



Association des Entraîneurs d'Ile de France d'Athlétisme

# LE PIED AU SERVICE DE L'ACTION ? OU ANALYSE MECANIQUE DU CORPS EN MOUVEMENT

***Patrick LACOUTURE<sup>1,2</sup>, François DURAND<sup>2</sup>***

**(1) Laboratoire de Mécanique des Solides – UMR 6610 CNRS, Université de Poitiers**

**(2) Centre d'Analyse d'Images et Performance Sportive – CAIPS – CREPS Poitou Charentes**

Parce que les pieds sont les seuls éléments du corps de l'athlète en contact avec le sol, on leur attribue des propriétés biomécaniques des plus sensationnelles, décrites le plus souvent à travers un langage métaphorique. Pour s'en rendre compte, il suffit d'entendre les journalistes ou consultants sportifs, lors des rencontres d'athlétisme parler de pied dynamique, d'appui bondissant, etc . Nous retrouvons cette même sémantique dans le milieu de l'entraînement ; elle puise sa source sur le terrain des sensations éprouvées et d'observations globales. Même si les observations peuvent décrire les mécanismes, pour autant, aussi fines soient-elles, elles ne peuvent rendre compte que des conséquences, sans pouvoir remonter aux causes rationnelles, mesurables c'est à dire scientifiquement établies, avec les incertitudes qui accompagnent inévitablement la quantification de n'importe quel paramètre. L'un des principaux enjeux de la recherche sur le geste sportif est bien l'explication mécanique du mouvement et

non pas la seule description des mécanismes mis en jeu et formulés sur le terrain de l'entraînement.

Nous essayerons, en appuyant nos propos sur des éléments théoriques et expérimentaux, de montrer le bien fondé de l'analyse mécanique du geste dont l'un des buts que nous nous fixons au sein du CAIPS, est d'accompagner l'entraîneur dans son expertise de la performance sportive. Il s'agit d'éclairer et de rendre explicite le discours empirique à l'aide des concepts et des lois de la mécanique avec pour finalités :

- De décrire la production motrice,
- D'expliquer pour pouvoir l'enseigner
- De mieux connaître pour mieux transmettre

Certes, le pied est un élément important par le simple fait qu'il intervient dans la transmission des mouvements du corps au niveau du sol ; cette fonction se caractérise par le développement d'efforts de contact au niveau des surfaces d'appui. Ainsi, répondre à la question : quel rôle joue le pied dans la locomotion humaine, qu'elle soit sportive ou non, revient à s'interroger sur des questionnements de base tels que : ***comment je marche ? Comment je cours ? Comment je saute ? Quelles explications mécaniques peuvent être apportées ?*** Nous essayerons de répondre à ces interrogations en nous limitant, au cours de notre intervention, à l'analyse mécanique en translation du mouvement.

♦ *Le corps de l'athlète en action : un système poly articulé en mouvement.*

Considérons un seul instant que le corps de l'athlète soit indéformable, comme peut l'être la boule de pétanque par exemple, ou la barre de musculation. Mettre en mouvement ces corps rigides, c'est à dire les déplacer, revient à rompre une situation d'équilibre, conformément au Principe Fondamental de la Dynamique – P.F.D. – plus connu sous l'appellation de loi de Newton qui s'exprime par : le bilan des actions extérieures appliquées sur le corps rigide doit être non nul, ou encore en utilisant le formalisme emprunté à la mécanique – la science de l'étude des mouvements des corps -, limité à l'analyse en translation du corps :

$$\Sigma \mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{t}) = \mathbf{M} \mathbf{a}_{\mathbf{G}/\mathbf{R}}(\mathbf{t})$$

avec : le symbole  $\Sigma \mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{t})$  représentant la somme des forces extérieures qui agissent sur le corps et qui varient au cours du temps  $t$ .

$M$ , la masse du corps rigide.

$\mathbf{a}_{\mathbf{G}/\mathbf{R}}(\mathbf{t})$ , l'accélération du centre de gravité  $G$  du corps rigide, calculé par rapport à un référentiel  $R$  d'observation. Cette accélération, comme les forces extérieures dépend du temps  $t$ .

On conçoit très bien que le joueur de pétanque, par son action sur la boule, modifie le bilan des forces extérieures et par conséquent, communique au centre de gravité de celle-ci, une accélération  $\mathbf{a}_{\mathbf{G}/\mathbf{R}}(\mathbf{t})$  ; la boule de pétanque est alors en mouvement. De même, l'haltérophile peut soulever la barre en créant au niveau des surfaces d'interaction mains / barre, des forces extérieures capables de rompre la situation d'équilibre initiale.

Cette analyse est illustrée par la figure 1 ci-après. La balle, lorsqu'elle est posée sur la table est en situation d'équilibre, le bilan des forces extérieures qui s'exercent sur elle, est nul. Pour rompre cette situation, c'est à dire pour mettre

en mouvement de translation le centre de gravité de la balle, il faut agir sur la balle ce qui revient à générer une force  $F$  telle le bilan  $F + R + R \neq 0$ , soit  $F + R + R = Ma_G(t)$ .

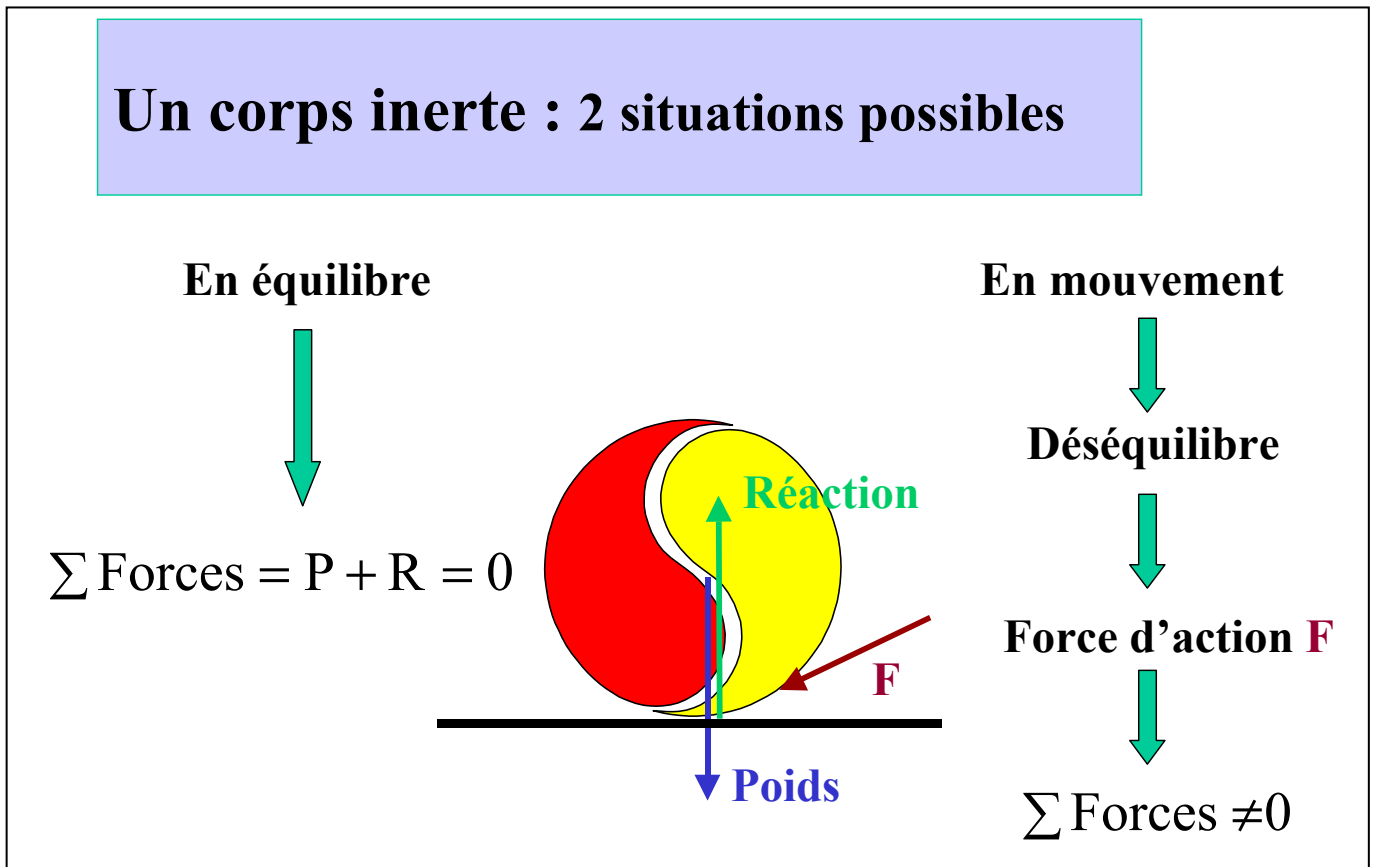


Figure 1 : Situations d'équilibre et de déséquilibre – en translation - d'un corps inerte et solide.

***Qu'en est-il de l'athlète ?*** Lorsqu'il court, à aucun moment une tierce personne ne vient rompre l'équilibre des forces extérieures afin qu'il puisse se mouvoir. Ainsi, par la « simple » déformation de son corps, le marcheur marche, le coureur court, le sauteur saute, etc. Les lois de la mécanique, appliquées au corps de l'athlète permettent d'analyser les conséquences induites par cette déformation produite par l'action des mouvements segmentaires. Pour cela, le corps de l'athlète est modélisé en un système poly articulé d'éléments rigides.

*Comment cette déformation se traduit-elle mécaniquement ? Quelles conséquences produit-elle sous les appuis ?* Ce questionnement revient à faire référence à la notion d'impulsion.

➤ *L'impulsion : un concept fédérateur*

L'impulsion est certainement le concept mécanique sur lequel les milieux de l'entraînement et de la communauté scientifique ont sensiblement la même définition.

A travers les vocables, de prise d'appel, d'appui, de prise d'élan optimal, tout le monde s'accorde pour imaginer des forces créées à l'interface pied/sol. Il faut cependant noter que ces forces ne sont pas constantes ; leur intensité, leur direction et même leur point d'application varient au cours du temps, même si les temps de contact restent extrêmement courts ; de l'ordre de 80ms pour le sprint, par exemple.

Et pourtant, tout ce joue pendant ces courts instants puisque la variation de vitesse du centre de gravité du coureur dépend de la force de réaction  $R(t)$  qui agit sur l'athlète, et plus exactement, de l'impulsion qui découle de ces forces.

Une définition de l'impulsion peut alors être donnée : c'est la variation des forces extérieures au cours du temps. Nous pouvons illustrer ces propos à travers l'exemple du coureur. Mais cette analyse est généralisable à l'ensemble des activités physiques et sportives.

◆ **Cas du coureur**

Pendant le temps de contact, les seules forces extérieures qui agissent sur le corps de l'athlète sont, en négligeant la résistance de l'air, le poids appliqué au centre de gravité, de direction verticale, dirigé vers le bas et de module constant  $Mg$  ( $g$  : accélération de la pesanteur, égale à  $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Nous nous limitons à l'axe antéro-postérieur orienté positivement dans le sens de la course. De façon très schématique, le but est ici d'augmenter la vitesse longitudinale de course, à chaque appui. Ainsi, à chaque pose de pied sur la piste, le centre de gravité du coureur subit une variation de vitesse que l'on explicite par le raisonnement suivant :

Si la vitesse du centre de gravité à l'instant initial du contact est  $V_{y0}$ , et  $V_{yf}$  à l'instant final du contact pied/sol, l'impulsion générée par les forces a pour conséquence de créer une variation de vitesse  $\Delta V_y$  positive égale à :  $\Delta V_y = V_{yf} - V_{y0}$ . Ceci est illustré à la figure 2 ci après.

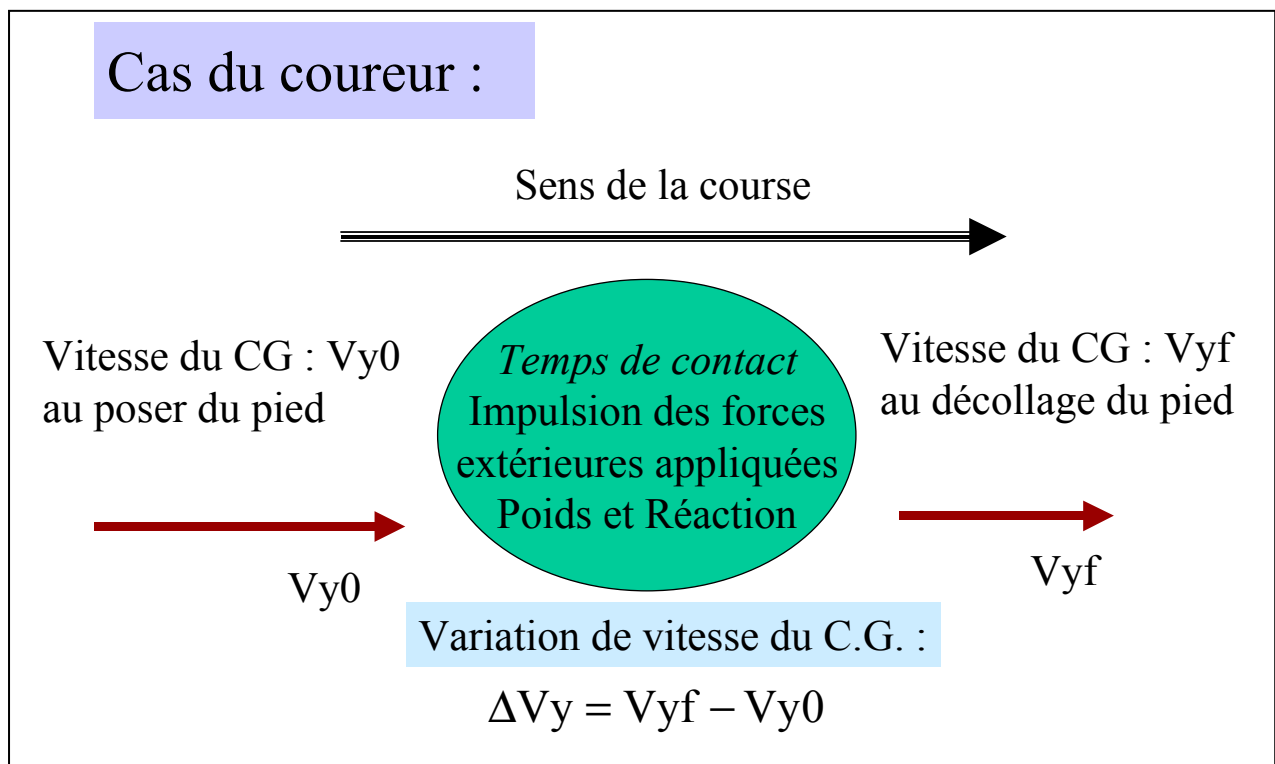
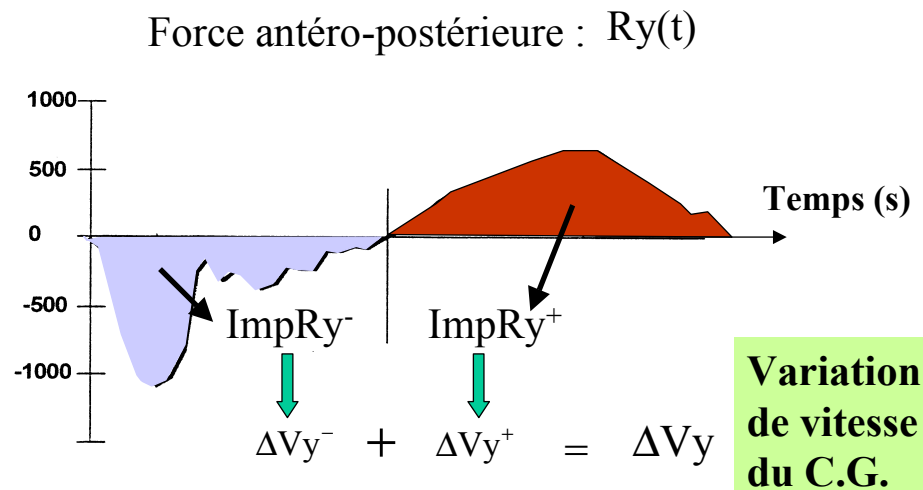


Figure 2 : Variation de vitesse du centre de gravité à chaque appui.

Sur le plan quantitatif, en considérant la variation de la force extérieure antéro-postérieure  $R_y(t)$  due à la réaction du sol sur l'athlète (figure 3), cela se traduit par la recherche d'optimiser l'aire d'impulsion positive notée  $ImpR_{y+}$  au détriment de l'aire d'impulsion négative  $ImpR_{y-}$  de façon à ce qu'au bilan, la

variation de vitesse longitudinale résultante égale à  $\Delta V_y = \Delta V_y^+ + \Delta V_y^-$  soit la plus positive possible.

En terme d'impulsion, sur le plan quantitatif



Il faut donc chercher à optimiser les aires d'impulsion

Figure 3 : Analyse des impulsions longitudinales engendrées par la force longitudinales de réaction du sol sur l'athlète générée sous les appuis.

En résumé :

*Ce n'est pas la valeur maximale de la force, ni même La durée du contact qui sont des paramètres importants, mais le produit « force \* temps » qui définit les aires d'impulsion, conformément au PFD.*

*Mais, comment ces forces d'interaction sont-elles créées ?* Pour répondre à cette question, nous devons considérer le corps de l'athlète comme un système déformable.

◆ *Le corps de l'athlète : un système poly articulé.*

Tout d'abord, l'athlète par sa propre volonté, ne peut se mouvoir, que parce qu'il est un système déformable que l'on a l'habitude de modéliser en un ensemble de solides représentant les segments du corps, liés entre eux par l'intermédiaire d'articulations, coudes, genoux, chevilles, etc. .

La représentation la plus souvent utilisée lorsqu'il s'agit d'étudier mécaniquement le mouvement de l'athlète est décrite à la figure 4 qui définit le corps à l'aide de 14 segments : tête - cou, tronc, 2 avant-bras, 2 bras, 2 mains, 2 cuisses, 2 jambes, 2 pieds, de masse  $m_i$ , de centre de gravité  $G_i$ . Par hypothèse, les segments du corps sont considérés rigides compte tenu des difficultés actuelles, théoriques et expérimentales, de prendre en compte les déformations musculaires.

Au cours d'un geste, les mouvements des différents segments sont captés à l'aide de plusieurs caméras synchronisées ; des procédures de calcul spécifiques déterminent dans l'espace, à partir des positions des axes articulaires et de tables anthropométriques, les positions, les vitesses et les accélérations des centres de gravité segmentaires  $G_i$  et global  $G$  de l'athlète (Cf. équations barycentriques de la figure 4). On peut définir ainsi, les mouvements en 3D de chaque segment qui reflètent l'activité musculaire que nous analysons à l'aide des lois de la mécanique.

*Comment cette déformation se traduit-elle mécaniquement ? Quelles conséquences produit-elle sous les appuis de l'athlète ?*

La troisième relation de la figure 4 ci-après propose une réponse à cette question, qui peut être généralisée pour répondre plus largement à la

problématique de base présentée en introduction sur : *comment je marche ? comment je cours ? comment je saute ? Quelles explications mécaniques peuvent être apportées ?*

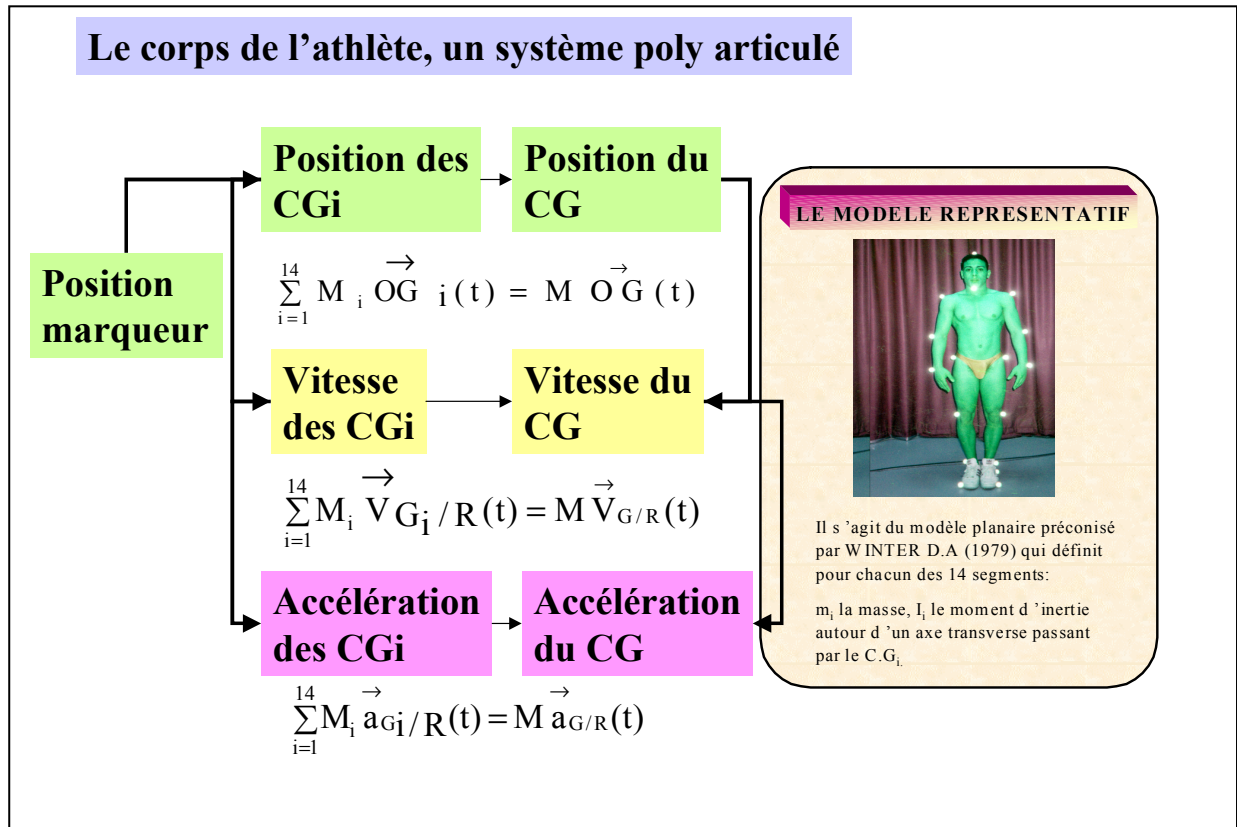


Figure 4 : Modélisation du corps de l'athlète et équations barycentriques

Considérons pour illustrer nos propos, le geste de course. Il est possible d'enregistrer à chaque instant, les forces de contact pied/sol, à l'aide d'une plateforme de forces ; conformément au PFD, le bilan des forces extérieures s'écrit :

$$\Sigma \mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{t}) = \mathbf{Poids} + \mathbf{Réaction} = \mathbf{P} + \mathbf{R}(\mathbf{t}) = \mathbf{M} \mathbf{a}_{G/R}(\mathbf{t})$$

ou encore :  $\mathbf{P} - \mathbf{F}(\mathbf{t}) = \mathbf{m} \mathbf{a}_{G/R}(\mathbf{t})$  avec  $\mathbf{F}(\mathbf{t})$  est la force d'action de l'athlète sur le sol.

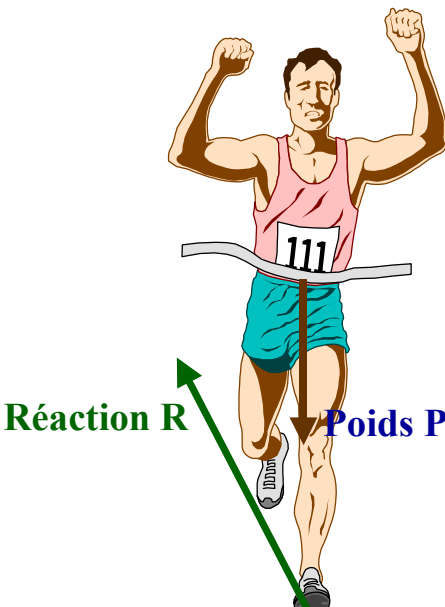
Sachant que l'accélération du centre de gravité global G est déterminée à partir des accélérations des centres de gravité segmentaires, donnée par la relation barycentrique 3 de la figure 4, nous pouvons écrire (figure 5) :

$$\mathbf{P} - \mathbf{F}(t) = m\mathbf{a}_{G/R}(t)$$

$$\text{soit : } \mathbf{F}(t) = \mathbf{P} - \sum_{i=1}^{14} m\mathbf{a}_{G_i/R}(t) \text{ ou encore } \mathbf{R}(t) = \sum_{i=1}^{14} m\mathbf{a}_{G_i/R}(t) - \mathbf{P}$$

### Prise en compte des mouvements segmentaires

A un instant t donné :



P.F.D. :

$$\sum \text{forces} = M \mathbf{a}_{G/R}(t)$$

$$\mathbf{P} + \mathbf{R}(t) = \sum_{i=1}^{14} M_i \mathbf{a}_{G_i/R}(t)$$

$$\mathbf{R}(t) = \sum_{i=1}^{14} M_i \mathbf{a}_{G_i/R}(t) - \mathbf{P}$$

Figure 5 : Prise en compte des mouvements segmentaires dans la création des forces d'appui.

Ainsi, les variations de la force de réaction sous les appuis dépendent des quantités d'accélération segmentaires notées  $M_i \mathbf{a}_{G_i/R}(t)$  ; Créer de « bons appuis », c'est à dire générer des forces de réaction « adaptées » comme le soulignent les entraîneurs, c'est avant tout animer les segments du corps de masse  $M_i$  avec des accélérations  $\mathbf{a}_{G_i/R}(t)$  telles que les impulsions verticale,

longitudinale et transverse soient optimales pour le geste à réaliser ; cette analyse permet d'objectiver la coordination motrice de l'athlète. Par conséquent, pour privilégier au cours de l'impulsion :

- La variation de la vitesse verticale du centre de gravité  $\Delta V_Z$ , il faudra privilégier les quantité d'accélération verticales  $M_i a_{zGi/R}(t)$ , telles que :  $R_Z(t) = \sum_i a_{zGi/R}(t) - P$  pour obtenir, grâce à l'expression de

l'impulsion définie précédemment, la variation  $\Delta V_Z = \frac{1}{M_{ti}} \int_0^t (R_Z(t) + P) dt$

attendue, ou encore  $\Delta V_Z = \frac{1}{M_{ti}} \int_0^t M_i a_{zGi/R}(t) dt$

- La variation de la vitesse longitudinale du centre de gravité  $\Delta V_Y$ , il faudra privilégier les quantité d'accélération verticales  $M_i a_{yGi/R}(t)$ , telles que :  $R_Y(t) = \sum_i a_{yGi/R}(t)$  pour obtenir, grâce à l'expression de l'impulsion

définie précédemment la variation  $\Delta V_Y = \frac{1}{M_{ti}} \int_0^t R_Y(t) dt$  attendue, ou encore

$$\Delta V_Y = \frac{1}{M_{ti}} \int_0^t M_i a_{yGi/R}(t) dt .$$

- La variation de la vitesse transverse du centre de gravité  $\Delta V_X$ , il faudra privilégier les quantité d'accélération verticales  $M_i a_{xGi/R}(t)$ , telles que :  $R_X(t) = \sum_i a_{xGi/R}(t)$  pour obtenir, grâce à l'expression de l'impulsion

définie précédemment la variation  $\Delta V_X = \frac{1}{M_{ti}} \int_0^t R_X(t) dt$  attendue, ou encore

$$\Delta V_X = \frac{1}{M_{ti}} \int_0^t M_i a_{xGi/R}(t) dt .$$

## ◆ Vers la mise en place d'une station d'évaluation à la disposition des entraîneurs

A Poitiers, sur la base d'une activité de recherche développée depuis une vingtaine au laboratoire de Mécanique des Solides (UMR 6610 CNRS) de l'Université de Poitiers, a été établie une convention entre le CREPS Poitou-Charentes et l'Université pour créer une structure capable de répondre aux besoins des entraîneurs, lorsqu'il s'agit de comprendre la réalité gestuelle de leurs athlètes. Cette structure, appelée CAIPS, pour Centre d'Analyse d'Image et Performance Sportive regroupe l'ensemble des compétences, allant de la Mécanique des Solides, la robotique, de l'aérodynamique. Le prolongement dans le secteur médical est entrain de se formaliser actuellement. Nous souhaitons vous présenter très succinctement quelques résultats.

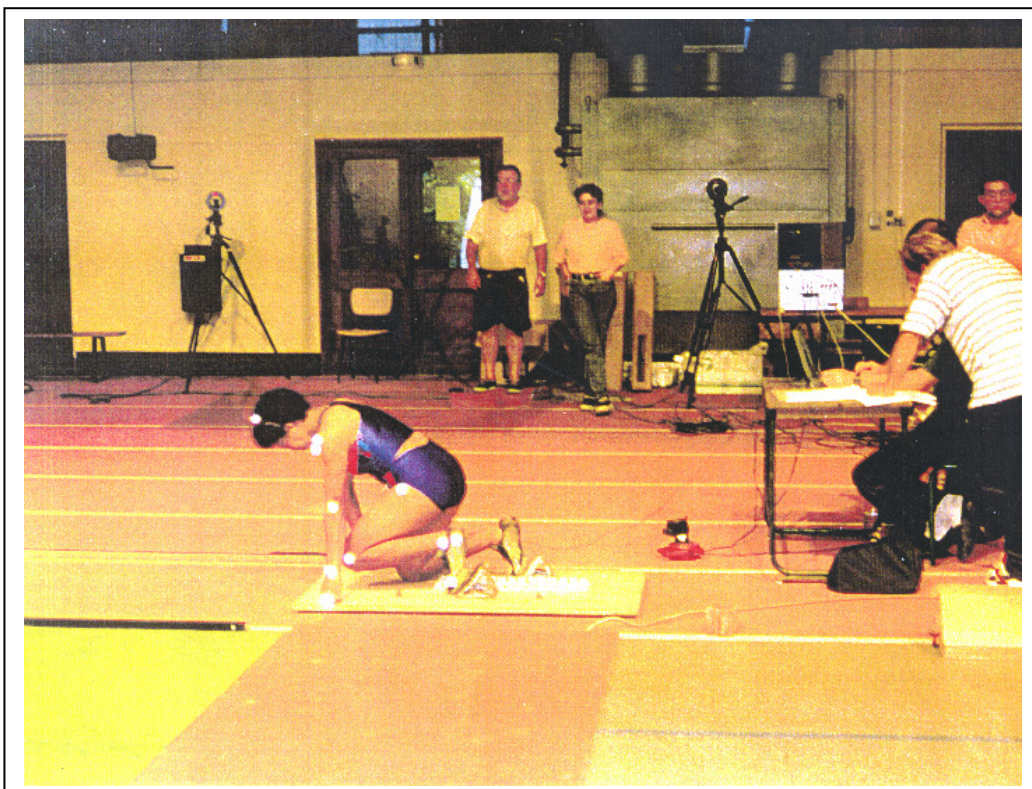
Tout d'abord, les figures ci-après illustrent une séance expérimentale pour l'étude du départ de sprint et le passage aux 30m, conformément au cahier des charges fixé par l'entraîneur.





Figures 5-6 : Plate forme expérimentale 3D au sein de la structure CAIPS

Les dispositifs cinématographiques et les analyses effectuées ont pour objectifs de répondre aux questionnements des entraîneurs en leur apportant des images synchronisées favorisant une lecture du geste de plusieurs endroits simultanément, des paramètres quantifiés dont le but est d'apporter une explication mécanique des mécanismes mis en jeu. Les figures 7, 8 et 9 suivantes, illustrent par exemple des résultats obtenus suite au départ de sprint et les premiers mètres qui suivent ce départ.



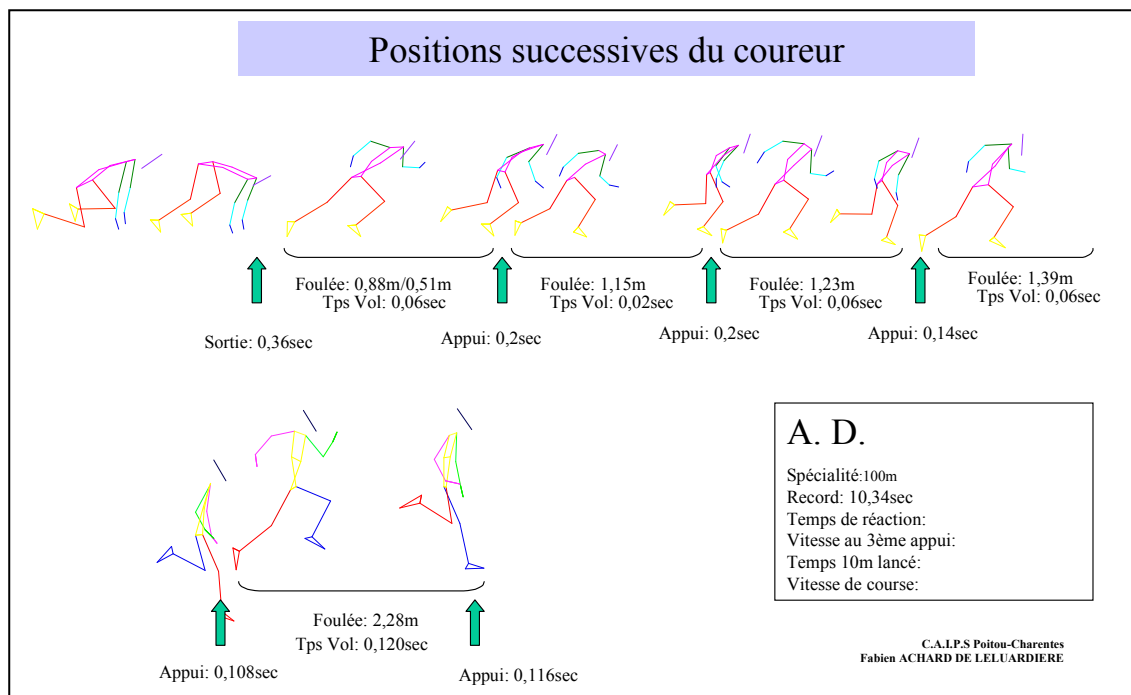


Figure 8 : Analyse du départ de sprint et des premiers mètres

La figure 9 illustre les contributions segmentaires à la quantité d'accélération globale du corps représentée par les variations de la courbe  $Ma_{yCG}$ . Ainsi, lors d'un départ de sprint le rôle des segments est mis en évidence, pour créer l'impulsion longitudinale sous les appuis podaux (Figure 9) ;

**La consigne pourrait être :**

**Ne pas pousser dans les starting blocs mais jaillir  
 c'est à dire **communiquer les plus grandes quantités  
 d'accélération aux segments libres pour générer la meilleure  
 impulsion définie par l'aire sous la courbe ; Il s'agit par exemple  
 de propulser la jambe arrière vers l'avant pour partir vite .****

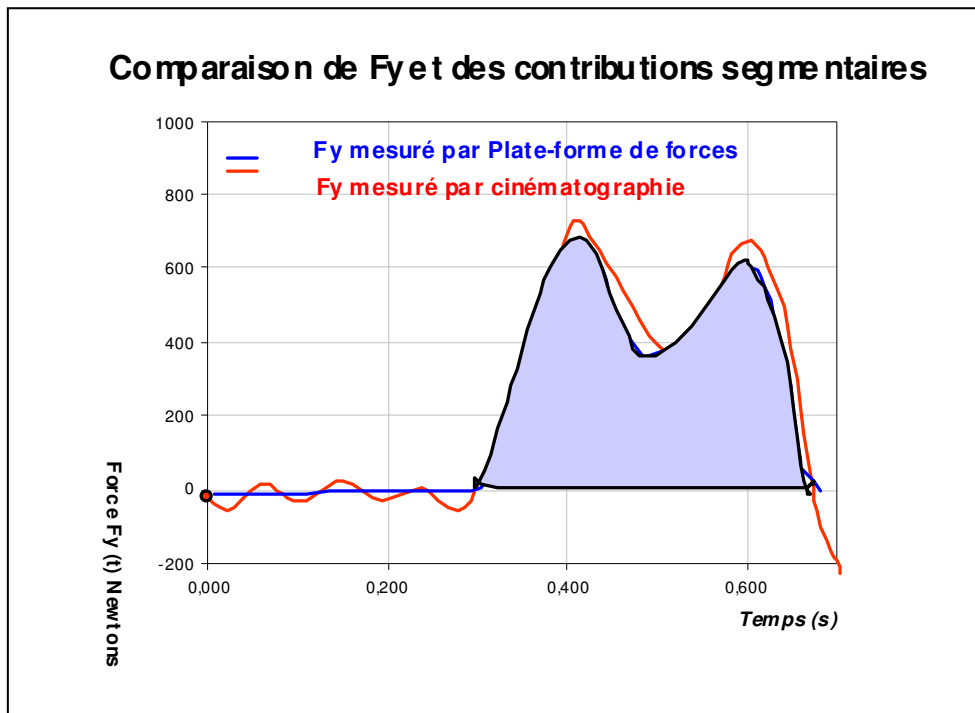


Figure 9 : Impulsion longitudinale créée par les quantité d'accélération segmentaires ; comparaison avec l'impulsion mesurée directement à l'aide d'une plate forme de forces.

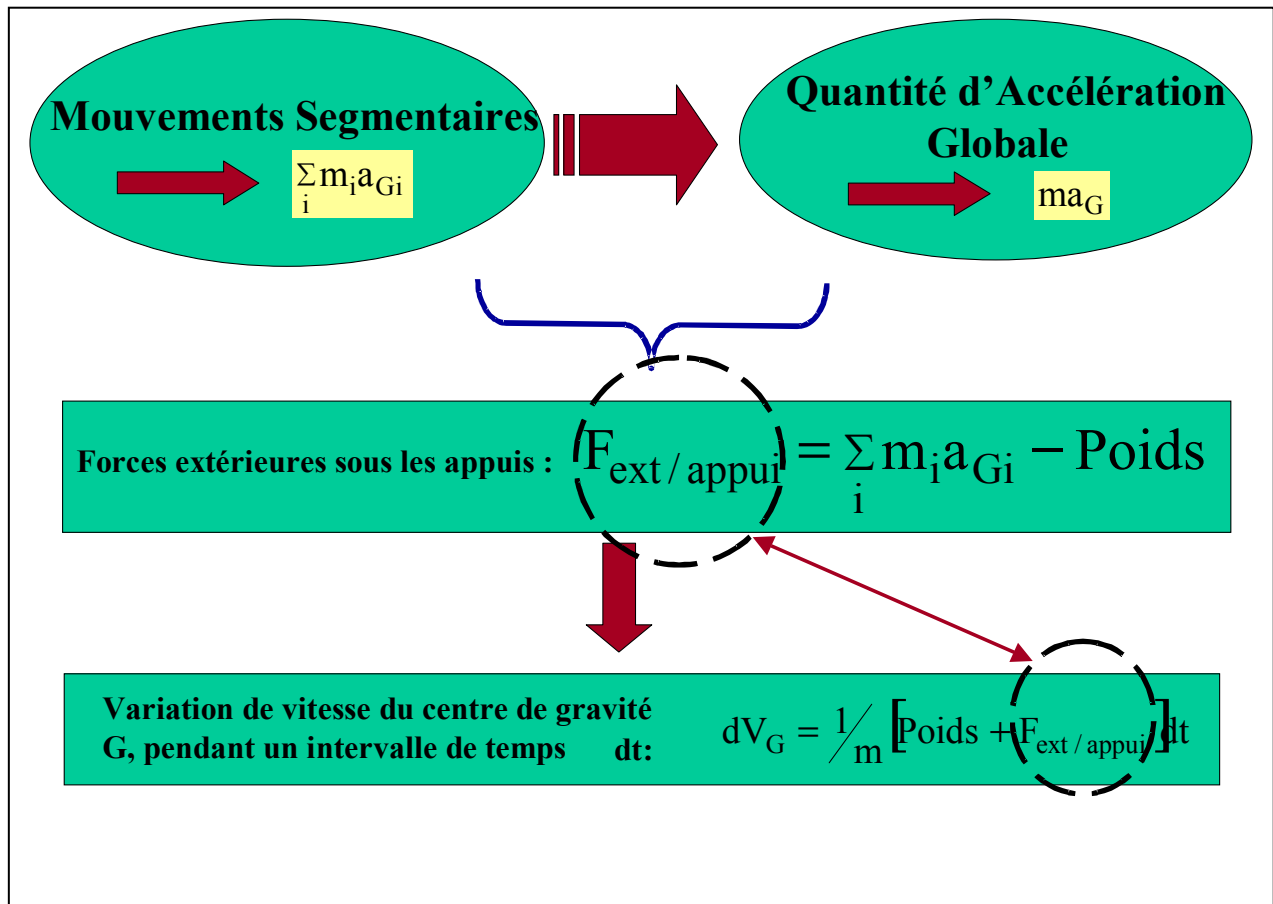
#### ◆ *Conclusion*

***Le pied, est-il au service de l'action ?*** Oui, est ceci pour deux raisons.

Tout d'abord, le pied participe comme chaque segment du corps à la création de la quantité d'accélération globale du centre du gravité. Cette contribution est certes très relative dans le mesure où les mouvements du pied lorsque ce dernier est en contact avec le sol, restent limités ce qui entraîne pour ce segment des accélérations faibles. Peut-être faudrait-il conduire une analyse plus fine (caméras plus rapides, modélisation plus précise) pour mieux appréhender cette contribution.

Puis, le pied contribue bien évidemment comme élément transmetteur vers le sol, des mouvements segmentaires tels que nous les avons décrits. Ces derniers se concrétisent, d'une certaine manière par des forces générées sous les appuis ; forces qui doivent être analysées en terme d'impulsion. Ainsi, le

diagramme ci-après schématise de manière chronologique la création du mouvement d'un point de vue mécanique.



*En conséquence*, nous avons souhaité mettre en place, à l'Université de Poitiers, une structure d'interface permettant de répondre aux interrogations posées par les entraîneurs sur la performance réalisée par leurs athlètes. Cette action, soutenue par la région Poitou-Charentes, ne pouvait être limitée qu'à la seule initiative d'un laboratoire de recherche ; il s'agissait alors de fédérer le milieu sportif, ce qui nous a conduit à créer en collaboration avec le CREPS Poitou-Charentes, c'est à dire en intégrant les acteurs opérationnels de la performance sur le lieu même des pratiques sportives, une station expérimentale 3D d'évaluation de la performance dénommée « Centre d'Analyse d'Images et Performance Sportive : CAIPS », dont le but est de :

- répondre aux attentes des entraîneurs sur l'expertise mécanique du geste réalisé par leur champion. Il s'agit de mettre en commun les compétences propres aux deux milieux, celui de l'entraînement et celui de la recherche. Pour cela, la structure CAIPS met à disposition un certain nombre d'outils de mesure tels que des systèmes d'analyse d'images permettant la capture à des fréquences allant de 50 Hz jusqu'à 500 Hz, des plateaux biomécaniques afin de mesurer des forces d'appui, et multiples autres capteurs pour évaluer des accélérations, des forces, des déplacements, etc.
- proposer, sur la base de courts séjours effectués au sein du CAIPS, des rencontres sous la forme de stages de formation, au cours desquels les approches de terrain et de laboratoire sont débattues. Les nombreux aller-retours, terrain-salle d'expertise, enrichissent les échanges et permet de conceptualiser les mécanismes mis en jeu dans le geste.

Ces études font l'objet chacune de contrat formalisant précisément les attentes des entraîneurs ; elles sont menées en étroite collaboration entre les entraîneurs et les chercheurs, et à l'issue des différentes étapes, des rapports et compte rendus techniques sont discutés et rédigés constituant ainsi la base validé des contenus de formation..

-----

Pour adhérer à notre association ou avoir des renseignements, une seule adresse :  
AEIFA, 16 rue Vincent Compoint 75018 PARIS  
Courriel : [aeifa@aeifa.com](mailto:aeifa@aeifa.com)