

**Cours Licence L2**

**UE 31  
BIOMECHANIQUE**

O. WHITE

## Cours Licence L2

# UE 31 BIOMECHANIQUE

- Méthodologie
- Relation fondamentale
- Sauts standardisés
- Impulsions
- Examen

*OBJECTIF*  
**STAPS**



Licence  
et  
Master

# Biomécanique

- ✿ L'essentiel à connaître
- ✿ Exercices et annales corrigés et commentés

Romuald Lepers  
Alain Martin



# Hamiltonian and Lagrangian dynamics

$$T = \sum_i \frac{1}{2} m_i \left( \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right)^2 = \sum_i \frac{1}{2} m_i \left( \cancel{\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t}} \right)^2$$

$$+ \sum_j \left( \sum_i m_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} \cdot \cancel{\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t}} \right) \dot{q}_j + \frac{1}{2} \sum_{j,k} \left( \sum_i m_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k$$

- For scleronomous generalized coordinates

$$\vec{r}_i = \vec{r}_i(q_1, q_2, \dots, q_M)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j,k} \left( \sum_i m_i \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_j} \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k = L_2$$

- Then  $H = L_2 - L_0 = T - L_0$

- If  $V = -L_0$

$$H = T + V = E_{mec}$$

# ETUDE DYNAMIQUE DU GESTE SPORTIF

## 1. INTRODUCTION

Mécanique = Etude des mouvements

**Biomécanique** = Etude des mouvements du corps humain

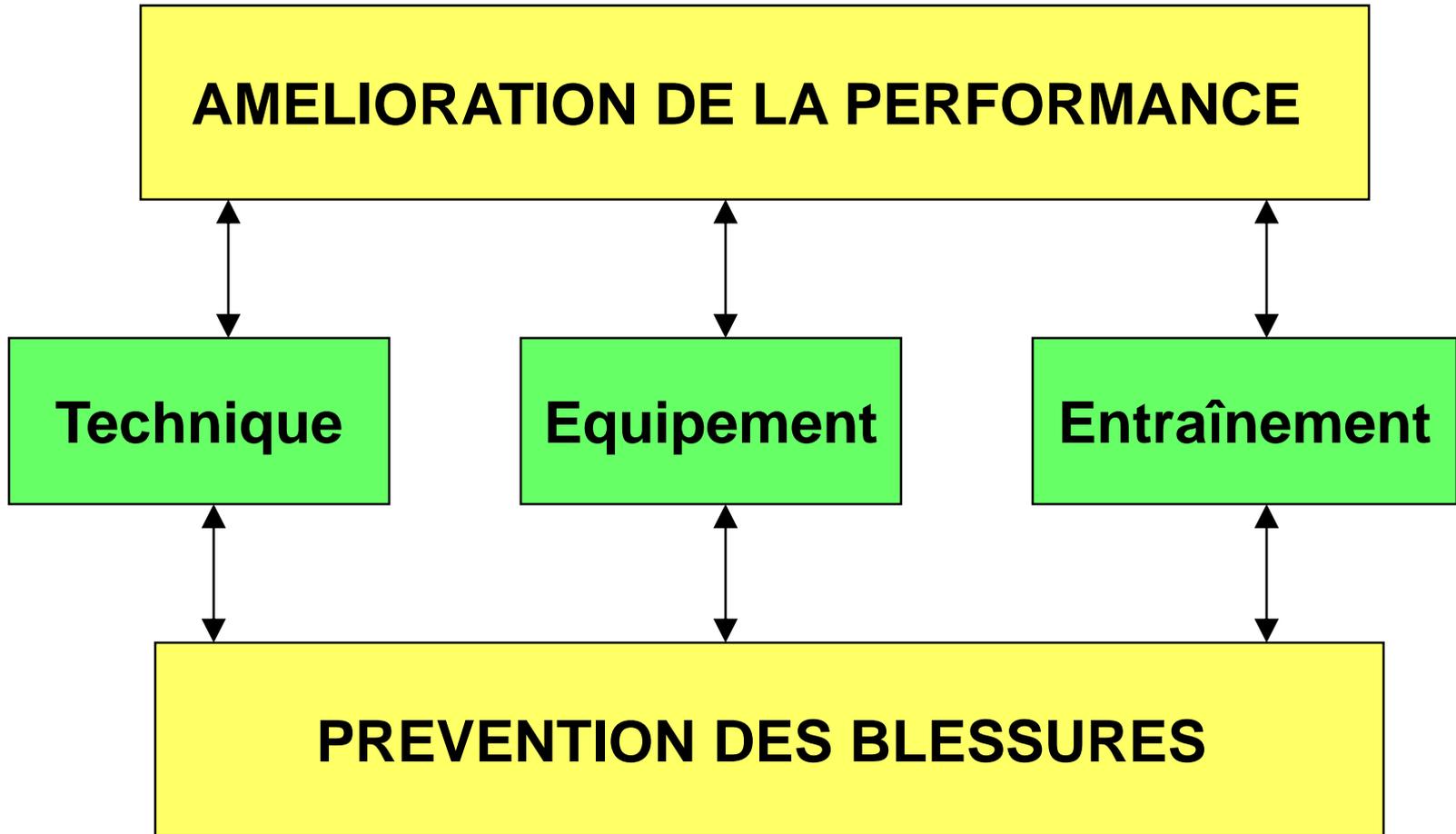
19<sup>ème</sup> siècle : Etienne Jules **Marey (1830-1904)**

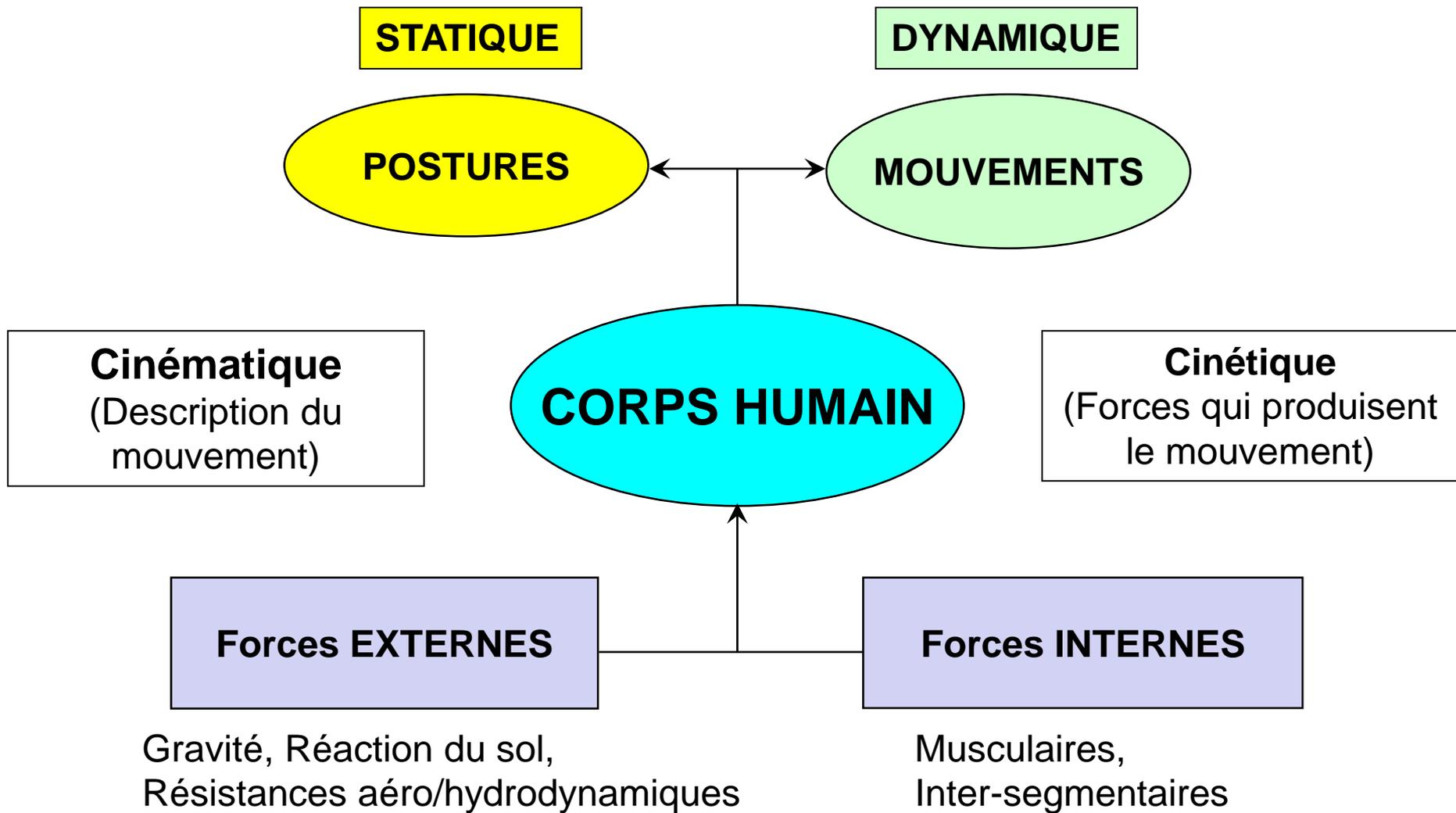
→ Développement important après la seconde guerre mondiale

### Champs d'investigation :

- **Sport**
- Automobile
- Rééducation fonctionnelle, Chirurgie orthopédique
- Cinéma « motion capture »

# Buts principaux de la biomécanique





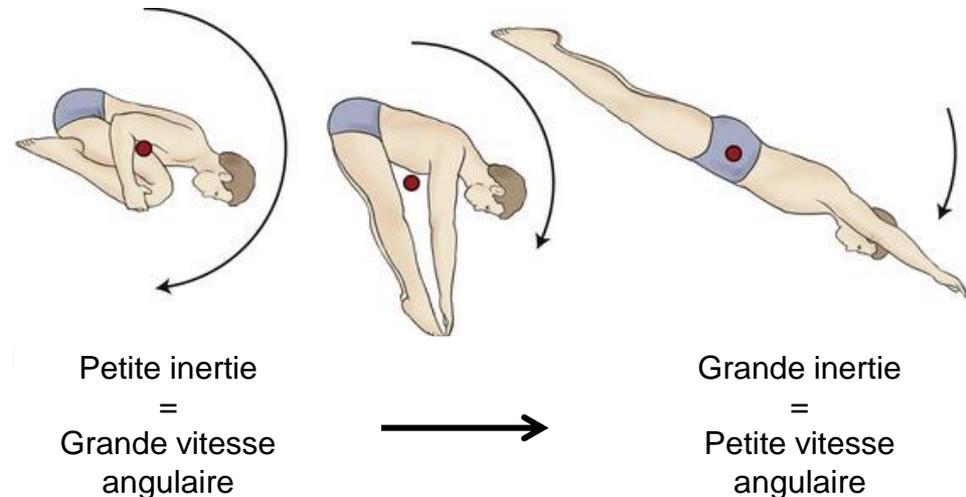
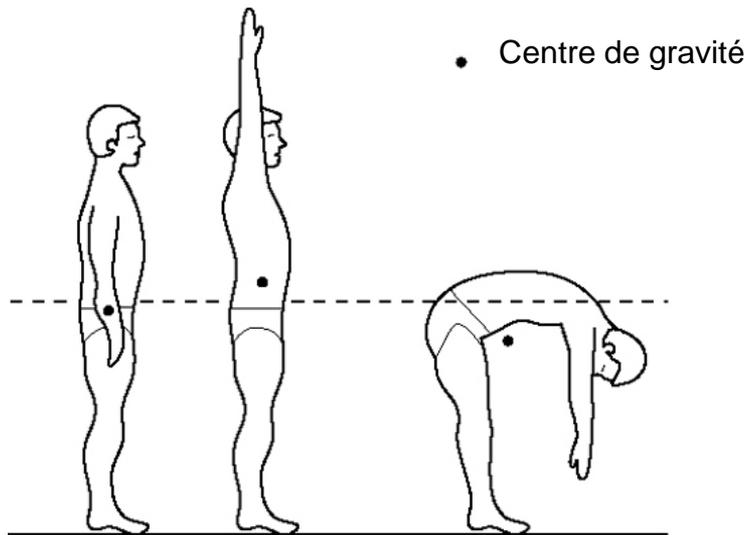
***Biomécanique* = Appréhender les postures et les mouvements dans le cadre de ce double système de forces**

## 2. OUTILS ET TECHNIQUES

L'étude du mouvement humain nécessite la connaissance des :

### a) Constantes biomécaniques du corps

- Longueur, masse, position du centre de gravité (CdG), inertie des différents segments corporels
- Lieu d'insertion des différents muscles par rapport aux articulations



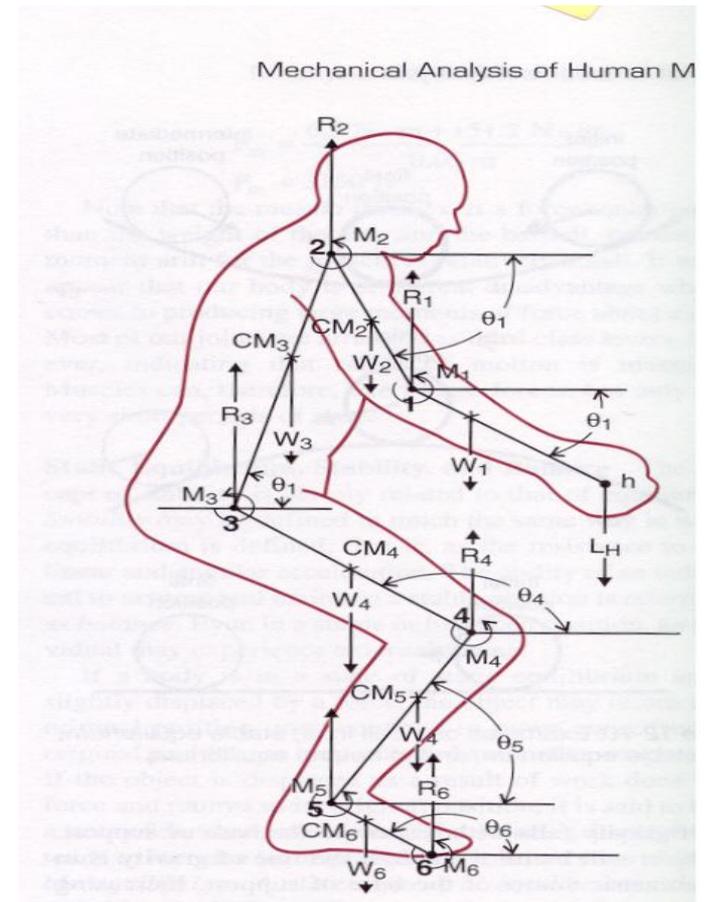
# 2. OUTILS ET TECHNIQUES

L'étude du mouvement humain nécessite la connaissance des :

## a) Constantes biomécaniques du corps

TABLE 4.1 Anthropomorphic Data

Segment	Definition	Segment Weight/ Body Weight	Center Mass/ Segment Length		Radius Gyration/ Segment Length	
			Proximal	Distal	Proximal	Distal
Hand	Wrist axis/knuckle II middle finger	0.006	0.506	0.494	0.587	0.577
Forearm	Elbow axis/ulnar styloid	0.016	0.430	0.570	0.526	0.647
Upper arm	Glenohumeral axis/elbow axis	0.028	0.436	0.564	0.542	0.645
Forearm and hand	Elbow axis/ulnar styloid	0.022	0.682	0.318	0.827	0.565
Total arm	Glenohumeral joint/ulnar styloid	0.050	0.530	0.470	0.645	0.596
Foot	Lateral malleolus/head metatarsal II	0.0145	0.50	0.50	0.690	0.690
Leg	Femoral condyles/medial malleolus	0.0465	0.433	0.567	0.528	0.643
Thigh	Greater trochanter/femoral condyles	0.100	0.433	0.567	0.540	0.653
Foot and leg	Femoral condyles/medial malleolus	0.061	0.606	0.394	0.735	0.572
Total leg	Greater trochanter/medial malleolus	0.161	0.447	0.553	0.560	0.650
Head and neck	C7-T1 and 1st rib/ear canal	0.081	1.000		1.116	
Shoulder mass	Sternoclavicular joint/glenohumeral axis		0.712	0.288		
Thorax	C7-T1/T12-L1 and diaphragm	0.216	0.82	0.18		
Abdomen	T12-L1/L4-L5	0.139	0.44	0.56		
Pelvis	L4-L5/greater trochanter	0.142	0.105	0.895		
Thorax and abdomen	C7-T1/L4-L5	0.355	0.63	0.37		
Abdomen and pelvis	T12-L1/greater trochanter	0.281	0.27	0.73		
Trunk	Greater trochanter/glenohumeral joint	0.497	0.50	0.50		
Trunk, head, neck	Greater trochanter/glenohumeral joint	0.578	0.66	0.34	0.830	0.607
Head, arm, trunk	Greater trochanter/glenohumeral joint	0.678	0.626	0.374	0.798	0.621



## **b) Variables cinématiques**

*Description du mouvement (déplacement, vitesse, accélération)*

### **Méthodes de mesure directe :**

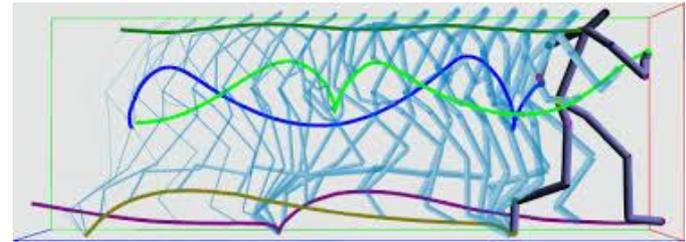
- Déplacements → goniomètres (mesures des angles)
- Accélérations → accéléromètres



## Méthodes de mesure indirecte : Imagerie (vidéo)

Repérage des points anatomiques : marqueurs réfléchissants ou actifs + caméras IR

→ Logiciels de calcul : position, vitesse, accélération



Modélisation « en bâtons » ou « filaire »



## c) Variables cinétiques

*i.e. Forces qui déterminent le mouvement*

### Capteur de force



### Ergomètre isocinétique



Câble + Capteur



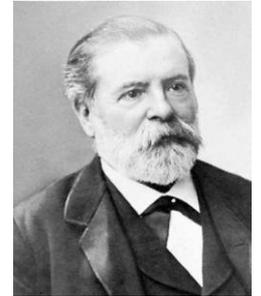
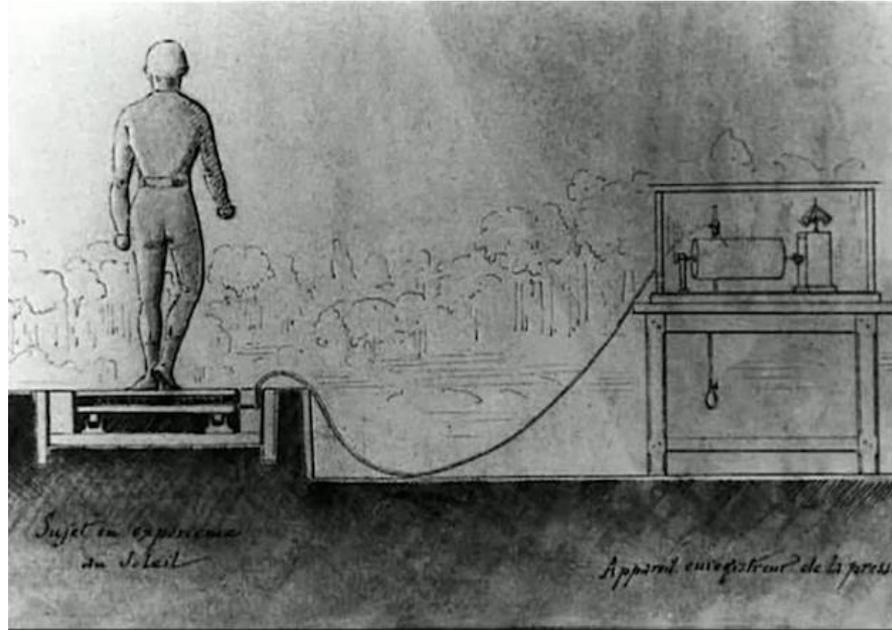
# Plateforme de forces (PFF)

## Invention de la plateforme de force

Chaussures exploratrices



Table dynamométrique

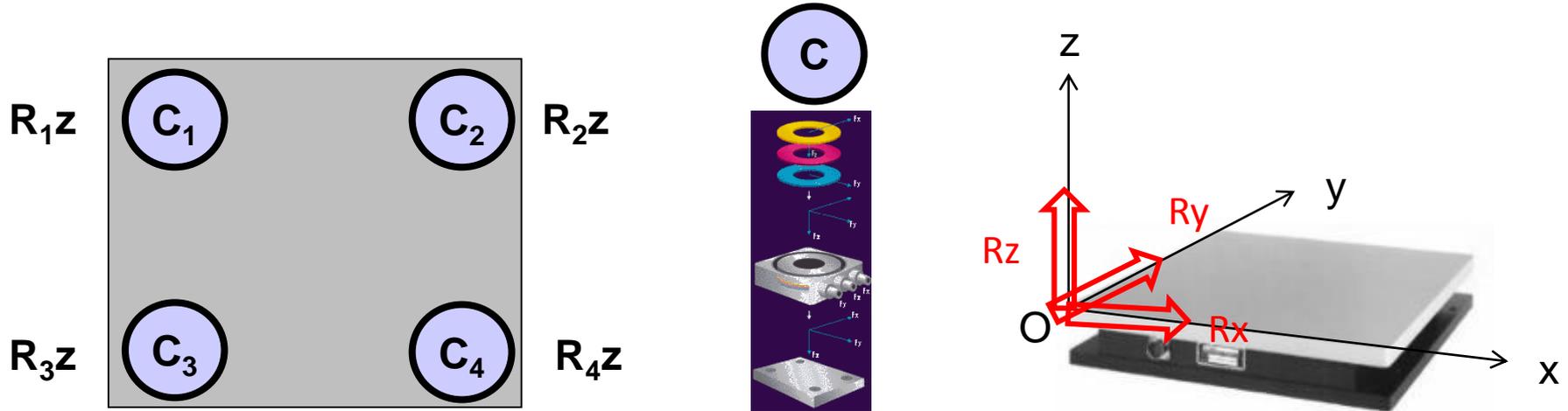


E.J. MAREY  
(1830-1904)

Capteurs (transducteurs) pneumatiques → Pression sol → Compression des chambres à air → Tubes pneumatiques → Déplacement plume sur papier tournant

# Plateforme de forces (PFF)

Plateau + 4 capteurs (Transducteurs : action mécanique → signal électrique)



Capteurs tri-dimensionnels : Mesure de la réaction du sol selon les trois axes  
(R<sub>x</sub>, R<sub>y</sub>, R<sub>z</sub>)

**R : Force de réaction verticale**

**Réaction totale verticale :  $R_z = R_{1z} + R_{2z} + R_{3z} + R_{4z}$**

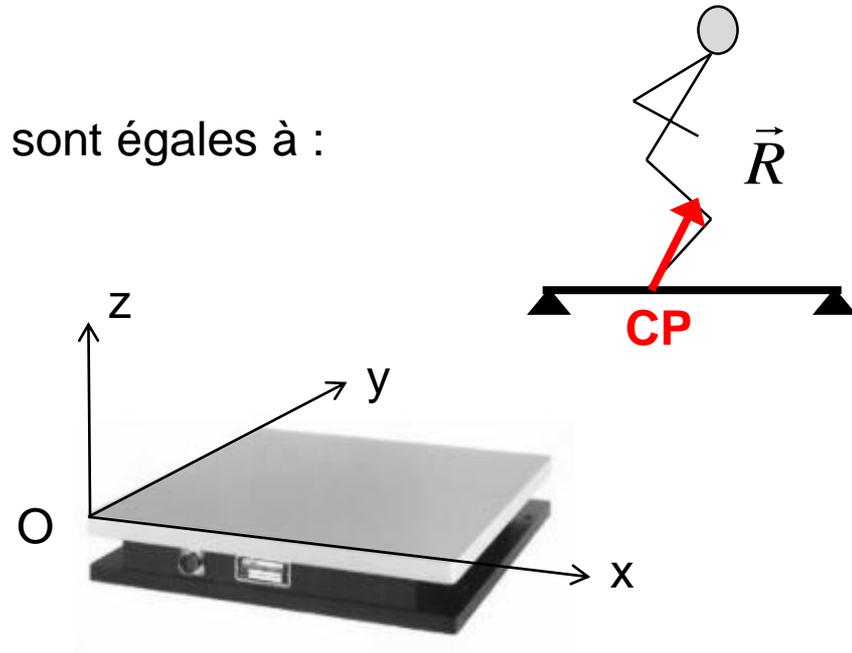


## Centre des forces de pression (CP)

Le centre de pression CP est le barycentre des forces verticales, c'est aussi le point d'application de la résultante des forces au sol.

Les coordonnées du CP dans le repère (Oxy) sont égales à :

$$X_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^4 R_{zi} x_i}{\sum_{i=1}^4 R_{zi}} \quad Y_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^4 R_{zi} y_i}{\sum_{i=1}^4 R_{zi}}$$



$x_i$  et  $y_i$  : Coordonnées du capteur  $C_i$ ,  $i = 1$  à  $4$  dans le repère (Oxy)

$R_{zi}$  : Valeur de la force verticale mesurée par le capteur  $C_i$

➔ Voir Applications

# 3. RELATION FONDAMENTALE DE LA DYNAMIQUE (RFD)

## 3.1 Définition:

Mouvements en translation :

En statique :  $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$

$\sum \vec{F}_{ext}$  : Somme des forces extérieures au corps

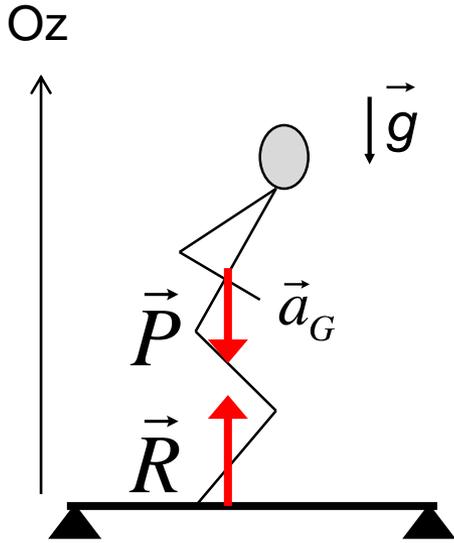
En dynamique :  $\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a}_G$

$\vec{a}_G$  : Accélération du centre de gravité du corps (CdG)

$m$  : Masse du corps

**Donc, le mouvement en translation du CdG est complètement déterminé si l'on connaît les forces extérieures qui s'appliquent sur le corps.**

## 3.2 Cas d'un système poly-articulé (corps humain)



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

$$\vec{P} + \vec{R} = m \cdot \vec{a}_G$$

En projetant sur l'axe ( $Oz$ ) :

$$-P + R_z = m \cdot a_{Gz}$$

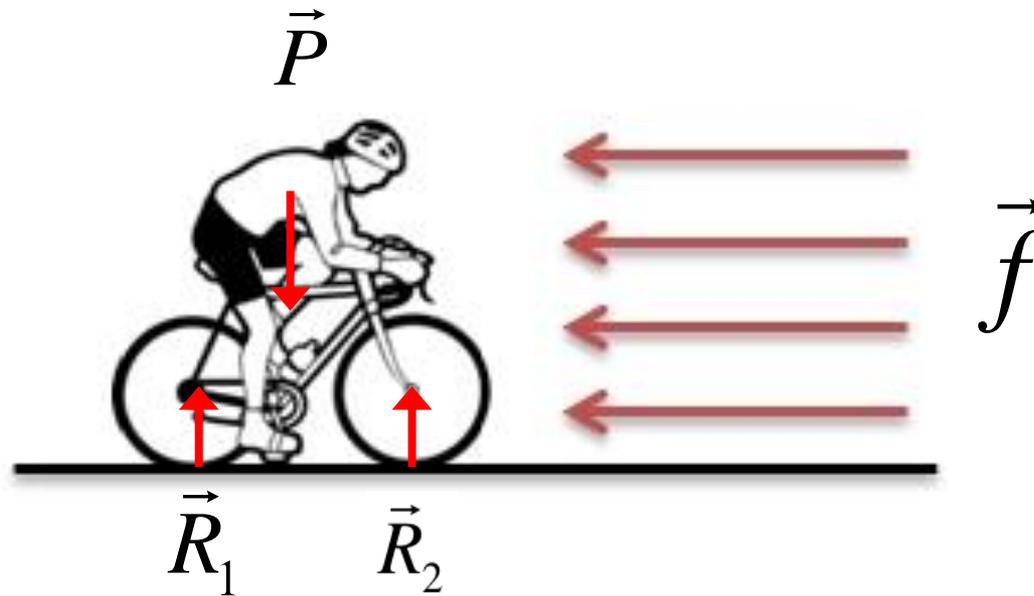
$$-mg + R_z = m \cdot a_{Gz}$$

- Le mouvement du CdG ne dépend que des forces extérieures
- La PFF ne permet pas de distinguer la participation des différents segments au mouvement

### 3.3 Conséquences

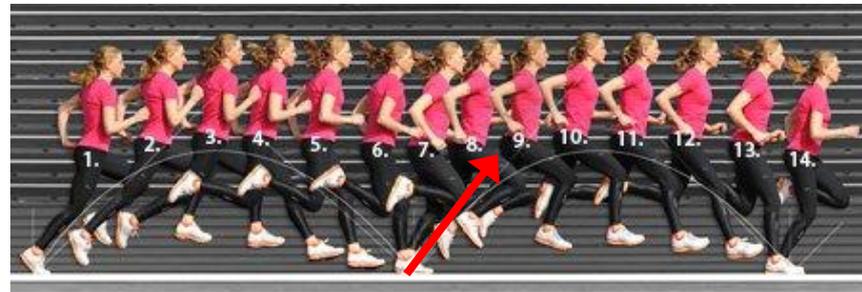
a) Cas général de la RFD :  $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = m \cdot \vec{a}_G$

$\vec{f}$  : Forces de frottement de l'air



b) Si on connaît les caractéristiques cinématiques du mvt ( $\vec{a}_G, V_G, X_G$ ), on peut donc en déduire la résultante des forces au sol (**impulsion**)

$$\vec{P} + \vec{R} = m.\vec{a}_G \quad \boxed{\vec{a}_G \rightarrow \vec{R}}$$



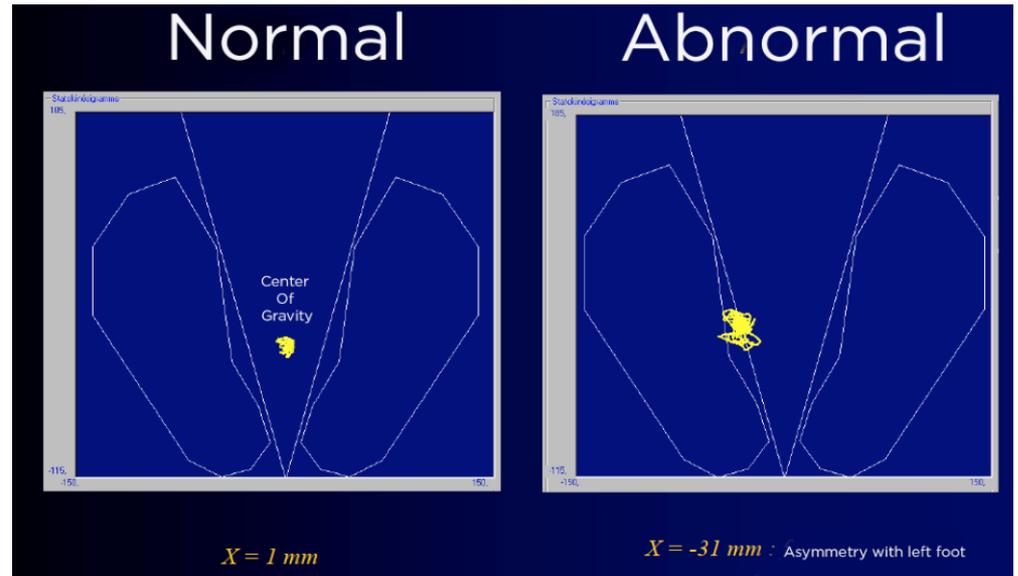
$\vec{R}$  (impulsion)

c) Inversement, si on connaît la résultante des forces au sol, on peut donc en déduire les caractéristiques cinématiques du mouvement

→ **Oscillations du CdG** lors d'un test d'équilibre

$$\vec{P} + \vec{R} = m \cdot \vec{a}_G$$

$$\vec{R} \rightarrow \vec{a}_G$$



## d) Cas des mouvements aériens (sauts)

$$\text{RFD : } \vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = m \cdot \vec{a}_G$$

$$\text{En l'air : } \vec{R} = \vec{0}$$

$$\vec{f} = \vec{0}$$

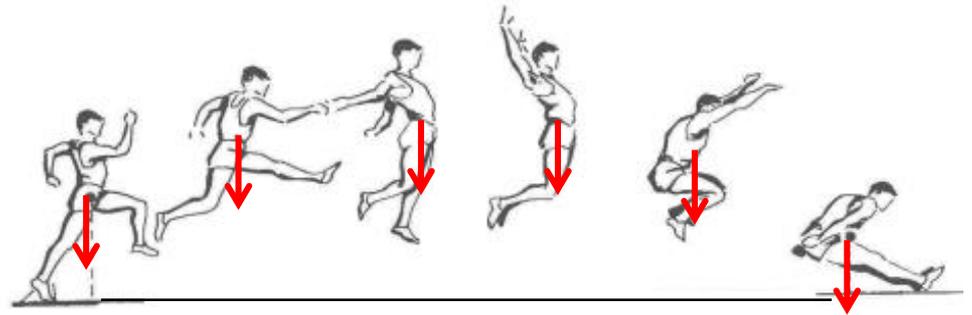
$$\text{Donc : } \vec{P} = m \cdot \vec{a}_G$$

$$m \cdot \vec{g} = m \cdot \vec{a}$$

$$\vec{g} = \vec{a}$$

$$-g = a_z$$

$$\vec{g} = \vec{a}$$



**La seule accélération subie par le sujet est l'accélération de la gravité (g)**

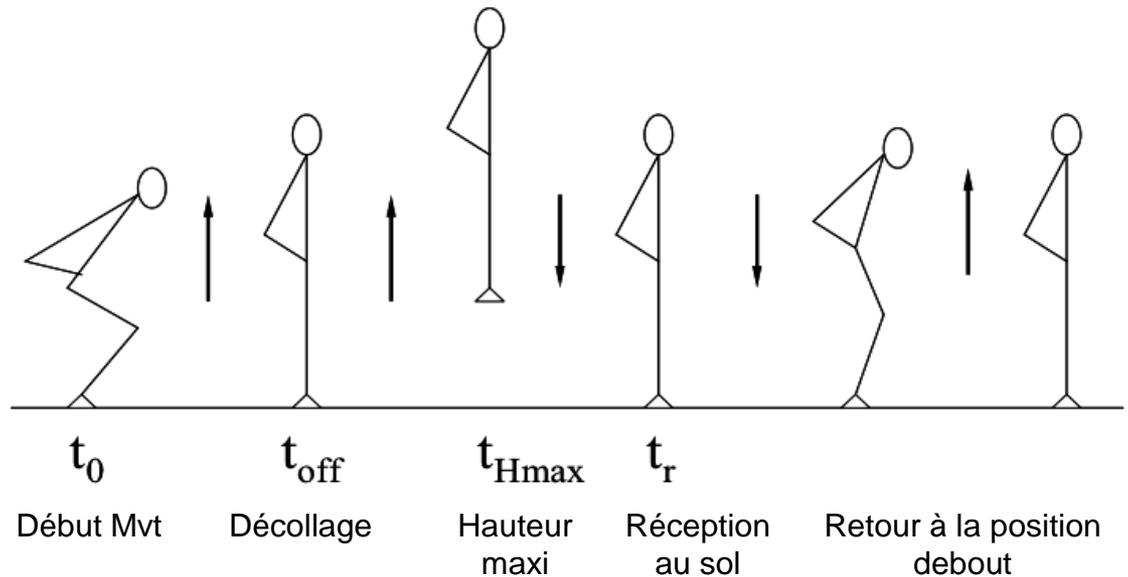
# 4. LES SAUTS STANDARDISES

Sauts effectués sans les bras : mesure des capacités musculaires des membres inférieurs seulement. Les mains restent sur les hanches ou la nuque.

## 4.1 Le Squat Jump (SJ)

Départ genoux fléchis 90°

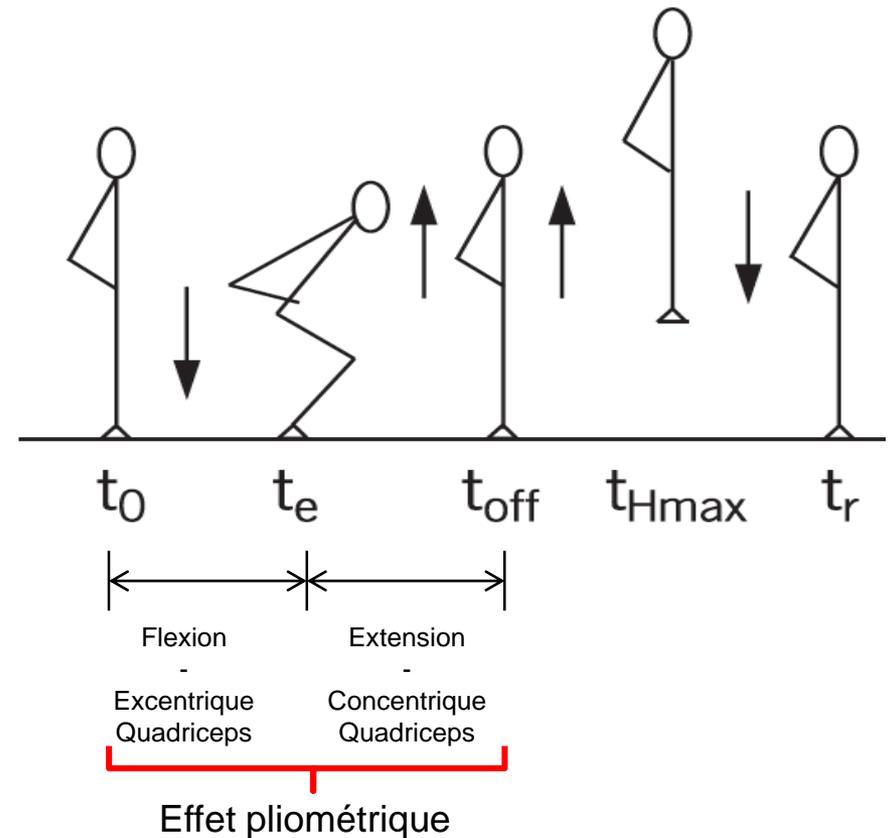
Extension vers le haut sans contre-mouvement vers le bas



## 4.2 Le saut avec contre mouvement Counter Movement Jump (CMJ)

Départ debout

Enchaînement flexion-extension le plus vite possible

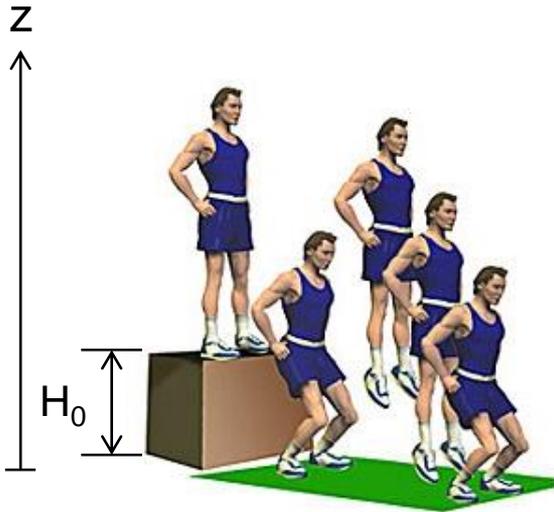


## 4.3 Le saut en contre bas – Drop Jump (DJ)

Départ debout surélevé

Chute vers le bas

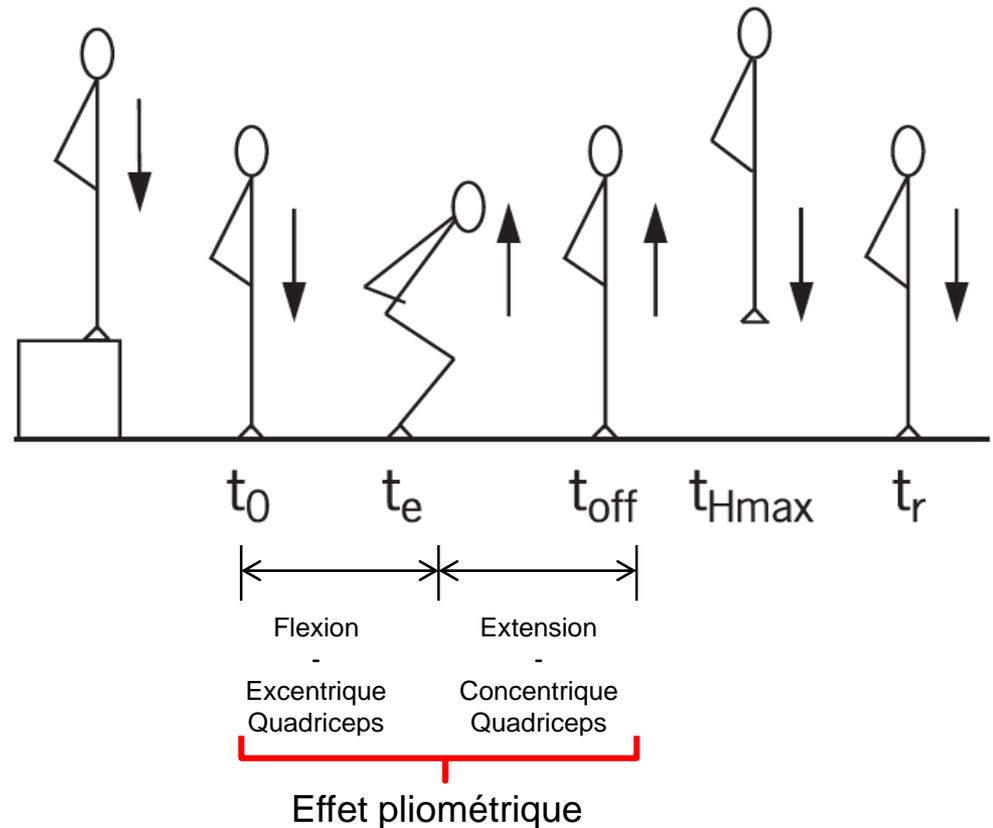
Amorti et extension vers le haut le plus vite possible



$H_0$  : hauteur de l'estrade  
20 à 60 cm

Vitesse verticale  
d'arrivée au sol

$$V_z(t_0) = -\sqrt{2gH_0}$$



# 5. L'IMPULSION

## 5.1 Définition de l'impulsion



En pratique, l'impulsion correspond à une force appliquée au sol pendant un certain temps. Cela correspond aussi à la capacité de donner de la vitesse à sa masse.

$$\text{Impulsion} = \text{Force} \times \text{Temps}$$

ou

$$\text{Impulsion} = \text{Masse} \times \text{Variation de vitesse}$$

L'impulsion s'exprime en N.s (ou en kg.m/s)

**Et pas N/s !!!!**

On la note souvent J, pour ne pas la confondre avec « I » l'inertie.

L'impulsion est un vecteur, qui peut avoir des composantes dans les 3 directions de l'espace (X,Y et Z).

- Lors d'un saut en longueur : l'impulsion est vers l'avant et vers le haut
- Lors d'un CMJ : l'impulsion est uniquement verticale.

$$\vec{J} = m.[\vec{V}_{off} - \vec{V}_0] = \int_{t_0}^{t_{off}} \sum \vec{F}_{ext} .dt$$

$t_0$  : début du mvt  
 $t_{off}$  : fin du mvt

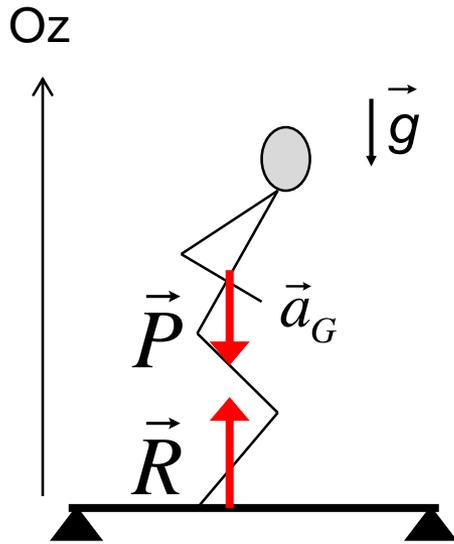
Si les forces extérieures sont le poids et la réaction du sol :  $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{P} + \vec{R}$   
Les 3 composantes de l'impulsion sont alors égales à :

$$J_x = m.[V_{x_{off}} - V_{x_0}] = \int_{t_0}^{t_{off}} R_x .dt$$

$$J_y = m.[V_{y_{off}} - V_{y_0}] = \int_{t_0}^{t_{off}} R_y .dt$$

$$J_z = m.[V_{z_{off}} - V_{z_0}] = \int_{t_0}^{t_{off}} (R_z - mg) .dt$$

## 6. ETUDE DES SAUTS STANDARDISES SUR PFF



Rappel

$$\vec{P} + \vec{R} = m \cdot \vec{a}_G$$

En projection sur l'Oz

$$-P + R_z = m \cdot a_{Gz}$$

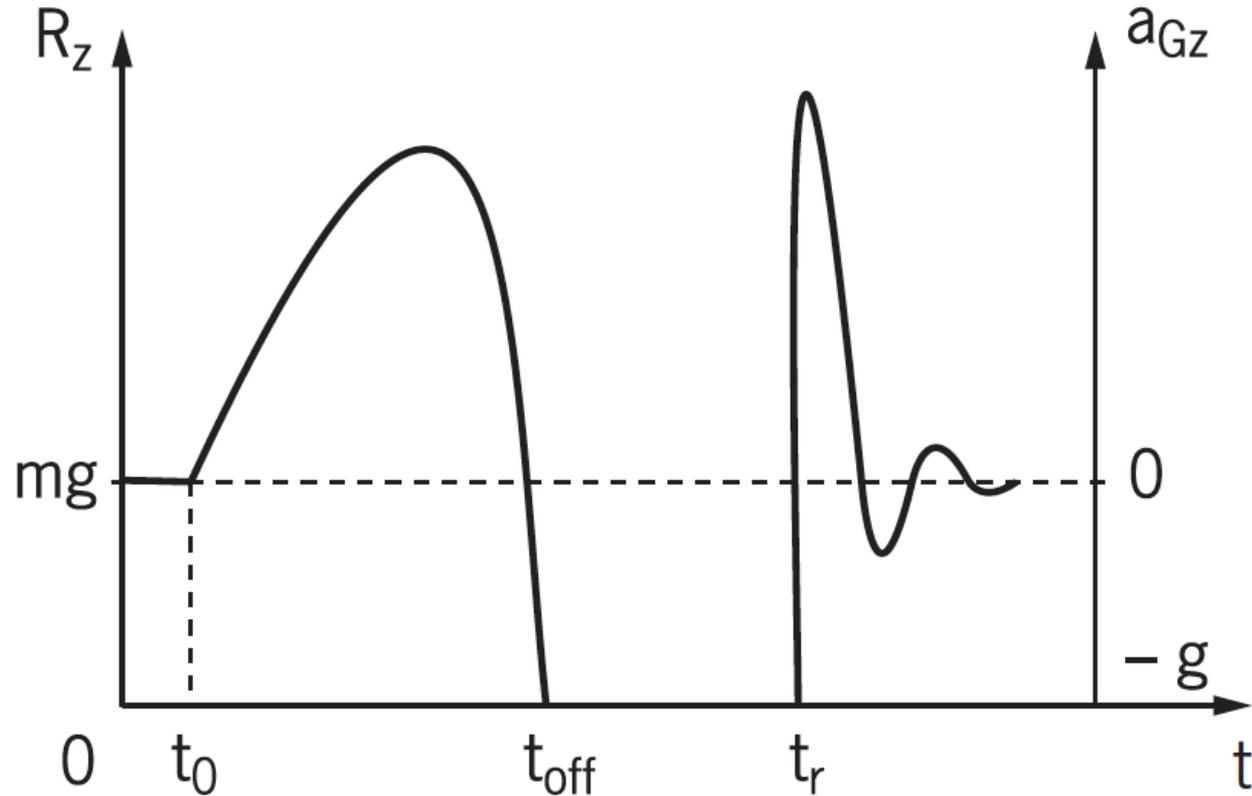
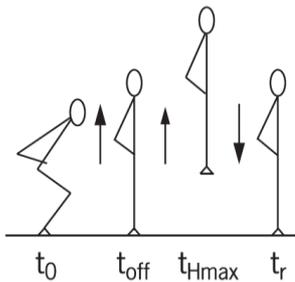
$$-mg + R_z = m \cdot a_{Gz}$$

Au cours d'un saut, la réaction du sol ( $R_z$ ) et l'accélération du CdG ( $a_{Gz}$ ) vont varier de la même manière à une constante près ( $-mg$ ).

Les courbes  $R_z(t)$  et  $a_{Gz}(t)$  seront donc superposables.

# 6.1 Evolution de la réaction du sol ( $R_z$ ) et l'accélération du CdG ( $a_{Gz}$ )

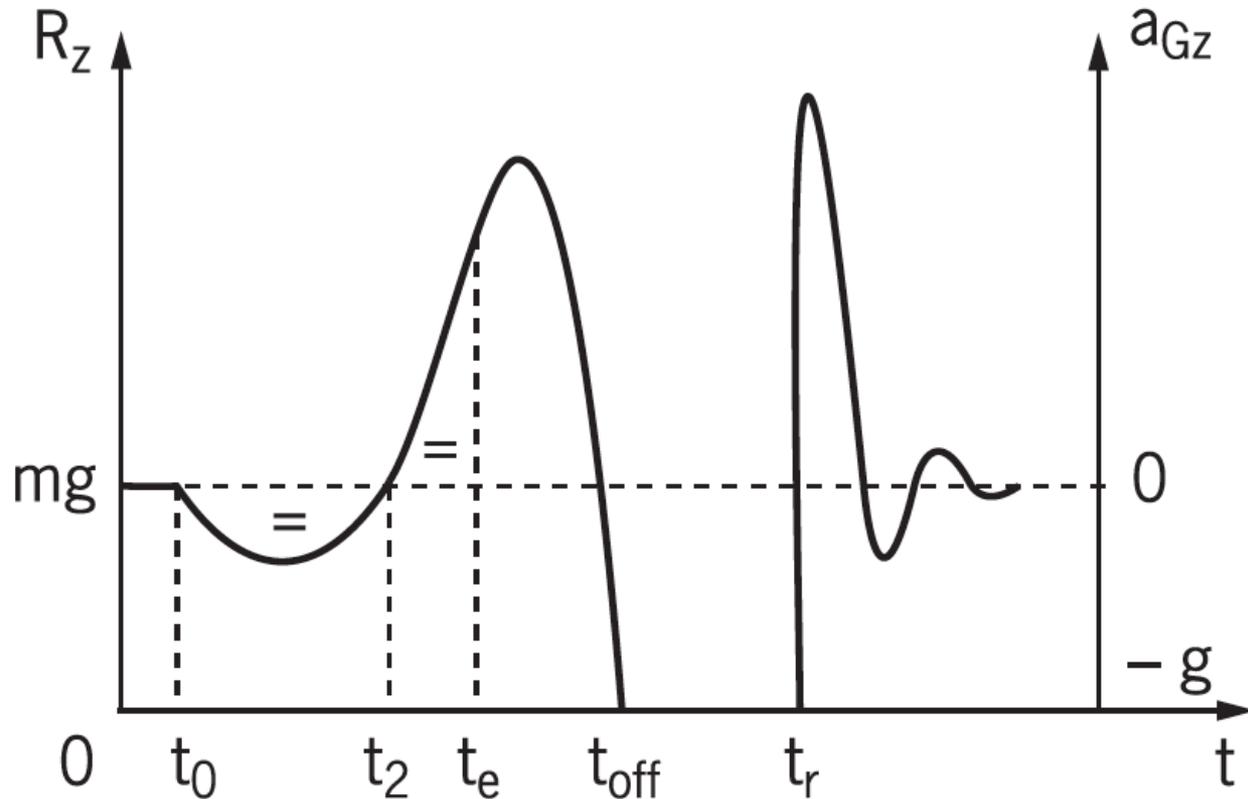
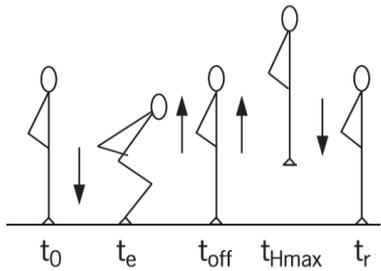
## SQUAT JUMP



**Extension**  
( $R_z > mg$ )  
Accélération  
vers le haut  
 $a_{Gz} > 0$

**Phase  
aérienne**  
 $R_z = 0$   
 $a_{Gz} = -g$

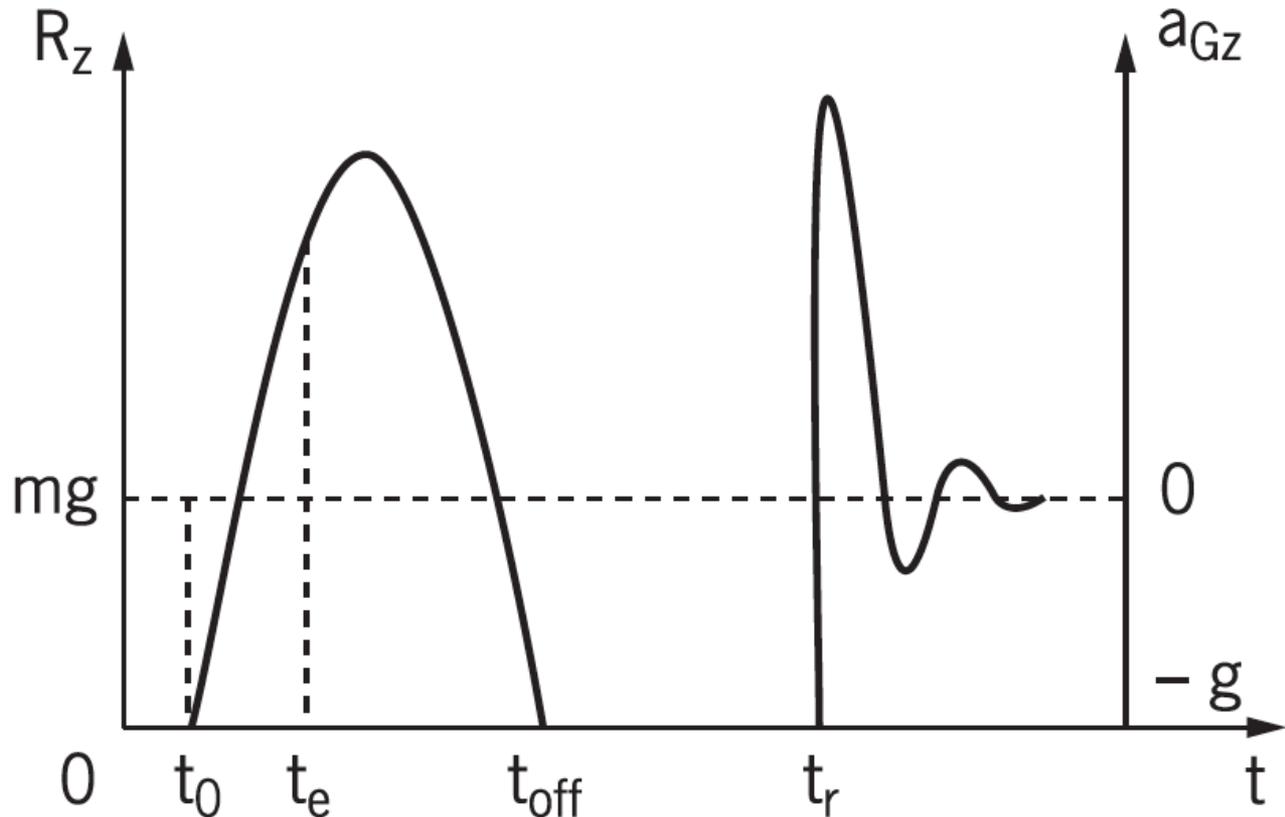
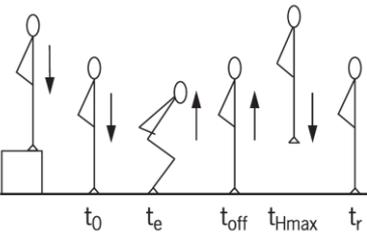
# COUNTER MOVEMENT JUMP



$t_2$  : début du freinage  
 $t_e$  : fin de flexion

Flexion		Extens. ( $R_z > mg$ )	Phase aérienne $R_z = 0$ $a_{Gz} = -g$
( $t_0 - t_2$ ) Accélération vers le bas $a_{Gz} < 0$	( $t_2 - t_e$ ) Freinage $a_{Gz} > 0$		

# DROP JUMP



$t_0$  : arrivée sur la PFF  
 $t_e$  : fin de flexion

Flexion ( $t_0 - t_e$ ) Freinage $a_{Gz} > 0$	Extensio n ( $R_z > mg$ ) Accél. vers le haut $a_{Gz} > 0$	Phase aérienne $R_z = 0$ $a_{Gz} = -g$
--	---	---

## 6.2 Impulsion lors des sauts standardisés

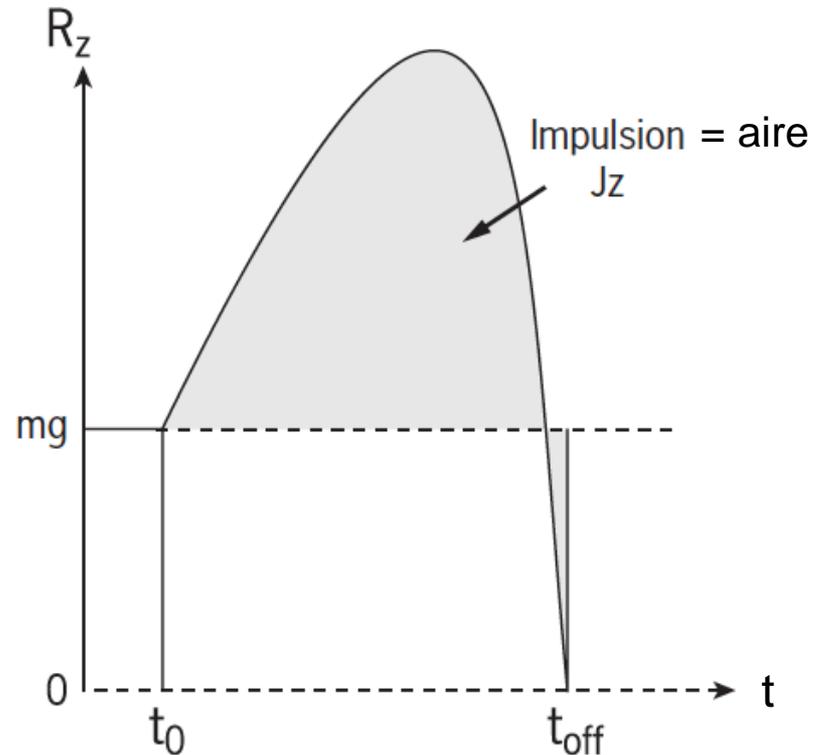
On s'intéresse uniquement à l'impulsion verticale  $J_z$

$$J_z = m.[V_{z_{off}} - V_{z_0}] = \int_{t_0}^{t_{off}} (R_z - mg) dt = \text{aire sous la courbe } (R_z - mg)$$

Squat Jump

$V_{z_0} = 0$  donc :

$$J_z = m.V_{z_{off}}$$

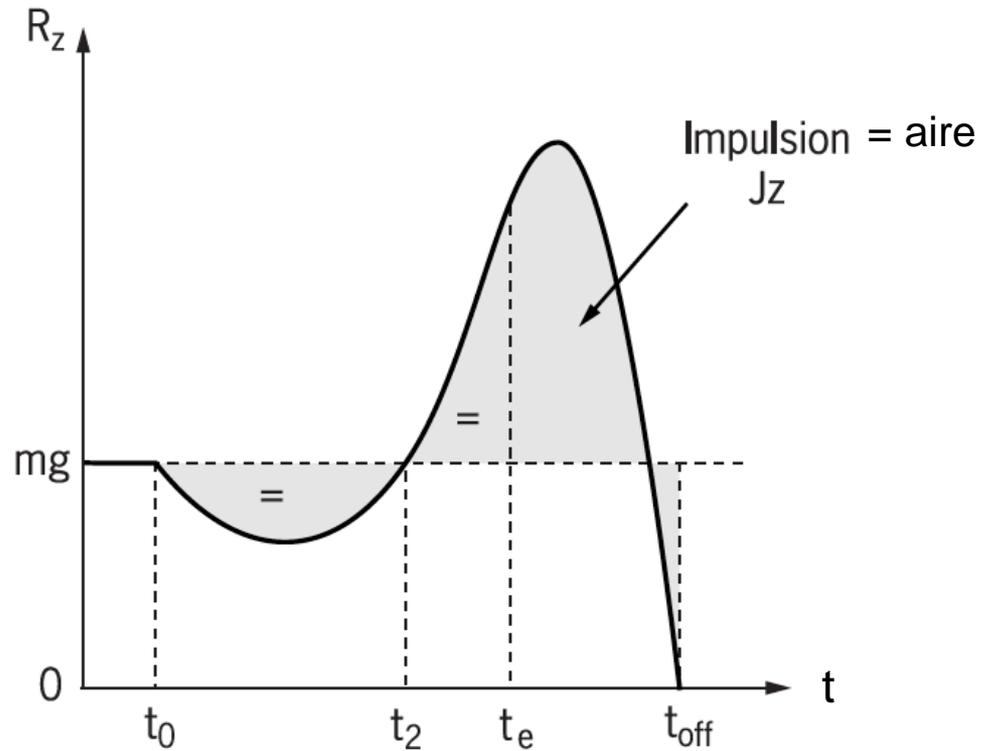


Impulsion verticale lors d'un squat Jump (aire en gris)

# CMJ

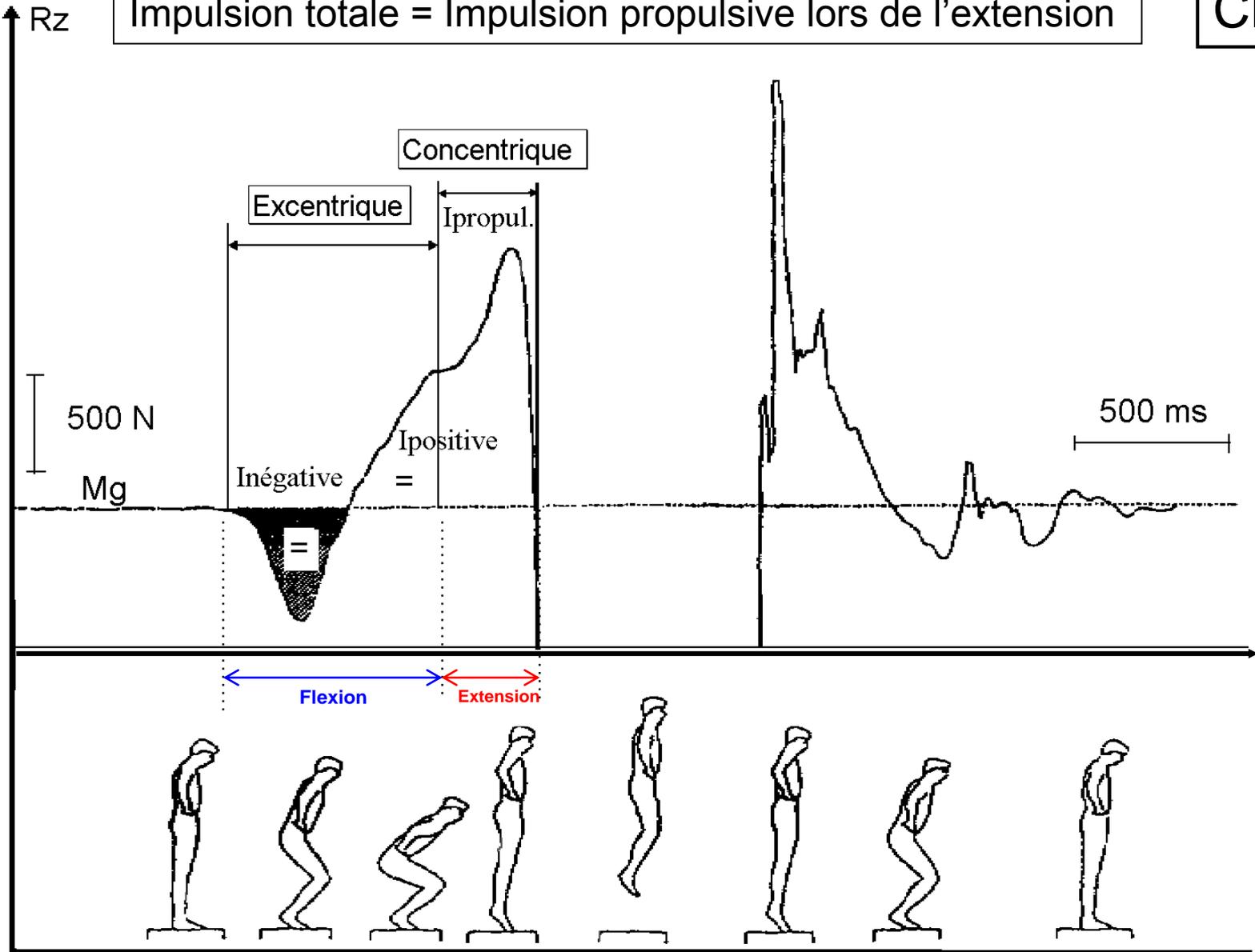
$V_{z0} = 0$  donc :

$$J_z = m \cdot V_{z\text{off}}$$



Impulsion verticale lors d'un CMJ (aire en gris).  
[ $t_0$ ,  $t_e$ ] : flexion, [ $t_e$ ,  $t_{\text{off}}$ ] : extension

Impulsion totale = Impulsion propulsive lors de l'extension

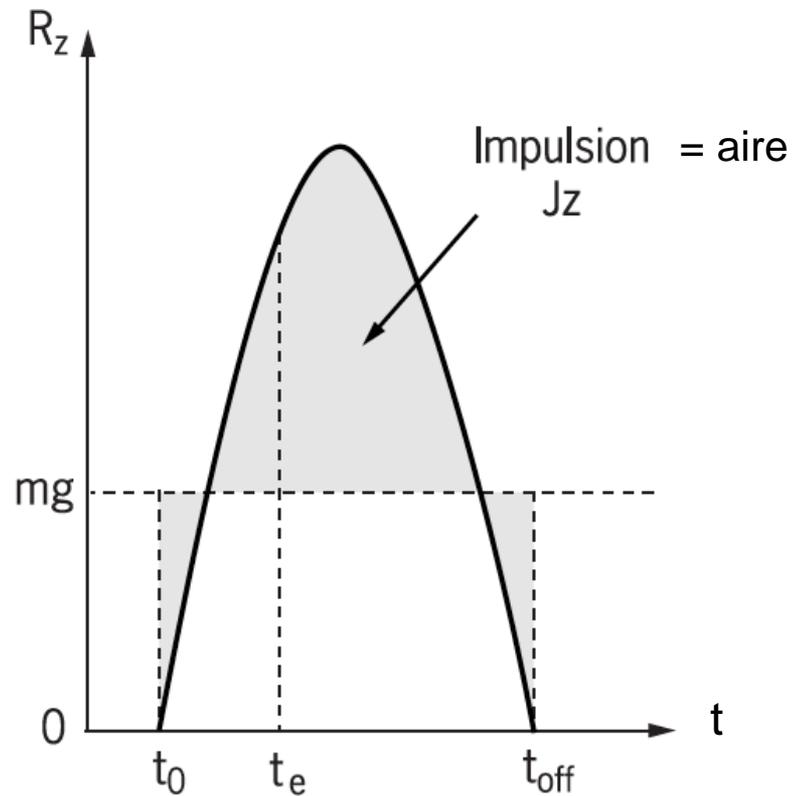


# Drop Jump

$V_{z0} \neq 0$  donc :

$$J_z = m \cdot (V_{z\text{off}} - V_{z0})$$

Attention :  $V_{z0} < 0$



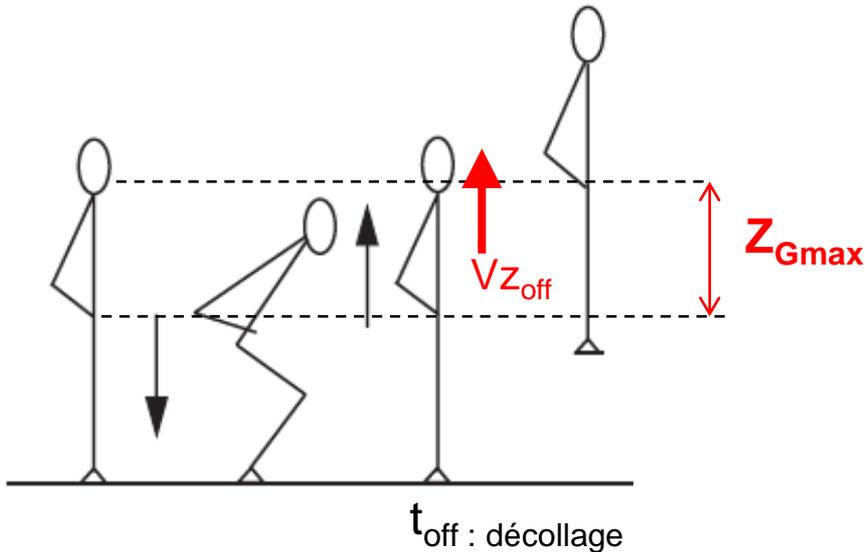
Impulsion verticale lors d'un Drop Jump (aire en gris)

$[t_0, t_e]$  : flexion,  $[t_e, t_{\text{off}}]$  : extension

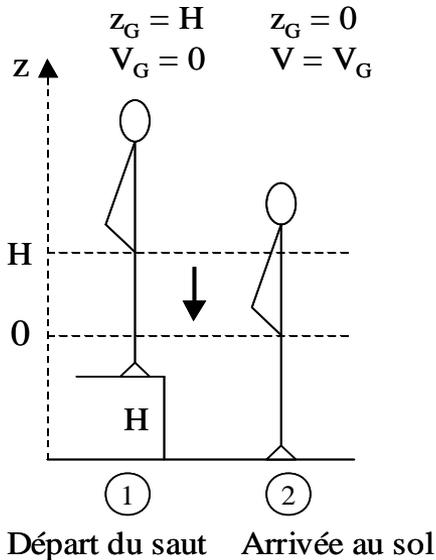
## 7. Calcul de la hauteur d'un saut à partir de la vitesse de décollage

On montre à partir de la RFD que la hauteur d'un saut dépend de la vitesse de décollage :  $V_{Z_{off}}$

$$Z_{max} = \frac{V_{Z_{off}}^2}{2g}$$



# Compléments : Loi de conservation de l'énergie totale



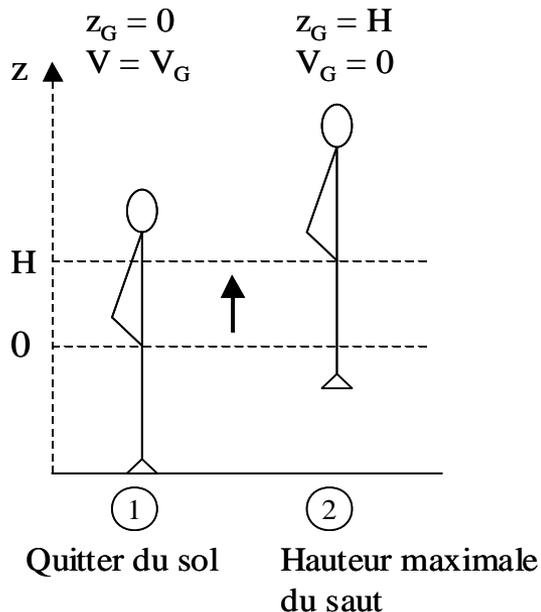
Lors du saut en contre-bas, l'énergie mécanique totale dans les états (1) et (2) doit être égale :

$$E_{\text{méca}}(1) = E_{\text{méca}}(2)$$
$$E_{p_1} + E_{c_1} = E_{p_2} + E_{c_2}$$

$$mg.H + 0 = 0 + \frac{1}{2} .m.V_G^2$$

$$V_G^2 = 2gH$$

$$V_G = \sqrt{2gH}$$



Dans le cas de la détente verticale, la relation est similaire et inverse (les états 1 et 2 sont inversés), la relation entre la hauteur d'un saut et la vitesse de décollage reste :

$$V_G^2 = 2gH$$

donc  $H = \frac{V_G^2}{2g}$

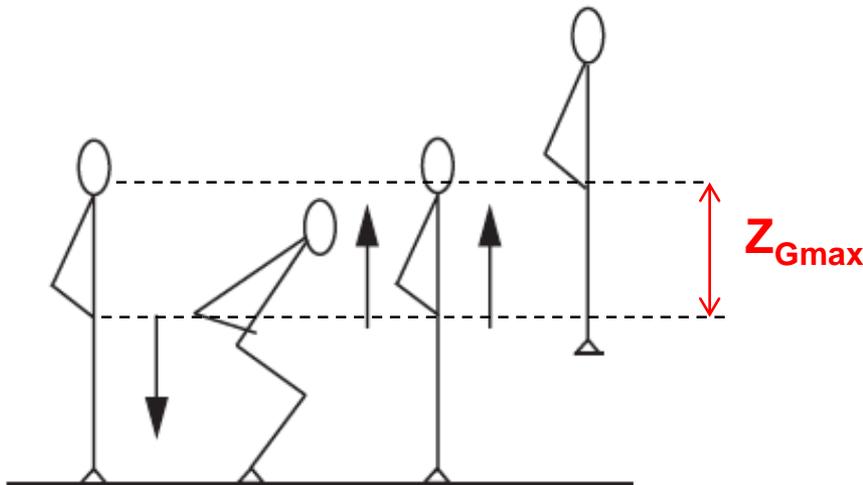
**DONC**, quand le sujet retombe au sol, sa vitesse d'arrivée au sol est égale à sa vitesse de décollage (au signe près).

## 8. Calcul de la hauteur d'un saut à partir du temps de suspension $T_s$

On montre à partir de la RFD que la hauteur d'un saut dépend du temps passé en l'air ( $T_s$ ) :

$$Z_{Gmax} = \frac{g \cdot T_s^2}{8}$$

Cette méthode est utilisée par les systèmes tels que le tapis de Bosco ou l'Optojump qui calculent la hauteur du saut à partir du temps de suspension



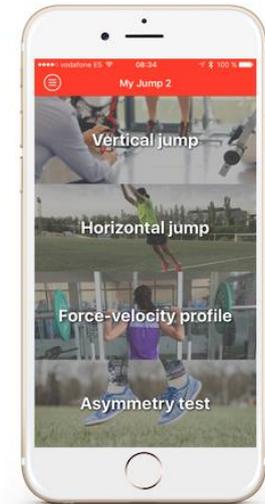
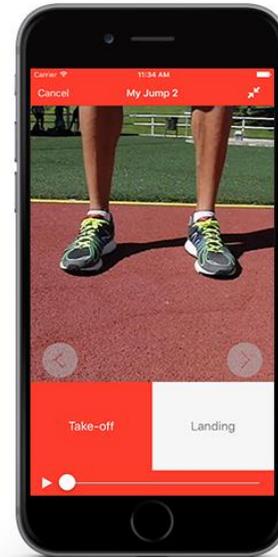
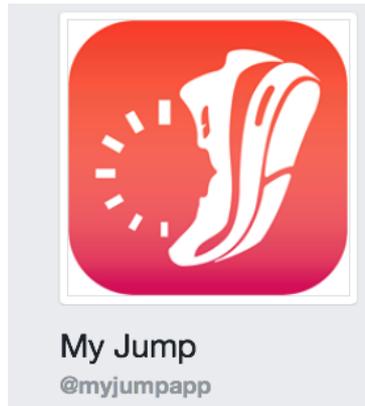
Exemples :

$$T_s = 500 \text{ ms} \Rightarrow Z_{Gmax} = 30,6 \text{ cm}$$

$$T_s = 1 \text{ s} \Rightarrow Z_{Gmax} = 1,23 \text{ m} \quad (\text{impossible !})$$

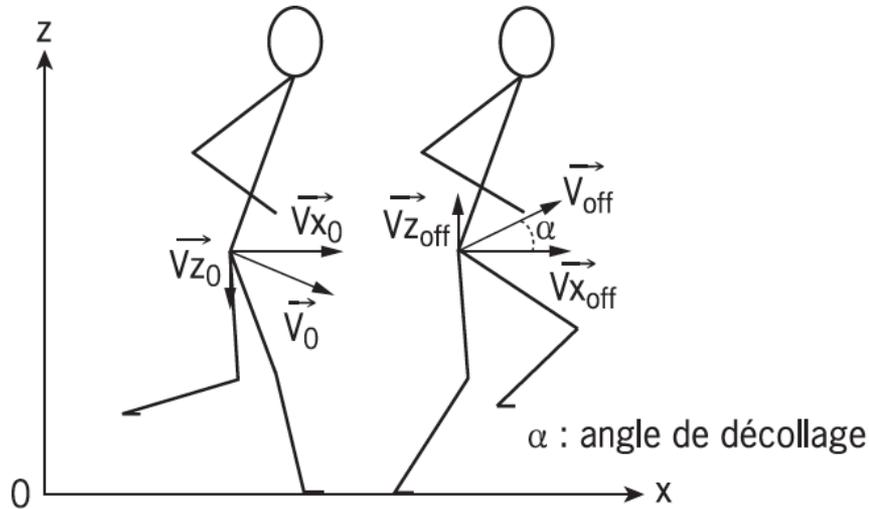
# Développement d'applications pour mesurer la détente verticale. Ex. « My Jump »

## My Jump 2 for iPhone & iPad



# 10. Exemples d'application

## Saut en longueur



Entre  $t_0$  et  $t_{off}$ , le pied d'appui du sujet n'a pas bougé, les deux figures sont décalées pour plus de clarté.

### Les impulsions

$$J_x = m.(V_{x_{off}} - V_{x_0})$$

$$J_z = m.(V_{z_{off}} - V_{z_0})$$

### Les vitesses de décollage

$$V_{x_{off}} = \frac{J_x}{m} + V_{x_0}$$

$$V_{z_{off}} = \frac{J_z}{m} + V_{z_0}$$

### L'angle de décollage

$$\text{tg}\alpha = \frac{V_{z_{off}}}{V_{x_{off}}} \text{ donc } \alpha = \text{Arctg} \frac{V_{z_{off}}}{V_{x_{off}}}$$

# Considérations très importantes pour l'examen

- Examen réputé **difficile** (moyenne de 5/20)
  - **Conseils** :
    - Constituer un fiche avec les formules
    - Bien suivre les TD : <http://olivierwhite.weebly.com/uploads/2/5/4/0/2540941/l2-biomeca-annales.pdf>
    - Connaitre la trigonométrie de base
    - Connaitre les unités de base
    - Philosophie de notation
3. Donner une unité valable pour chacune des six grandeurs suivantes : masse, impulsion, accélération, force, angle et vitesse. (/2)
4. Pour les angles de 0, 30, 45, 60 et 90 degrés, donner (1) les conversions de ces angles en radians et (2) les valeurs des cosinus, sinus et tangente de chacun d'eux. (/2)

Aller sur <http://olivierwhite.weebly.com/>

Onglet 'Teaching'

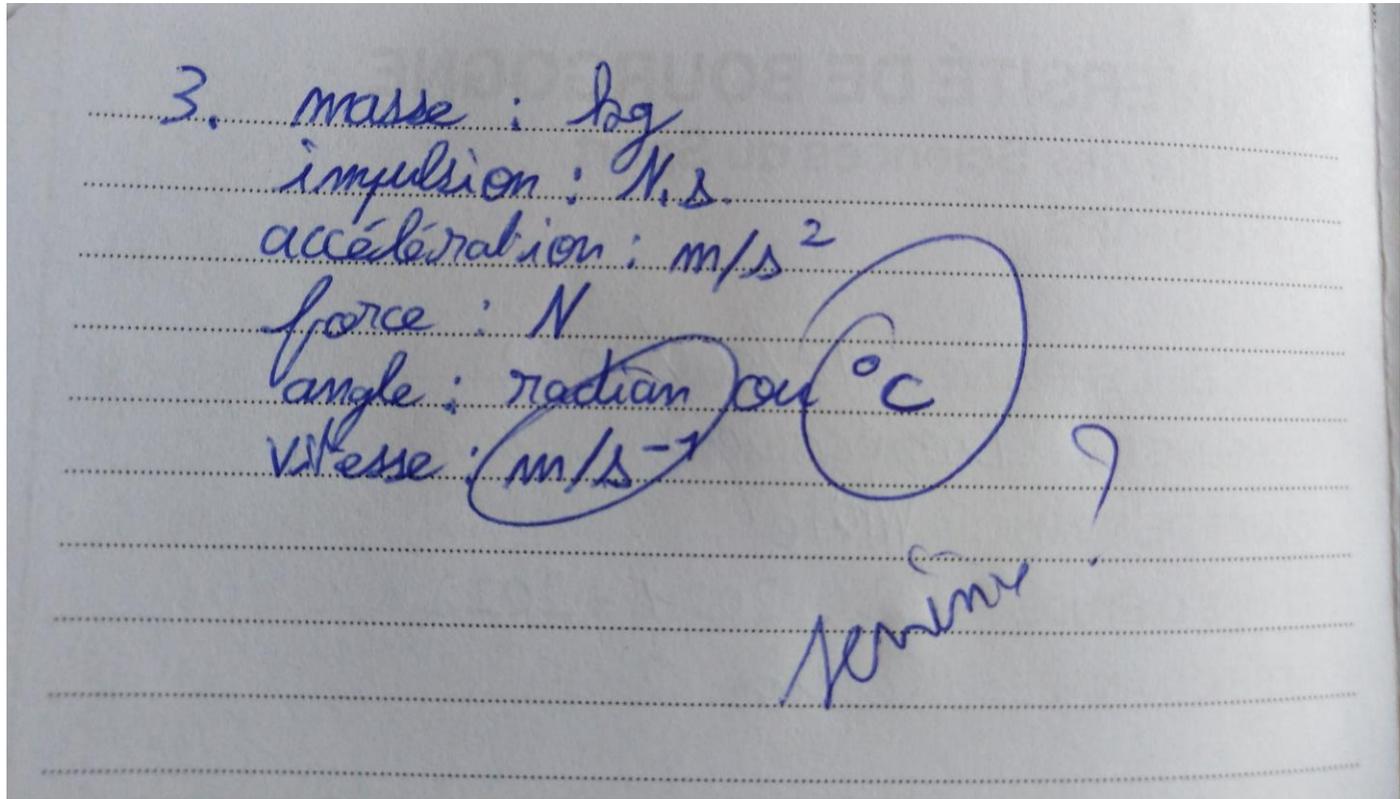
Mot de passe 'ue12ue13'

# Considérations très importantes pour l'examen

- **Conseils :**

- Constituer un fiche avec les formules
- Bien suivre les TD
- Connaitre la trigonométrie de base
- Connaitre les unités de base
- Philosophie de notation

3. Donner une unité valable pour chacune des six grandeurs suivantes : masse, impulsion, accélération, force, angle et vitesse. (/2)



# Considérations très importantes pour l'examen

- Examen réputé **difficile** (moyenne de 5/20)
- **Conseils :**
  - Constituer un fiche avec les formules
  - Bien suivre les TD
  - Connaitre la trigonométrie de base
  - Connaitre les unités de base
  - Philosophie de notation

3 - 
$$Z_{y \text{ max}} = \frac{g \times t_1^2}{8}$$
$$t_1 = \sqrt{\frac{Z_{y \text{ max}} \times 8}{g}}$$
$$t_1 = \frac{1000 \times 8}{g} = \frac{8000}{10} = 800$$

de temps de suspension d'Henri sera de 800 s