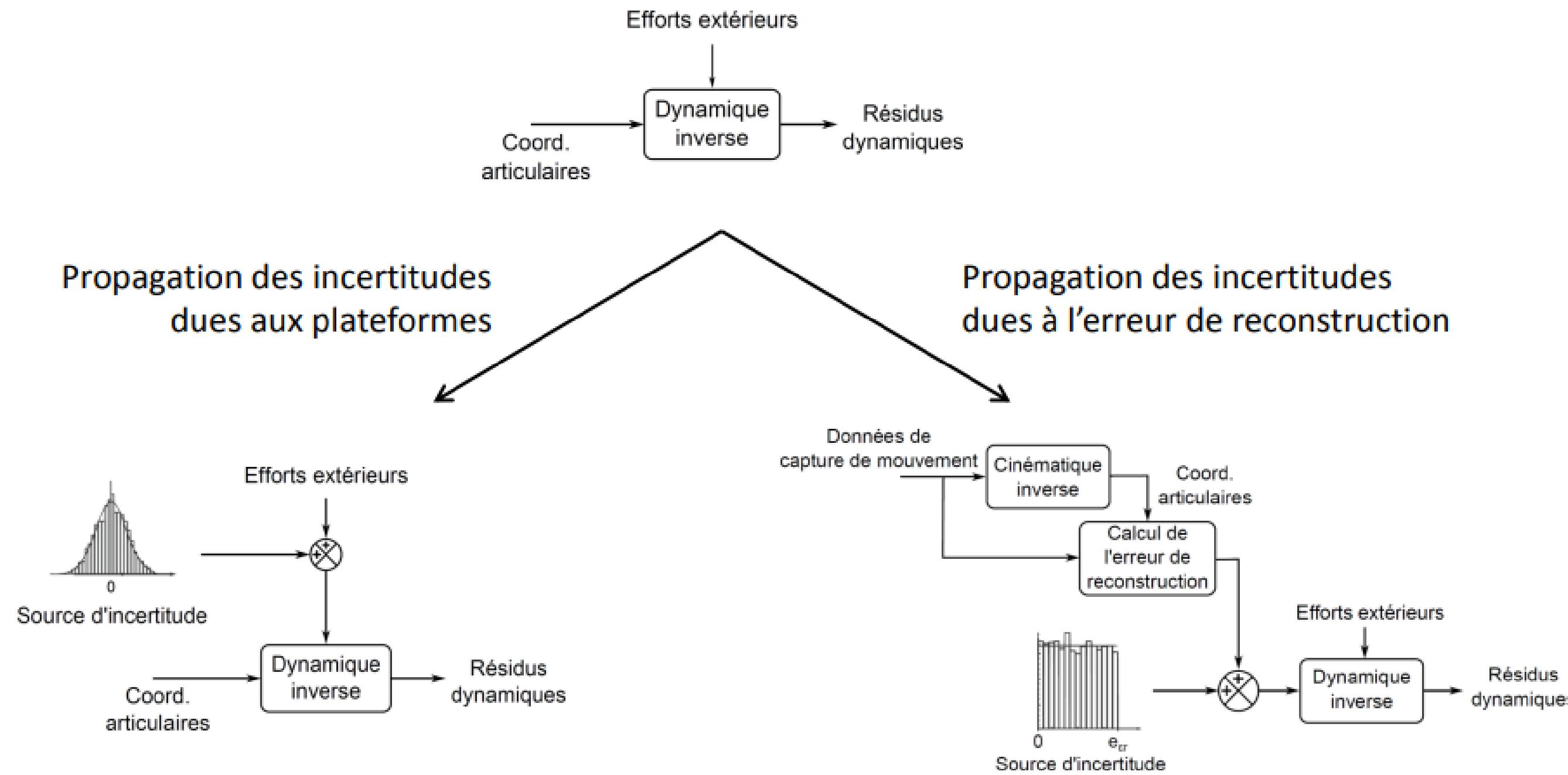


Possibilité de calibrer les paramètres inertIELS sans overfitting ?

Dynamique inverse

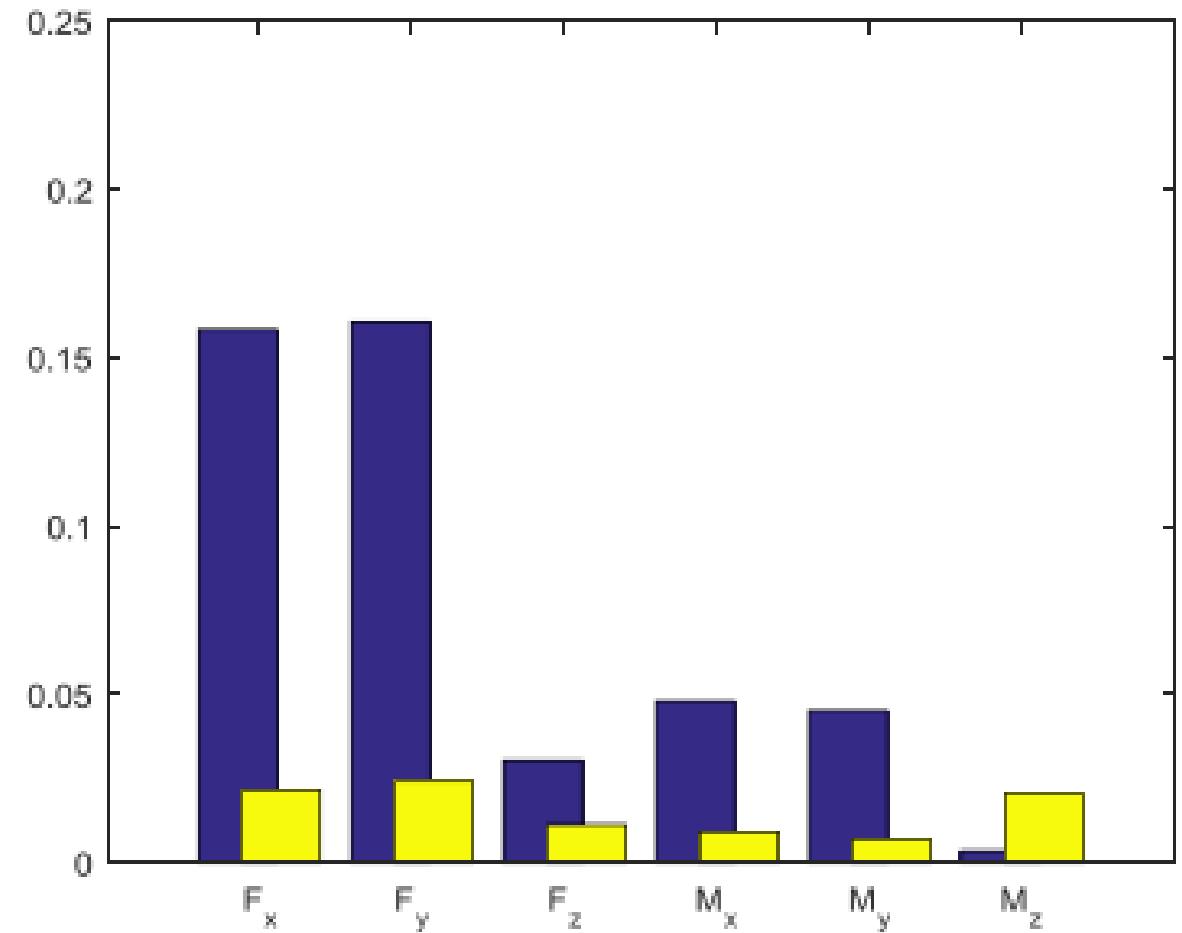
Calibration des paramètres inertiels – Etude de sensibilité

Utilisation des méthodes de Monte Carlo



Dynamique inverse

Calibration des paramètres inertiels – Etude de sensibilité

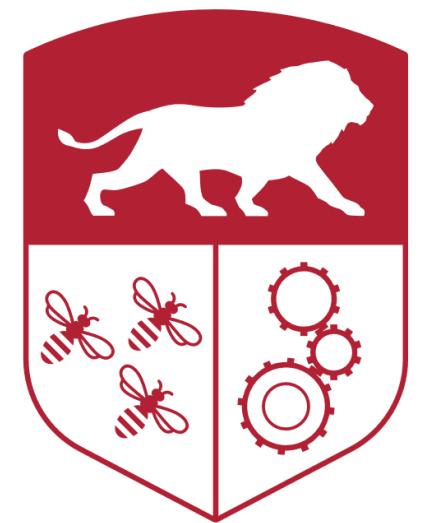


Résidus dynamiques (efforts normalisés par mg et moments par mgh)

Incertitudes dues à l'erreur cinématique et aux plateformes (efforts normalisés par mg et moments par mgh)

Incertitude plus importante que les résidus dynamiques à optimiser

- Modèle cinématique trop pauvre
- Données anthropométriques proches du sujet



**CENTRALE LYON
ENISE**

58, rue Jean Parot 42100 Saint-Étienne
www.enise.ec-lyon.fr