



UNIVERSITE PARIS XII - INSEP

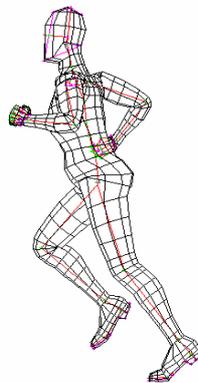


## Mémoire de recherche

MASTER 1 : Sciences de la société

Mention : Sports : usages sociaux et pédagogiques

**EFFETS DE L'ENTRAINEMENT SUR LES PARAMETRES  
MECANIQUES DE LA FOULEE CHEZ DES COUREUSES  
DE 400 METRES EXPERTES**



*Laboratoire de Biomécanique et de Physiologie – Département des Sciences du Sport*

Auteur : **Damien RIVIERE**

Directeur de recherche : **Jean SLAWINSKI : I.N.S.E.P**

Collaborateur fédéral : **Bruno GAGER : Fédération Française d'Athlétisme**

## RESUMÉ

---

L'objectif de ce travail était de mesurer les effets d'un entraînement en sprint sur les paramètres mécaniques de la foulée à la vitesse spécifique d'un 400-m de compétition. Un suivi longitudinal a été mené sur cinq coureuses de du pôle INSEP (âge : 23,8 ans  $\pm$  3,6), spécialistes du 400-m (54,27 sec  $\pm$  1,64). Ces athlètes ont réalisé trois fois à quatre semaines d'intervalle une séance spécifique de 9 x 60 mètres à l'allure cible d'un 400-m de compétition. Durant chaque course, les paramètres mécaniques de la foulée ont été mesurés à l'aide d'un optojump. L'évolution de ces paramètres montre une modification du comportement mécanique des athlètes. La réorganisation structurelle de la foulée aux allures de compétition se traduit notamment par une augmentation de la distance parcourue sur l'appui ( $p < 0,05$ ) et une baisse du temps de vol ( $p < 0,0005$ ). Ces évolutions, associées à une stabilité de l'amplitude de pas, engendrent une diminution des oscillations verticales du centre de gravité du coureur. De plus, le recours à une fréquence de pas plus élevée explique l'augmentation de la vitesse à ces allures. Toutefois, cette augmentation de la vitesse ne permet pas d'expliquer la variation des paramètres mécaniques. Il semblerait donc que l'entraînement en sprint influence la structure mécanique de la foulée vers une plus grande économie en course qui se traduit principalement par une augmentation de la distance parcourue sur l'appui et une diminution des oscillations verticales du centre de masse.

Mots clés : sprint, biomécanique, entraînement, foulée

## REMERCIEMENTS

---

*Je souhaite remercier pour leur collaboration et leur soutien toutes les personnes qui ont œuvré à la réalisation de cette étude.*

*En premier lieu, mes remerciements s'adressent à Jean Slawinski pour ses heures passées à me faire avancer dans mon travail.*

*A Bruno Gajer, pour la confiance qu'il me témoigne, et à Christine Hanon.*

*A tous les membres du laboratoire de Biomécanique et de Physiologie de l'Insep pour leur accueil, et en particulier à Jacques Quievre.*

*Et, bien évidemment, à toutes les athlètes, qui ont accepté de se prêter aux exigences de cette étude.*

# SOMMAIRE

---

## **INTRODUCTION** **5**

*Première partie :*

### **REVUE DE LITTERATURE**

LA NOTION D'ECONOMIE DE COURSE	8
EFFETS DE LA VITESSE SUR LES PARAMETRES MECANQUES DE LA FOULEE	12
EFFETS DE LA FATIGUE ET DE L'ENTRAINEMENT EN SPRINT	17
OBJECTIFS	21

*Deuxième partie :*

### **MATERIEL ET METHODE**

SUJETS	23
PROTOCOLE	23
MATERIEL	24
TRAITEMENT DES RESULTATS	26
STATISTIQUES	27

*Troisième partie :*

### **RESULTATS**

EFFETS DE L'ENTRAINEMENT	30
CORRELATIONS	32

*Quatrième partie :*

## **DISCUSSION** **35**

## **ANNEXES** **39**

## INTRODUCTION

---

La course de 400-m, plus que toute autre, a servi de support à de nombreuses études depuis un quart de siècle. La fatigue engendrée par l'effort que représente le « tour de piste », particulièrement observable et spectaculaire, a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs. Cette fatigue se caractérise par une perte de vitesse très importante en fin de course (- 20%) associée à une diminution prononcée de l'amplitude (- 13%) et de la fréquence (- 14%) des foulées (Gajer et coll., 2002). Cette dégradation progressive et inévitable des paramètres mécaniques de la foulée représente un facteur limitant de la performance en sprint long.

A l'INSEP (Institut National des Sports et de l'Education Physique), de nombreux entraîneurs de 400-m ont préparé des générations de champions. Ainsi, Fernand Urtebise, François Pépin, Frédéric Aubert, Olivier Vallaeys ou encore Bruno Gajer, observent et analysent les différents facteurs associés à la performance sur 400-m. Parmi ces éléments associés à la performance, on retrouve des facteurs énergétiques, mais également techniques et psychologiques. Ces facteurs ont fait l'objet de nombreuses études sur le terrain et en laboratoire. En compétition, Gajer (2002) observe qu'indépendamment du niveau d'expertise, les effets de la fatigue sur l'amplitude et la fréquence de pas sont similaires. Il montre par ailleurs que les experts sont caractérisés par une plus grande amplitude de pas. En ce qui concerne les paramètres énergétiques, l'évolution de la lactatémie, de la concentration d'ATP (adénosine tri-phosphate) et de la créatine phosphate, ont été fréquemment étudiés. Hirvonen et coll. (1992) montrent que sur une épreuve de 400-m, la vitesse décroît après 200-m de course alors que les réserves de phospho-créatine ne sont pas totalement épuisées et que les concentrations musculaires et sanguines en lactates n'ont pas atteint leur valeur maximale.

Les connaissances des entraîneurs de sprint long relatives à l'évolution des paramètres mécaniques de la foulée avec l'entraînement sont généralement issues de leur expérience, de l'observation mais aussi de leur intuition. Ce savoir semble être d'une grande pertinence au regard de l'évolution des performances réalisées sur 400-m. Bien que plusieurs études se soient déjà intéressées aux épreuves de sprint long (Gajer 2002 ; Heugas et coll. 1997 ;

Nummela et coll. 1991, 2000 ; Hirvonen et coll. 1992, Chapman 1982 ; Sprague et Mann 1983....), elles sont le plus souvent centrées sur l'analyse descriptive du comportement mécanique avec l'apparition de la fatigue. A notre connaissance aucune étude ne s'est intéressée à l'évolution de ces paramètres avec l'entraînement. Pourtant, de nombreux entraîneurs spécialistes témoignent néanmoins empiriquement sur cette notion. Bruno Gajer explique que l'entraînement vise à renforcer structurellement les athlètes pour leur permettre de conserver tout au long de l'effort une gestuelle économique, limitant en particulier les mouvements verticaux du centre de gravité.

Très peu de suivis longitudinaux de l'entraînement d'un groupe de coureur(euse)s de 400-m sont rapportés dans la littérature. Heugas et coll. (1997) ont observé les effets d'une période d'entraînement de trois mois sur le déficit maximal d'oxygène (MAOD) et les indices de la capacité anaérobie chez des coureurs de 400-m de haut niveau. Ils relatent une corrélation entre la baisse de MAOD et l'augmentation du pic de consommation d'oxygène dans cette population. Par ailleurs, Nummela et Rusko (2000) ont suivi l'entraînement en stage d'un groupe de sprinters et montrent une amélioration de la performance sur 400-m après dix jours de 'living high and training low' (vie et sommeil en altitude avec entraînement au niveau de la mer), sans doute due aux changements dans la balance acide-basique et dans le métabolisme des lactates. Mais aucune étude ne fait référence à un suivi longitudinal mettant en relation l'entraînement et la mécanique de course chez des coureuses de 400-m de haut niveau.

L'objectif de cette étude est donc de caractériser les effets de l'entraînement sur les paramètres mécaniques de la foulée chez des coureuses de sprint long. L'analyse et la mesure mécanique des effets de l'entraînement représentent une nouveauté et répond à une demande du terrain. Cette étude se veut donc être une réelle collaboration entre le laboratoire et le terrain, et se place dans le cadre de l'aide à la performance.

Première partie :

## **REVUE DE LITTERATURE**

## I- LA NOTION D'ECONOMIE DE COURSE

### A) Définition

L'économie de course (EC) est définie comme étant la consommation d'oxygène, ou débit d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ ) mesurée à une vitesse de déplacement donnée, et s'exprime en millilitres d'oxygène par unité de poids de corps et par minute ( $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Le coureur le plus économique est celui qui, à une vitesse donnée, nécessite la plus faible consommation d'oxygène. L'EC permet également la comparaison dans le temps des  $\dot{V}O_2$  d'un même coureur à une vitesse inférieure au seuil lactique, et de mesurer si son efficacité en course s'est améliorée. La figure 1 montre les effets de l'entraînement sur EC : l'individu nécessite moins d'oxygène pour se déplacer à 15 Km/h après une période d'entraînement qu'avant cette période. Cette amélioration est susceptible d'entraîner une augmentation de la vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène.

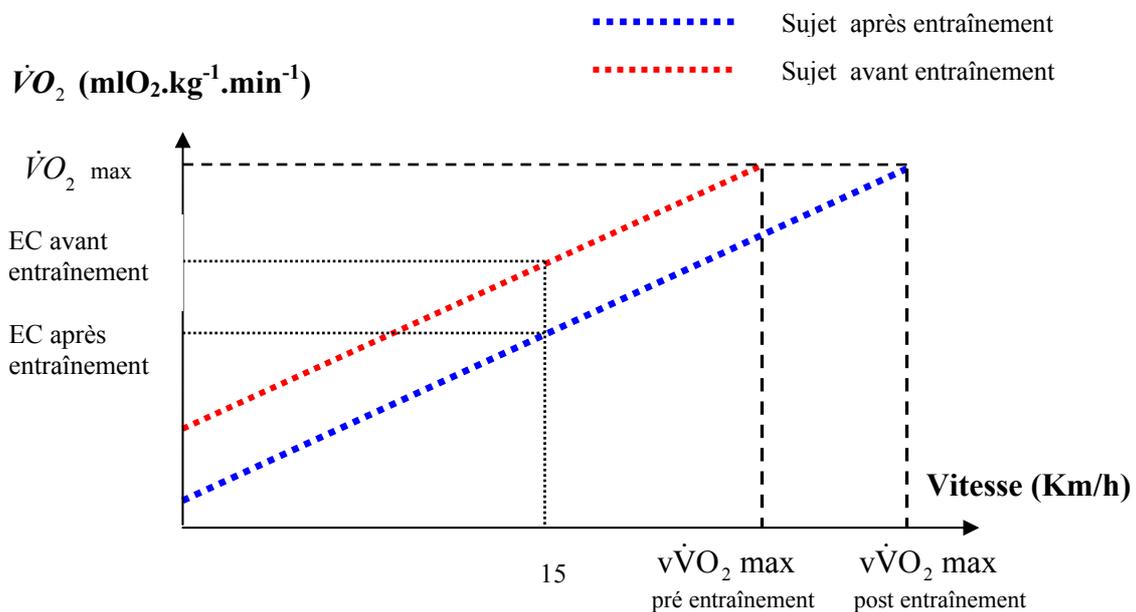
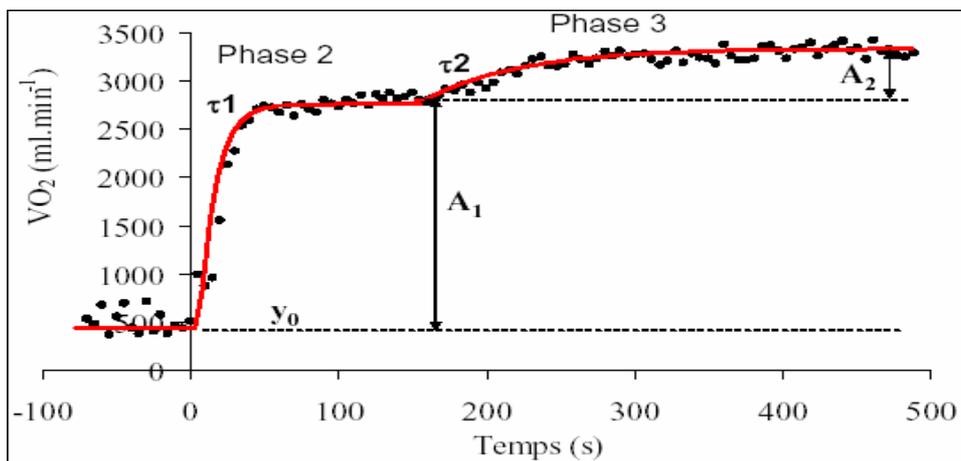


Figure 1 : effets de l'entraînement sur l'économie de course

La mesure d'EC s'effectue durant un état stable du  $\dot{V}O_2$  pour une vitesse donnée. Whipp et coll. (1982) montrent que pour des intensités inférieures à la VMA, le délai d'apparition de l'état stable est directement corrélé à l'intensité de l'exercice :

- si l'intensité de l'exercice est inférieure au seuil lactique, un état stable du  $\dot{V}O_2$  est observable après 3 à 4 minutes.
- si l'intensité de l'exercice est supérieure au seuil lactique, il n'existe pas d'état stable. En effet, une composante lente est observable dans l'augmentation du  $\dot{V}O_2$  (cf. fig. 2)

Pour des intensités supérieures ou égales à VMA, l'augmentation du  $\dot{V}O_2$  est d'autant plus rapide que l'intensité est élevée (Astrand et Rodahl, 1994).



*Figure 2 : cinétique de la consommation d'oxygène en réponse à un effort régulier d'intensité supérieure au seuil lactique.*

Le coût énergétique (CE) est également un indicateur de l'efficacité en course d'un individu.

Margaria (1976) définit CE comme le rapport entre le  $\dot{V}O_2$  associé à une vitesse de déplacement et cette même vitesse. En outre, le CE revient à rapporter l'EC à la vitesse de course.

$$CE = \frac{EC - \dot{V}O_2 \text{ repos}}{V}$$

L'économie du coureur serait étroitement liée à la mécanique et au style de course (Bransford et Howley, 1977 ; Conley et coll, 1981 ; Mayhew, 1977 ; Cavanagh et Williams, 1982). Il conviendrait donc de considérer la technique comme un facteur de performance en

lien avec l'amélioration de l'économie de course et le coût énergétique. La fréquence et l'amplitude de pas constituent les variables cinématiques qui influencent le plus l'économie de course. Högberg (1952), Cavanagh et Williams (1982), et Kaneko et coll. (1987) montrent que la combinaison fréquence/amplitude de pas la plus économique est spontanément adoptée par le coureur et que toute modification de celle-ci se traduit par une hausse du  $\dot{V}O_2$ . L'oscillation verticale du centre de masses est souvent citée comme un paramètre mécanique révélateur de l'économie de course. D'après Cavanagh et coll (1977), Dillman (1970), Gregor et Kirkendall (1978), Slocum et Bowerman (1962), les coureurs les plus économiques sont caractérisés par de faibles valeurs d'oscillation verticale du centre de masses. Ces données ont été exclusivement mesurées sur des coureur(euse)s de demi-fond et fond.

### **B) L' Economie de Course en sprint**

EC est donc définie pour des vitesses inférieures à  $v\dot{V}O_2 \text{ max}$  et la majorité des travaux sont réalisés sur des coureurs de demi-fond. En sprint, la notion d'économie existe également, mais reste plus difficile à définir. Différentes études ont cherché à identifier la réponse du  $\dot{V}O_2$  sur des épreuves de course dont l'intensité dépasse  $v\dot{V}O_2 \text{ max}$ . Hanon et Vivier (2005) montrent l'atteinte de  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  par des athlètes sur une épreuve de 1500 mètres, dans des délais compris entre 50 secondes et 1 minute. Les valeurs de  $\dot{V}O_2$  mesurées dans cette portion de course dépassent même les valeurs de  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  déterminées lors du test réalisé auparavant (TUB2). Ce pic de  $\dot{V}O_2$ , qui ne se maintient que peu de temps, est suivi par une stabilisation de  $\dot{V}O_2$  très faiblement inférieur au niveau de  $\dot{V}O_2 \text{ pic}$ . Ce  $\dot{V}O_2$  stabilisé correspond à  $\dot{V}O_2 \text{ max}$ . Ce plateau est maintenu jusque dans les cent derniers mètres, où la perte de vitesse souvent remarquée altère légèrement la valeur de  $\dot{V}O_2$ . Thomas et col. (2005) montrent d'après les analyses effectuées sur des coureurs experts que, durant une épreuve de 800-m en course,  $\dot{V}O_2$  augmente progressivement jusqu'à atteindre  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  après 45 secondes ( $\pm 11$ ) d'effort soit environs après 300-m de course. Les valeurs mesurées pendant les 30 secondes suivantes ( $33 \pm 6$  s), soit environs 200-m, ne seraient pas significativement différentes de  $\dot{V}O_2 \text{ max}$ , ce qui laisserait penser qu'un plateau de  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  est atteint entre les 45ème et 77ème secondes de course. Les valeurs mesurées pour le reste de la course révèlent une chute du  $\dot{V}O_2$  progressive jusqu'à la fin de l'effort.

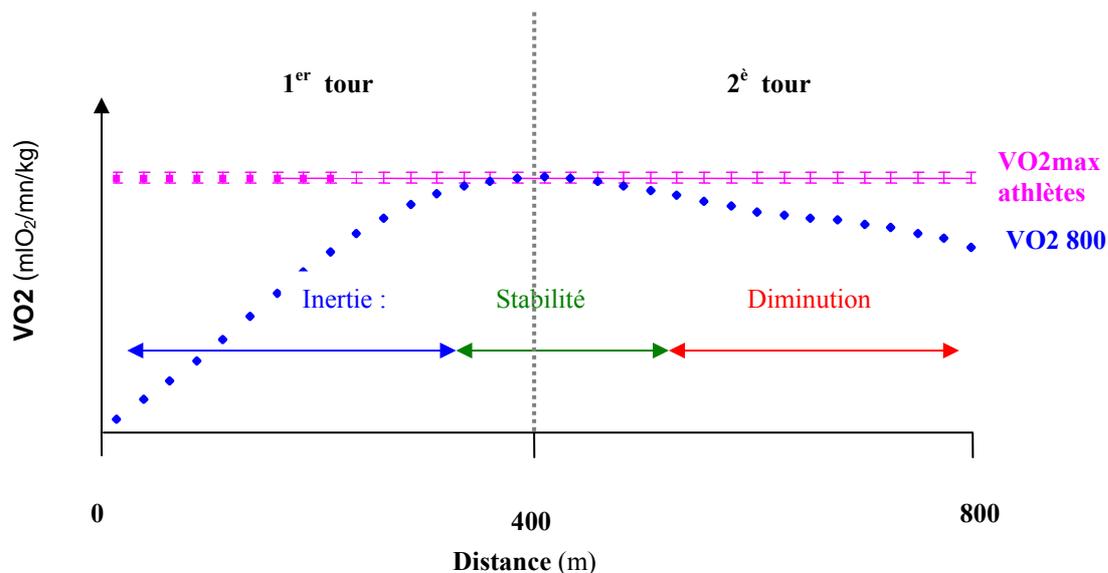


Figure 3 : consommation d'oxygène lors d'une épreuve de 800 mètres en course à pied (d'après Hanon et coll., 2004)

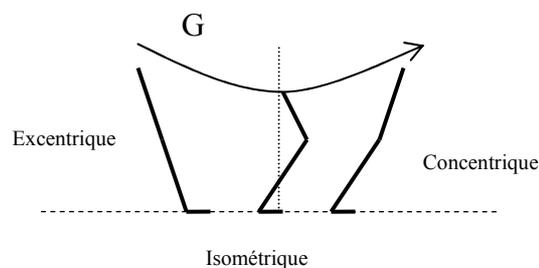
A notre connaissance, aucune étude ne rapporte de valeurs de  $\dot{V}O_2$  mesurés sur une course de 400-m. Cependant, Astrand et Rodhal (1994) mettent en évidence qu'un exercice maximal d'une minute peut solliciter le métabolisme aérobie de façon maximale. Toutefois, pour des efforts de sprint, dont la vitesse de déplacement dépasse nettement la VMA, la consommation d'oxygène ne peut être considérée comme un indicateur de l'économie de course. Il est difficile d'évaluer EC en sprint en raison de la forte contribution du métabolisme anaérobie dans le processus de resynthèse de l'ATP (Mero et coll., 1992). L'économie en course en sprint n'a pas réellement été définie dans la littérature, mais il semblerait d'après les observations de terrain de différents entraîneurs qu'elle soit plus liée à des paramètres biomécaniques que bioénergétiques, contrairement à la notion d'économie de course appliquée aux efforts sous maximaux. Ainsi, la variable la plus souvent évoquée est la hauteur de vol (H). Bruno Gajer explique que la hauteur de vol doit être diminuée au maximum pour favoriser l'orientation des forces de l'athlète vers l'avant plus que vers le haut. Les oscillations verticales du centre de gravité représentent une perte d'énergie, proportionnelle à la masse de l'athlète, car elles s'opposent à l'avancement. Cette observation rejoint la pensée de Mero et coll. (1992) pour qui les oscillations verticales du centre de gravité seraient très fortement corrélées à l'économie de course en sprint : moins il y a d'oscillations verticales, plus le coureur est économique. Ces considérations enlèvent toute possibilité de mesurer l'économie de course en sprint à partir de  $\dot{V}O_2$ . Cependant, d'autres variables pourraient être

liées à la notion d'économie de course en sprint : la structure de la foulée (Mero et coll. 1982), les forces de réaction du sol (Mero et Komi, 1987), l'élasticité musculaire (Mero et Komi, 1986) et la résistance de l'air (Davies 1981). De plus, l'utilisation de l'énergie élastique engendrée par le cycle étirement - détente est un paramètre associé à l'économie de course en sprint. Elle révèle une efficacité mécanique plus importante qu'avec un travail concentrique pur. Cavagna et Kaneko (1977) démontrent une augmentation de l'efficacité du cycle étirement-contraction avec l'augmentation de la vitesse de course (de 1.7 à 9.2 m/s).

## **II - EFFETS DE LA VITESSE SUR LES PARAMETRES MECANIQUES DE LA FOULEE**

Les paramètres mécaniques de la foulée sont nettement dépendants de la vitesse de déplacement (V). Les paramètres les plus utilisés par les entraîneurs de sprint sont les suivants : temps de contact (TC), temps de vol (TV), fréquence de pas (F), amplitude de pas (A), hauteur de vol (H), angle d'envol (AE), et distance sur l'appui (D).

- *Le temps de contact* : représente la durée de contact du pied au sol, pour un appui. C'est le seul moment où l'athlète est en mesure d'exercer des forces sur le sol lui permettant de se propulser et d'avancer. Lorsqu'il n'y a pas de contact entre l'athlète et le sol, seuls le poids et les forces de frottements s'appliquent sur le centre de gravité, qui décrit une trajectoire parabolique. Le temps de contact se subdivise en deux phases : la phase excentrique, période durant laquelle le centre de gravité décrit une trajectoire descendante, et la phase concentrique, pendant laquelle cette trajectoire est ascendante (fig. 4). Luhtanen et Komi (1978) montrent qu'avec l'augmentation de la vitesse, les temps de contact (phase excentrique + phase concentrique) diminuent. Les temps de contact sont mesurables à l'aide de différents outils : la vidéo rapide, l'optojump.



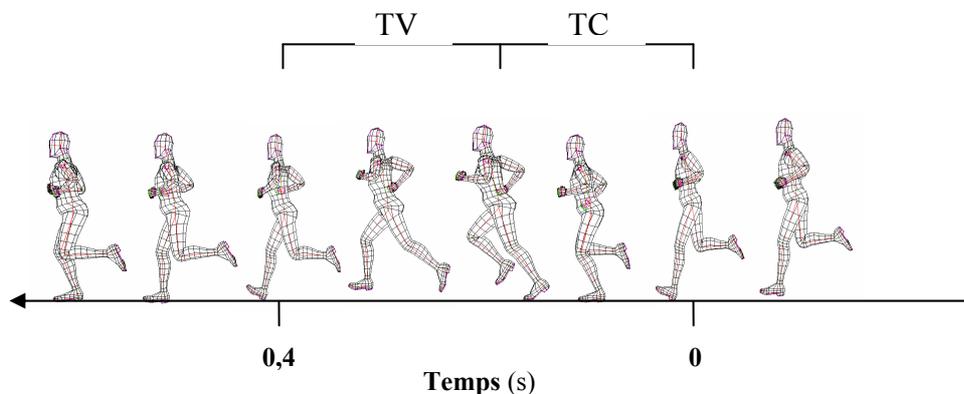
*Figure 4 : modélisation de la phase d'appui en course à pied*

- Le temps de vol : TV correspond à la durée de la phase de suspension (fig. 5). Cette phase est consacrée à la réorganisation segmentaire préparant et anticipant l'appui suivant.

D'après plusieurs études (Luthanen et Komi, 1978 ; Nelson et Gregor, 1976 ; Nelson et Osterhoudt, 1971), il semblerait que la vitesse n'ait pas d'effet significatif sur le temps de vol, bien que Elliot et Blanksby (1976) et Nelson et coll. (1972), ait remarqué une augmentation de TV avec l'augmentation de V, sur tapis roulant et piste de course. Ces résultats ne permettent toutefois pas de mettre en évidence une corrélation entre V et TV. Mero et Komi (1985) observent toutefois une augmentation de TV sur des efforts de vitesse supramaximale dans les conditions où il y a une augmentation de A. Les outils qui permettent de mesurer TV sont la vidéo et l'optojump.

-La fréquence de pas : exprimée en Hertz, la fréquence représente le nombre d'appuis réalisés par unité de temps (s) (fig. 5). Elle est l'inverse du temps d'un cycle de course (temps de contact + temps de vol).

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{(TC + TV)}$$

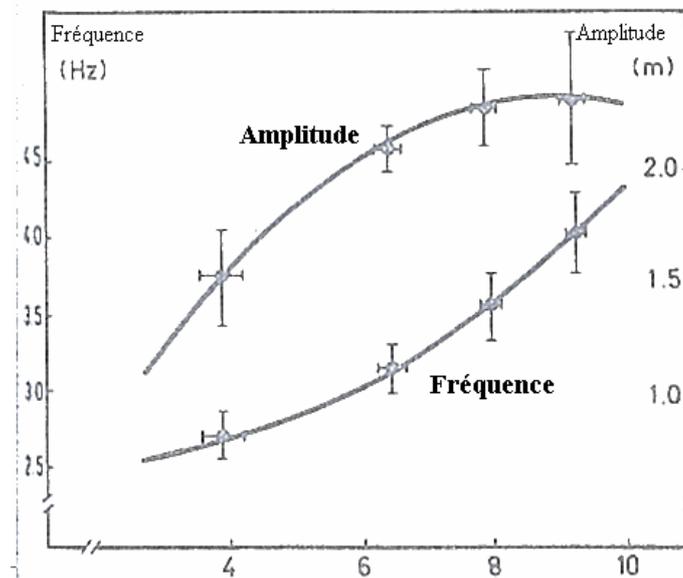


*Figure 5 : modélisation des phases d'appui et de suspension en course à pied*

$$F = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ Hertz}$$

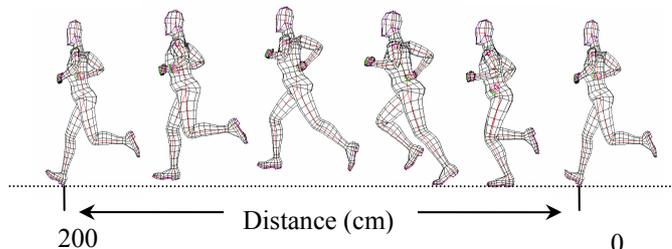
L'augmentation de la vitesse de déplacement provoque une augmentation de F. A partir d'une certaine vitesse (environ 7 m/s), l'augmentation de V est en grande partie due à la hausse de F, ce qui laisse penser qu'à de grandes vitesses, les athlètes aient prioritairement recours à une

augmentation de fréquence pour augmenter leur vitesse (fig. 6). L'optojump et l'analyse vidéo permettent d'apprécier la fréquence de pas.



*Figure 6 : évolution de la fréquence de pas et de l'amplitude de pas avec la vitesse (Luthanen et Komi, 1978)*

- L'amplitude de pas : représente la distance séparant le point de contact initial d'un pied avec le sol jusqu'au point de contact du pied opposé.



*Figure 7 : modélisation de l'amplitude de pas (A)*

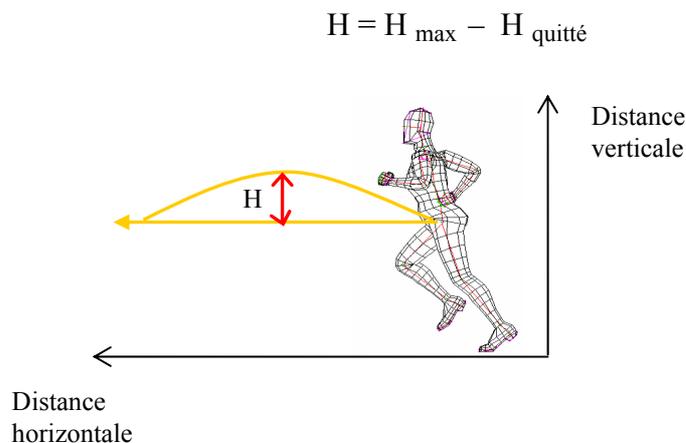
A partir de la fréquence de pas et de l'amplitude de pas, il est possible de déterminer une approximation de la vitesse de course :

$$V = A \times F$$

Cette formule qui établit la relation entre V, d'une part, et F et A, d'autre part, suggère que l'augmentation de V dépend de l'augmentation de A, de F, ou des deux. La figure 6 montre l'augmentation de A avec V pour des vitesses modérées à rapides, puis une stabilisation voir une régression de A pour des vitesses rapides et très rapides. A constitue donc le premier

facteur d'augmentation de V pour toutes les allures de course modérées à rapides. Il semblerait donc que les athlètes aient d'abord prioritairement recours à des modifications d'amplitude pour augmenter leur vitesse de course, puis à une élévation du rythme aux alentours des vitesses maximales.

- La hauteur de vol : la hauteur de vol correspond à la distance verticale parcourue par le centre de masse (CM) du coureur entre le moment où le coureur quitte le sol et son point le plus haut (phase de suspension), pendant une foulée (fig. 8).



*Figure 8 : modélisation de la hauteur de vol (H)*

La hauteur maximale atteinte par CM dépende de sa vitesse verticale de décollage. Elle est l'expression du produit suivant :

$$H = \frac{V^2}{2g}$$

Elle peut également être calculée à partir du temps de vol :

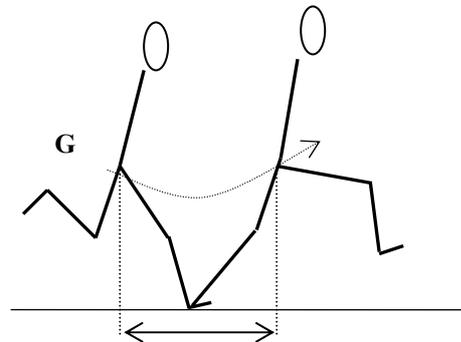
$$H = \frac{1}{8}gTV^2$$

(avec  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ )

Les oscillations verticales du centre de gravité s'atténuent avec l'augmentation de la vitesse (Cavagna G.A, L. Komarek, S.Mazzoleni, 1974 ; Komi et Al, 1983 ; Luhtanen et Komi, 1978), et ce pour des vitesses allant du footing jusqu'à des sprints maximaux (3.9 à 9.3 m/s). On observe donc une baisse de H avec l'augmentation de V. L'optojump, la vidéo et une plateforme de force permettent de mesurer H.

-La distance sur l'appui : lors de la phase d'appui, la trajectoire de G de l'athlète parcourt une distance horizontale dans le sens du déplacement. C'est ce qu'on nomme la distance sur l'appui (fig. 9).

*Figure 9 : modélisation de la distance parcourue sur l'appui*

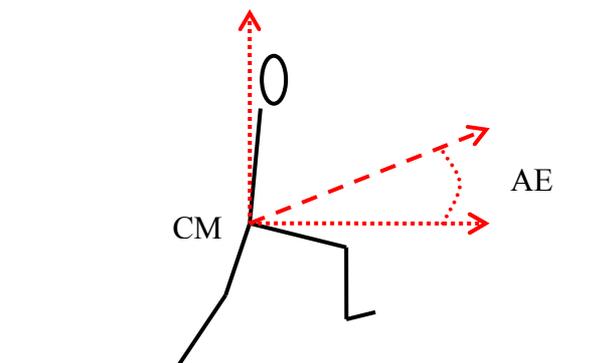


**Distance sur l'appui (m)**

Sur terrain, la distance parcourue pendant la phase d'appui n'est pas dépendante de la vitesse, mais plutôt des caractéristiques de l'athlètes (Mac Mahon et Green, 1979 ; Cavagna et col. 1976). Ces auteurs relèvent des distances sur l'appui stables à chaque individu malgré l'augmentation de la vitesse, à partir de 5 m/s. Sur tapis roulant, Grillner (1979), montre lui qu'il y a une augmentation de la distance sur l'appui avec l'élévation de la vitesse. Le tapis roulant semble constituer un biais méthodologique qui ne permettrait pas de comparer ces données avec celles établies sur terrains.

- Angle d'envol : correspond à l'inclinaison de la trajectoire du CM lorsque l'athlète quitte le sol (fig. 10).

*Figure 10 : modélisation l'angle d'envol (AE)*



### **III – EFFET DE LA FATIGUE ET DE L'ENTRAÎNEMENT EN SPRINT**

#### **A) Effets de la fatigue sur les paramètres mécaniques de la foulée**

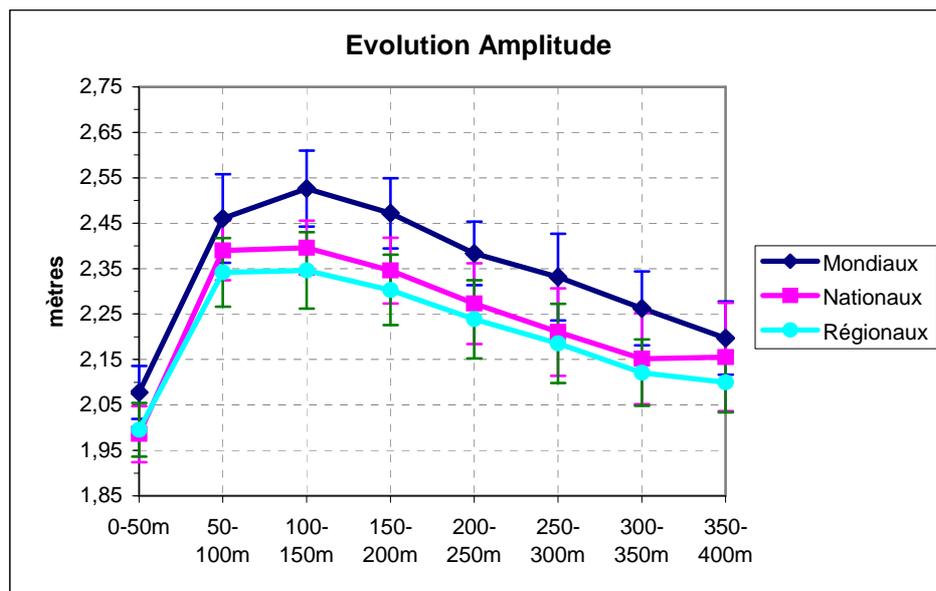
La fatigue peut être définie comme l'amointrissement de la capacité d'un muscle à générer une force ou une puissance (Bigland-Ritchie et Woods, 1984). La fatigue a des effets sur les paramètres mécaniques de la foulée très marqués sur 400-m. En effet, lorsque l'activité musculaire est maintenue à une haute intensité, on observe une diminution progressive des possibilités de produire de la tension musculaire qui affectent les paramètres mécaniques de la foulée. Une diminution de A de 5 à 8% sont notées sur piste à partir du 400-m (Bates et Haven, 1973 ; Sprague et Man, 1983 ; Nummela et coll 1992). Néanmoins, la durée de la contraction musculaire augmente avec l'apparition de la fatigue, ce qui se traduit par une augmentation de TC (Chapman et Fraser 1982, Sprague et Mann 1983, Nummela et coll 1992, Gager et coll 1996).

Hirvonen et coll (1992) analysent la fatigue sur 400-m par la mesure physiologique des substrats avant et après l'effort. Ils observent une baisse de la concentration musculaire d'ATP (adénosine triphosphate) et de CP (créatine phosphate) de respectivement 27% et 89%, et mesurent une concentration musculaire en lactate de 17,3 mmol/Kg en fin de course. La vitesse diminue à partir du 200-m alors que les réserves de CP ne sont pas totalement épuisées et que la concentration en lactates n'est pas maximale. Cela s'expliquerait par la baisse du taux d'ATP re-synthétisé et par le recrutement d'autres types de fibre musculaire.

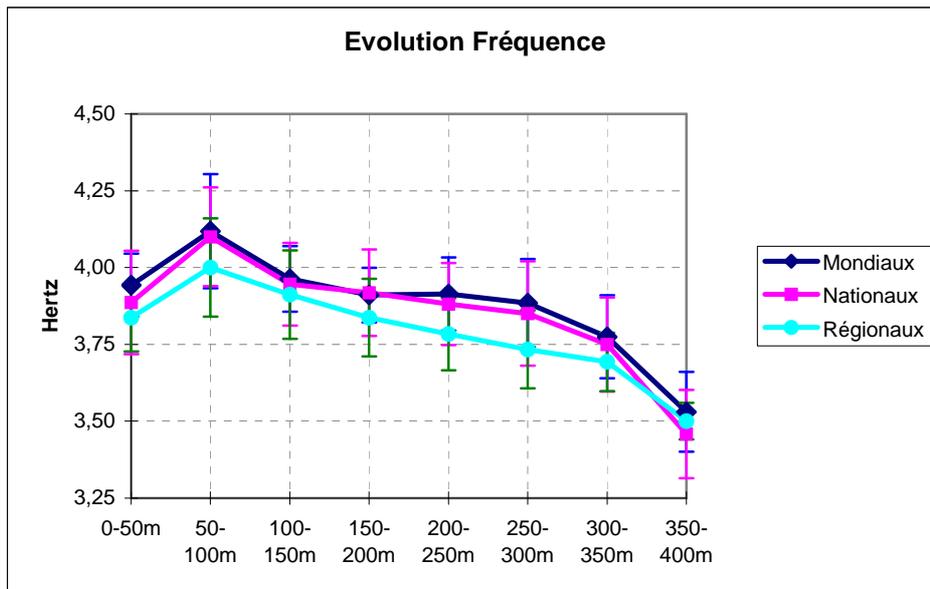
Nummela, Rusko et Mero (1994) ont mesuré l'activité EMG et les forces de réaction du sol au cours d'un 400-m. Ils notent une baisse des forces de réaction du sol (phase de propulsion et phase de freinage) en fin de course, avec une augmentation de l'activité EMG lors de la phase de freinage et une diminution lors de la phase de propulsion, par rapport aux valeurs de début d'effort. L'augmentation de l'activation neuronale pourrait compenser la fatigue musculaire, et la pré activation permettrait de maintenir la production de force pendant le 400-m. Ainsi, la fatigue serait différente en fonction du travail de chaque muscle. Nummela, Vuorimaa et Rusko (1992) expliquent que la force générée par les muscles des membres inférieurs commence à décroître dès le premier quart de la course, mais qu'elle serait compensée jusqu'aux 200-300-m. Après, la fatigue ne peut plus être compensée, et V diminue, alors que les niveaux d'activité musculaire (Ga, VL) s'élèvent dans toutes les phases du cycle de la

foulée. La fatigue générée par l'effort du 400-m ne serait pas due, pour les athlètes entraînés, à une affectation du système nerveux central, mais au fonctionnement des muscles squelettiques. Horita et Ishiko (1987) interprètent cette baisse de l'efficacité musculaire comme un témoin de l'apparition de la fatigue périphérique. Les principales conséquences de la fatigue observées au niveau des activités musculaires résident dans une augmentation du rapport temps de travail/temps de relaxation, due à la diminution du temps de relaxation musculaire et à une augmentation du rapport EMGi/force.

Gajer (2002) fait état de cette fatigue en décrivant la nette baisse de fréquence de pas qui intervient au cours d'un effort de 400-m (fig. 12), ainsi que la diminution de l'amplitude (fig. 11). La diminution associée de ces deux paramètres à partir du premier quart de course caractérise la baisse de vitesse observable ( $V = F \times A$ ) dans ce type d'effort, particulièrement marquée en fin de course (derniers cinquante mètres).



*Figure 11 : Evolution de l'amplitude de pas au cours du 400-m masculin à différents niveaux d'expertise (Gajer, 2002)*



*Figure 12 : Evolution de la fréquence de pas au cours du 400-m masculin à différents niveaux d'expertise (Gajer, 2004)*

La fatigue produit des effets globaux sur les paramètres mécaniques et temporels en sprint. D'après Chapman (1982), ces changements résultent de la combinaison de différents paramètres individuels. De même, Bates et Haven (1974) observent sur une course de 400-m une augmentation de « stance phase » et une diminution de V à cause de la fatigue. Mais les modifications mécaniques qui accompagnent cette hausse de « stance phase » varient considérablement selon les individus.

## **B) Effets de l'entraînement**

L'entraînement est le processus de développement ordonné, contrôlé et réglé des capacités fonctionnelles de l'individu, qui intervient dans différents domaines et sollicite différentes qualités physiques en vue d'atteindre un niveau plus ou moins élevé dans la discipline considérée (Weineck, 1988). La mesure des effets de l'entraînement représente une démarche particulièrement complexe : en effet, la quantité et l'interdépendance des stimuli induits par le processus d'entraînement ainsi que la diversité des réponses mécaniques, physiologiques, psychologiques... de l'individu, rendent l'observation de l'entraînement délicate. En outre, mesurer les effets de l'entraînement revient :

- à tenter d'isoler des variables afin de rendre compte de l'influence de l'une sur le développement d'une autre (ex : effet de l'augmentation de la force sur la consommation maximale d'oxygène)
- à suivre le processus d'entraînement pendant une période suffisamment importante pour permettre l'observation des adaptations les plus lentes (ex : effet d'un entraînement de douze semaines en force excentrique sur la détente verticale).

Ces exigences méthodologiques expliquent sans doute la pénurie d'études menées sur les effets de l'entraînement en sprint dans la littérature scientifique. Quelques études se sont cependant penchées sur des problématiques d'entraînement en sprint long.

Heugas et coll. (1997) ont observé les effets d'un entraînement classique sur une période de trois mois sur le déficit maximal d'oxygène (MAOD) et les indices de la capacité anaérobie chez des coureurs de 400-m de haut niveau. Onze athlètes ont réalisé des tests avant et après la période d'entraînement, rendant compte du MAOD, du pic de lactate sanguin post exercice, du pic de  $\dot{V}O_2$ , et du temps d'épuisement à l'exercice. Ils relatent une corrélation entre la baisse de MAOD et l'augmentation du pic de consommation d'oxygène dans cette population. Cette observation laisserait penser que le déficit maximal d'oxygène serait sensible à un entraînement aérobie intense. D'autre part, Nummela et Rusko (2000) ont suivi l'entraînement en stage en altitude d'un groupe de sprinters. Huit coureurs de 400-m ont réalisé avant et après une période de dix jours en altitude un test de course anaérobie maximal, visant à déterminer la vitesse maximale et les vitesses à différentes concentrations de lactates, ainsi qu'un test sur 400-m. Les résultats obtenus sont comparés à ceux d'une population ayant subi le même entraînement mais n'ayant pas bénéficié des conditions d'hypoxie. Les auteurs montrent une amélioration de la performance sur 400-m après dix jours de 'living high and training low' (vie et sommeil en altitude avec entraînement au niveau de la mer), sans doute due aux changements dans la balance acide-basique et dans le métabolisme des lactates.

Aucune étude ne fait cependant référence à un suivi longitudinal mettant en relation l'entraînement et la mécanique de course chez des coureuses de 400-m de haut niveau. Seul Zafeiridis (2005) relate une modification des paramètres mécaniques de course en sprint induite par l'entraînement. Vingt deux sprinteurs répartis en deux groupes ont respectivement suivi un programme d'entraînement avec et sans chariot tracté pendant une période de huit semaines. Les résultats montrent les bénéfices du travail tracté (5 kg) pour le gain de vitesse dans la phase d'accélération en sprint, principalement expliqués par une augmentation de la fréquence de pas. Ils montrent également que ce travail est moins bénéfique que le travail sans

chariots pour la phase de vitesse maximale. Le travail sans résistance permettrait un gain de vitesse par l'augmentation de l'amplitude de pas.

#### **IV- OBJECTIFS**

Le but de cette étude est de mesurer les effets de l'entraînement en sprint sur les paramètres mécaniques de la foulée chez des coureuses de 400-m de haut niveau, et de dégager en particulier les éléments mécaniques qui pourraient influencer favorablement l'économie de course.

L'hypothèse de ce travail est que le temps de vol, et par voie de conséquence, la hauteur maximale atteinte par le centre de masse du coureur aux vitesses de compétition, vont diminuer avec l'entraînement. Cette modification des caractéristiques mécaniques de la foulée pour une même séance réalisée aux mêmes intensités de course devrait constituer un indicateur pertinent de l'amélioration de l'économie de course en sprint long.

Deuxième partie :

## **MATERIEL ET METHODE**

## I- SUJETS

L'étude a été réalisée en collaboration avec le groupe de sprint long féminin du pôle INSEP (n = 5). Les coureuses sont âgées de 23,8 ans  $\pm$  3,6, leur taille est de 1m74  $\pm$  4,2 et leur poids de 63 kg  $\pm$  4,1. Leur performance moyenne sur 400-m est de 54,28 s  $\pm$  1,64.

Tableau 1 : caractéristiques des sujets

	Age	Taille (cm)	Poids (kg)	Record (s)
	22	178	60	52,44
	29	167	61	54,86
	22	176	69	-
	20	176	67	53,56
	26	175	61	56,24
<b>Moyenne</b>	<b>23,80</b>	<b>174,40</b>	<b>63,60</b>	<b>54,28</b>
Ecart Type	3,63	4,28	4,10	1,64

Ces athlètes, qui figurent parmi les meilleures nationales, s'entraînent quotidiennement du mois de septembre au mois de juillet inclus. Leur entraînement est composé alternativement de séances de course, de musculation, de technique, et de préparation physique.

Toutes les coureuses sont volontaires et autorisent la publication anonyme des données les concernant. Ayant été informés préalablement de l'objet et des enjeux de l'étude, il n'est pas impossible que le dispositif expérimental ait influencé leur comportement moteur.

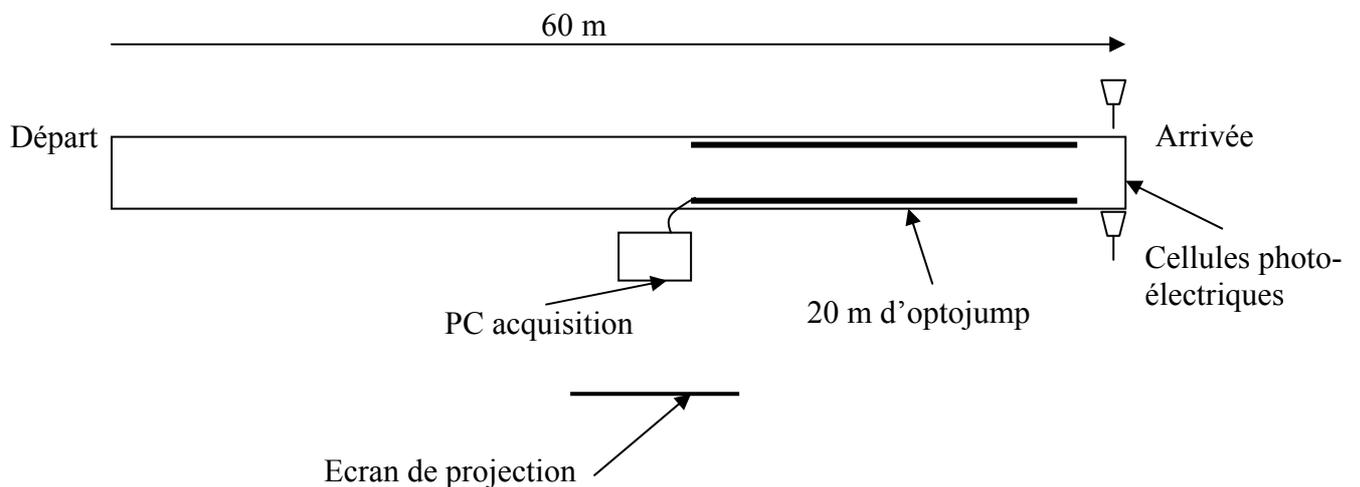
## II- PROTOCOLE

Les paramètres mécaniques de la foulée ont été mesurés tous les mois entre Octobre et Décembre pendant une séance d'entraînement spécifique. Cette séance était composée de 9 séries de 60-m entrecoupées de 5 minutes de récupération. La vitesse de course du 60-m était établie par l'entraîneur en fonction de la vitesse cible de compétition sur 400-m. Pour l'entraîneur, ces séances entraient dans le cadre de la préparation générale de ses athlètes, et constituaient un travail de vitesse spécifique, consistant à confronter les athlètes à des rythmes de compétition. Le temps de contact (TC), le temps de vol (TV) et l'amplitude de pas (A) ont été mesurés par un système d'analyse, et ont permis le calcul de la hauteur de vol (H), de la fréquence de pas (F), de l'angle d'envol du CM (AE) et de la distance parcourue sur l'appui (DA). Chaque course était chronométrée à l'aide de cellules photo électriques (Microgate, Bolzano, Italie) enclenchées par le chronomètre de l'entraîneur à chaque départ. Après chaque

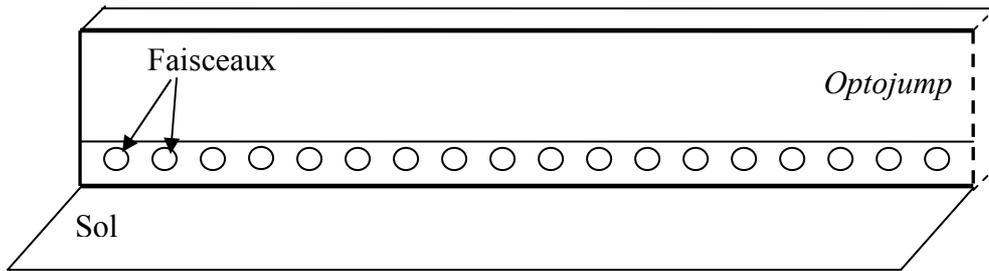
course, les paramètres mécaniques mesurés de l'athlète ont été projetés sur un écran (cf. Annexes), permettant un retour direct pour l'entraîneur et l'athlète. L'entraîneur pouvait ainsi donner des consignes particulières à l'athlète après une brève analyse des données. L'intérêt majeur de ce protocole est de permettre à l'entraîneur de réguler et de trouver un feedback d'une grande précision au fur et à mesure de l'action.

### III- MATERIEL

Les différents paramètres ont été mesurés à chaque passage à l'aide d'un optojump (Microgate, Bolzano, Italie) d'une longueur de 20 m (fig. 13). L'Optojump est un système de mesure optique qui permet d'apprécier (au 1000ème) les temps de contact au sol, les temps de vol du pied et l'amplitude de pas. Il se compose de vingt barres (100 x 4 x 3 cm) connectées bout à bout.

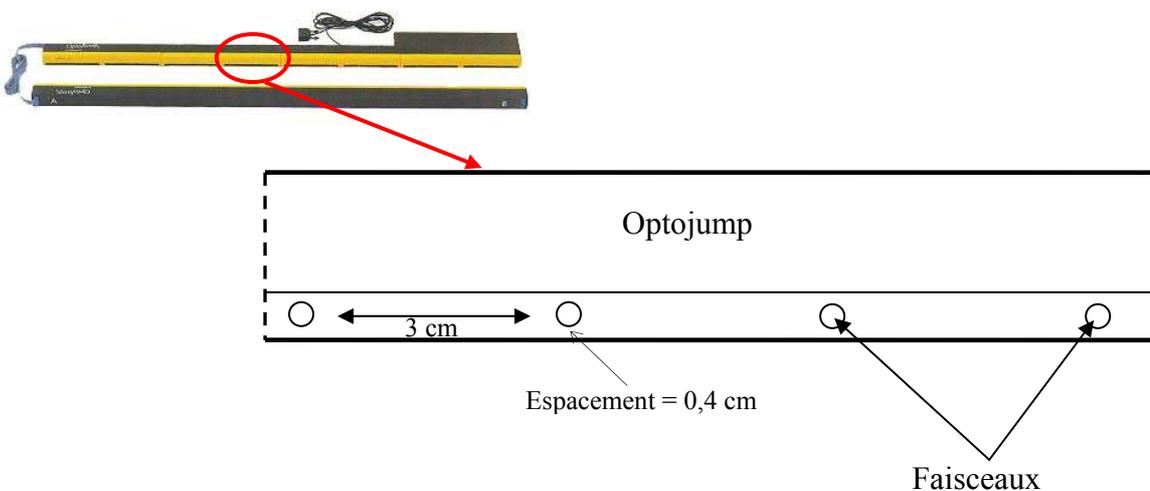


*Figure 13 : Dispositif expérimental*



*Figure 14 : Disposition des faisceaux sur l'optojump*

Une barre est constituée de 32 faisceaux photoélectriques qui sont activés au passage du pied de l'athlète dans un faisceau. Le système mesure le temps pendant lequel le pied coupe le faisceau. Du fait de la mince surélévation des faisceaux par rapport au niveau du sol (0,4 cm) le système surévalue légèrement TC (cf. fig 14). En effet, les faisceaux sont activés légèrement avant la pose du pied au sol, et désactivés légèrement après le départ du pied, ce qui se traduit par une mesure théorique de TC plus grande que TC réel. L'amplitude est établie par la mesure de l'écart entre le dernier faisceau activé et le dernier du pas précédent. Espacés de 3 cm (fig. 15), l'écartement des faisceaux peuvent engendrer une incertitude sur la mesure de l'amplitude de l'ordre de 2.5% pour une amplitude de 2 mètres (i.e. :  $\frac{-0,03}{2} \times 100$ ). A partir du moment où le pied ne coupe plus le faisceau, le système mesure TV. L'axe surélevé des faisceaux sous évalue donc légèrement TV.



*Figure 15 : Espacement des faisceaux sur l'optojump*

#### IV- TRAITEMENT DES RESULTATS

A partir de TC, TV et A, nous avons calculé la hauteur de vol (H), la fréquence de pas (F), l'angle d'envol (AE) et la distance parcourue sur l'appui (DA).

-Hauteur :

$$H = \frac{1}{8}gTV^2$$

$$g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

TV exprimé en secondes (s)

H en mètres (m)

-Fréquence :

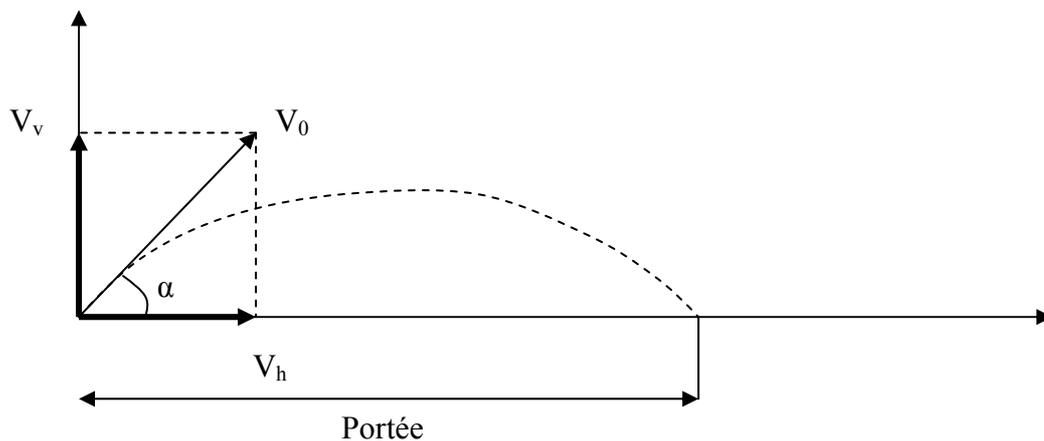
$$F = \frac{1}{TC + TV}$$

F exprimé en Hertz (Hz)

TC et TV exprimés en secondes (s)

-Angle d'envol :

Le coureur est assimilé à son centre de masse. On utilise l'équation de la parabole qui permet d'estimer  $\alpha$ ,  $V_0$ ,  $V_v$  et la portée.



$$-\cos \alpha = \frac{V_h}{V_0}$$

•  $V_h$  = vitesse de déplacement

•  $V_0^2 = V_v^2 + V_h^2$

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

-  $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$

d'où :  $\cos \alpha = \frac{V_h}{\sqrt{2gH + V_h^2}}$

-Distance sur l'appui :

DA = Amplitude –Portée

on sait que :

$$\begin{aligned} \text{Portée} &= \frac{V_0^2 \times \sin 2\alpha}{g} \\ &= \frac{(2gH + V_h^2) \times \sin 2\alpha}{g} \end{aligned}$$

donc :  $DA = A - \frac{(2gH + V_h^2) \times \sin 2\alpha}{g}$

## VI- STATISTIQUES

Pour tester les effets de l'entraînement, un test de Fridman à été utilisé. La comparaison des moyennes des paramètres mesurés en octobre, novembre et décembre a été faite à l'aide d'un test post-hoc (test de Dunn). Les relations entre les différents paramètres mécaniques ont été testées à l'aide d'un test de corrélation (test de Spearman). Le seuil de significativité a été fixé à  $p \leq 0.05$ .

Les corrélations entre les paramètres ont été mesurées pour rendre compte du comportement des variables ente elles. Toutes les valeurs enregistrées en octobre, novembre et décembre ont été utilisées pour effectuer ces tests (n = 60 par athlète et par paramètre). De plus, les corrélations ente la variation de ces paramètres d'octobre à décembre ont été calculé

également. L'intérêt majeur des corrélations de variation est de mesurer le rôle de l'évolution de la vitesse dans la modification des autres paramètres. Pour calculer ces corrélations, les valeurs enregistrées au mois d'octobre ont été soustraites aux valeurs enregistrées au mois de décembre ( $n = 20$  par athlète et par paramètre), et comparées aux autres paramètres.

Troisième partie :

## **RESULTATS**

## I- EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT

Entre les mois d'octobre et décembre, le comportement mécanique des athlètes à leur vitesse de course spécifique a évolué. En effet, les valeurs des différents paramètres mécaniques enregistrées lors des séances test laissent apparaître une modification au cours du temps (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : effet de l'entraînement sur le temps de contact (TC), le temps de vol (TV), la hauteur (H), la fréquence (F) et l'amplitude de pas (A), la vitesse (V), l'angle d'envol (AE) et la distance sur l'appui (DA).

	<i>Octobre</i>	<i>Novembre</i>	<i>Décembre</i>	<i>Sens de l'évolution</i>	<b>p</b>
<b>TC ± ET (s)</b>	<b>0,121 ± 0,008</b>	<b>0,122 ± 0,006</b>	<b>0,122 ± 0,006</b>	=	<b>0,734</b>
<b>TV ± ET (s)</b>	<b>0,148 ± 0,007</b>	<b>0,144 ± 0,007</b>	<b>0,140 ± 0,004</b>	↘	<b>0,0004</b>
<b>H ± ET (cm)</b>	<b>2,7 ± 0,2</b>	<b>2,5 ± 0,3</b>	<b>2,4 ± 0,1</b>	↘	<b>0,0001</b>
<b>F ± ET (Hz)</b>	<b>3,71 ± 0,13</b>	<b>3,77 ± 0,11</b>	<b>3,83 ± 0,10</b>	↗	<b>0,0013</b>
<b>A ± ET (cm)</b>	<b>216 ± 12,6</b>	<b>218 ± 9,1</b>	<b>218 ± 7,0</b>	=	<b>0,5482</b>
<b>V ± ET (m/s)</b>	<b>8,1 ± 0,5</b>	<b>8,2 ± 0,3</b>	<b>8,3 ± 0,2</b>	↗	<b>0,0272</b>
<b>AE ± ET (deg)</b>	<b>5,1 ± 0,4</b>	<b>4,9 ± 0,3</b>	<b>4,7 ± 0,2</b>	↘	<b>0,0024</b>
<b>DA ± ET (cm)</b>	<b>0,96 ± 0,01</b>	<b>1,00 ± 0,05</b>	<b>1,01 ± 0,04</b>	↗	<b>0,0079</b>

↗ évolution significative entre octobre et décembre

= pas de différence significative entre octobre et décembre

Evolution de la vitesse : entre les mois d'octobre et de décembre, la vitesse moyenne de déplacement sur la séance a évolué significativement, passant de  $8,1 \pm 0,5$  m/s à  $8,3 \pm 0,2$  m/s, soit une augmentation de 0,2 m/s (2,5 %).

Evolution du temps de contact : TC n'a pas évolué entre la première et la dernière séance. Les valeurs restent stables aux alentours de 0,120 secondes.

Evolution du temps de vol : TV diminue de façon significative entre octobre et décembre passant de  $148 \pm 7$  ms à  $140 \pm 4$  ms, soit une baisse de 5,4 %

Evolution de la hauteur de vol : H a significativement diminué entre les mois d'octobre et décembre ( $2,7 \pm 0,2$  à  $2,4 \pm 0,1$ ), perdant 0,3 cm, soit une baisse de 11 %.

Evolution de l'angle d'envol : AE a significativement diminué entre les mois d'octobre et décembre (de  $5,1 \pm 0,4$  à  $4,7 \pm 0,2$ ), perdant 0,4 degrés soit une baisse de 8 %.

Evolution de l'amplitude et de la fréquence : les valeurs d'amplitude demeurent stables aux alentours de 2,1 mètres, alors que les valeurs de fréquence augmentent significativement pendant la même période de  $3,71 \pm 0,13$  Hz à  $3,83 \pm 0,10$  Hz, soit une hausse de plus de 3 %.  
(fig. 16

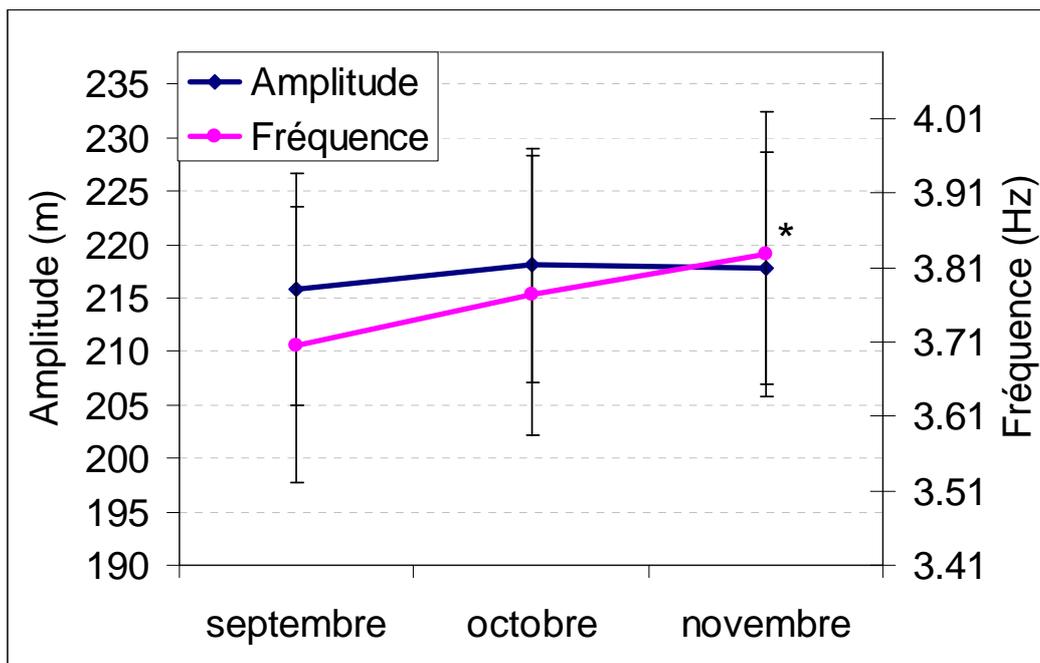


Figure 16 : effet de l'entraînement sur l'amplitude et la fréquence

\* Amplitude significativement différent du mois d'octobre ( $p \leq 0,05$ ).

Les échelles retenues pour ce graphe circonscrivent toutes les valeurs enregistrées lors des tests.

Evolution de la distance sur l'appui : DA augmente de façon significative entre octobre et décembre, passant de  $0,962 \pm 0,01$  m à  $1,015 \pm 0,04$  m, soit une amélioration moyenne de 5,3 cm sur chaque appui (5,5 %).

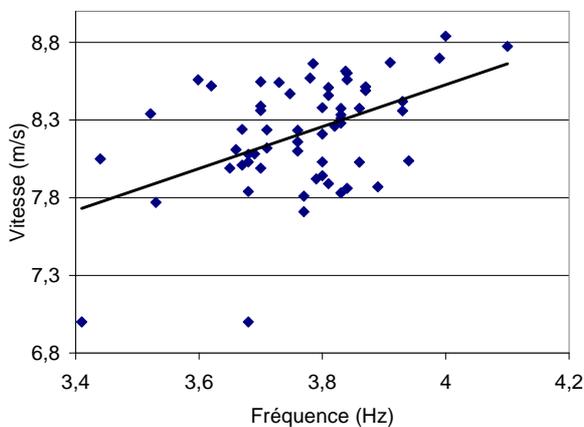
## II- CORRELATIONS

### A) Entre les paramètres mécaniques

Il y a une corrélation entre la vitesse :

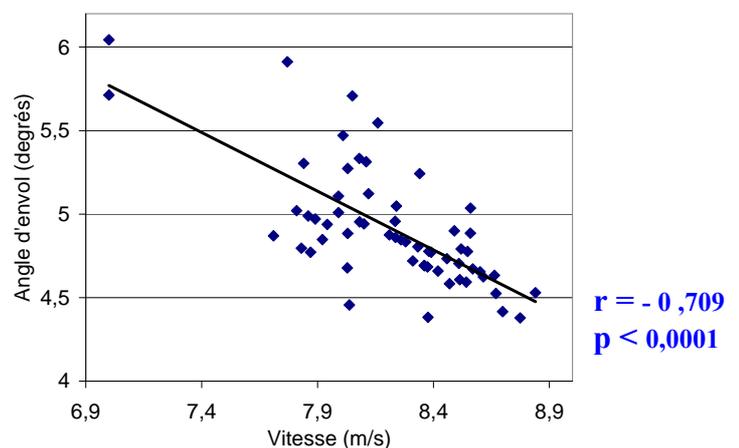
- et la fréquence ( $r = 0,471$ ;  $p = 0,0001$ ) (fig. 17)
- et l'angle d'envol ( $r = - 0,709$ ;  $p < 0,0001$ ) (fig. 18)
- et la distance parcourue sur l'appui ( $r = 0,326$ ;  $p = 0,01$ ) (fig. 19)

V évolue significativement avec F ( $p = 0,0001$ ), AE ( $p < 0,0001$ ) et DA ( $p = 0,0106$ ), et n'évolue pas avec TV et H.

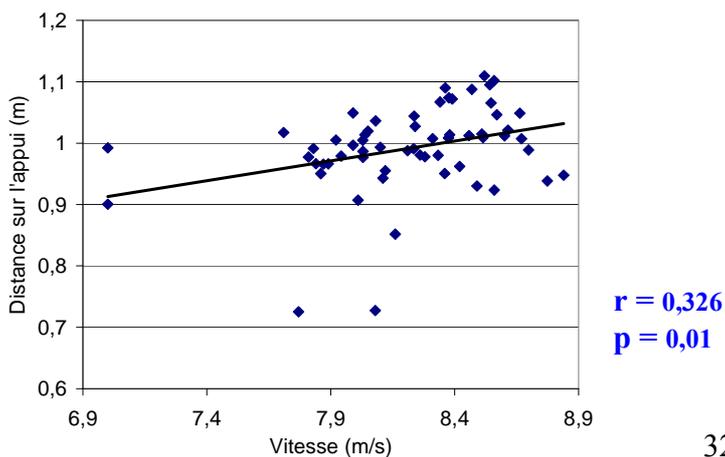


*Figure 17 : Corrélation de la vitesse et de la fréquence de pas*

*Figure 18 : Corrélation de la vitesse et de l'angle d'envol*



*Figure 19 : Corrélation de la vitesse et de la distance sur l'appui*

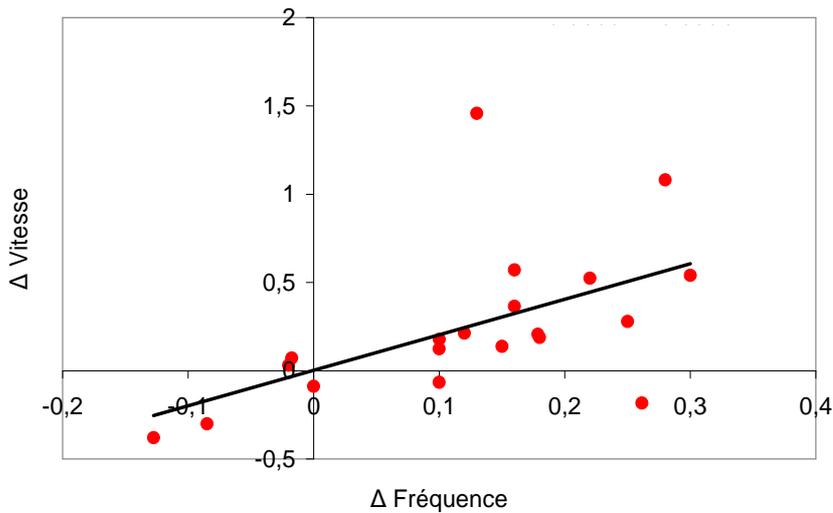


## B) Entre les variations des paramètres mécaniques

L'augmentation de V est corrélée :

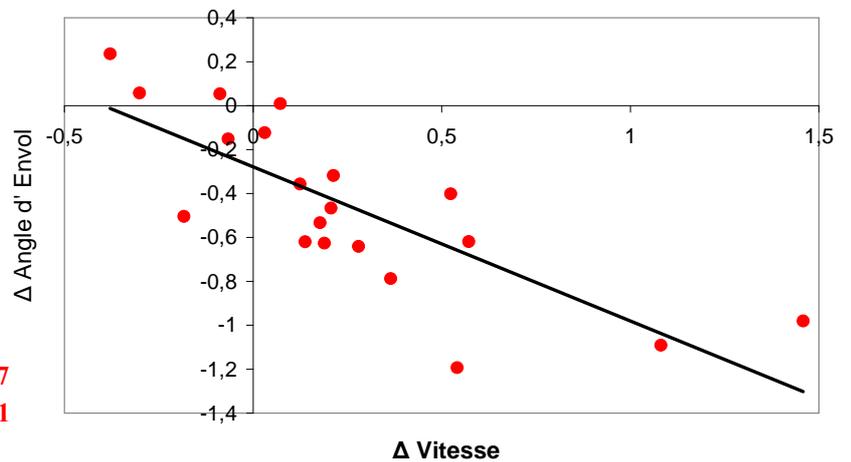
- à l'augmentation de F ( $r = 0,553$  ;  $p = 0,103$ ) (fig. 20)
- à la diminution de AE ( $r = - 0,787$  ;  $p < 0,0001$ ) (fig. 21)

En revanche, elle n'est pas corrélée à l'évolution de H, DA et TV.



*Figure 20 : Corrélation entre l'augmentation de la vitesse et l'augmentation de la distance sur l'appui*

*Figure 21 : Corrélation entre l'augmentation de la vitesse et la diminution de l'angle d'envol*



Quatrième partie :

## **DISCUSSION**

Les résultats mettent en évidence une augmentation de la vitesse entre les mois d'octobre et décembre, alors que la consigne visait à respecter la vitesse cible de compétition. Une partie des évolutions des paramètres mécaniques de la foulée peuvent être liées à l'augmentation de la vitesse. Ainsi, l'augmentation de la fréquence de pas est directement responsable de l'augmentation de la vitesse, et entraîne une diminution de l'angle d'envol. Cette hausse de  $F$  est attribuée à une diminution de  $TV$  puisque  $TC$  reste constant. Ces modifications mécaniques aboutissent à une augmentation de  $DA$  et à une diminution des oscillations verticales du centre de gravité. Cette diminution pourrait être caractéristique d'une plus grande économie de course en sprint (Mero et al. 1992).

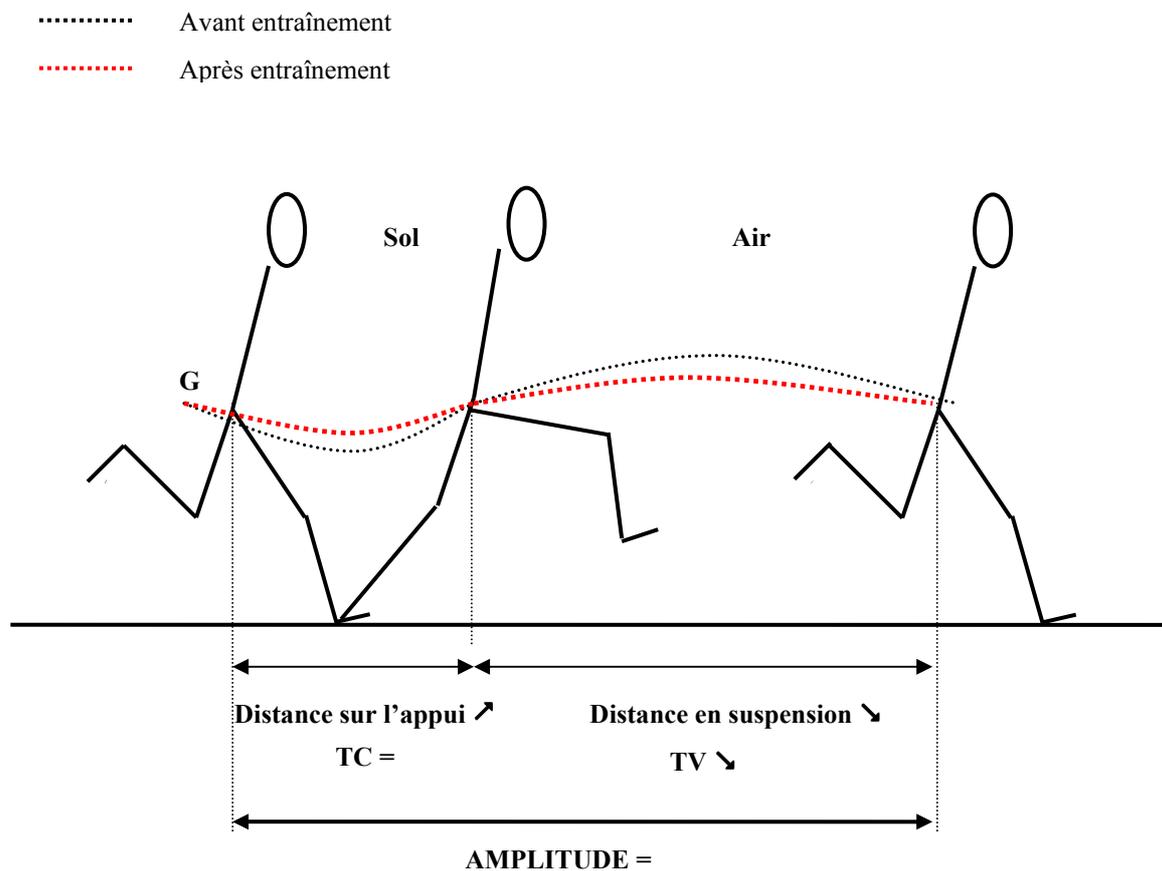
L'influence ou non de l'évolution de la vitesse sur l'évolution des autres paramètres mécaniques permet de rendre compte des effets de l'entraînement sur la structure mécanique de la foulée. En effet, si l'évolution de la vitesse n'est pas corrélée à l'évolution des autres paramètres, il revient à dire que d'autres facteurs, comme l'entraînement par exemple, peuvent être responsables de ces évolutions. L'augmentation de  $V$  est corrélée à l'augmentation de  $F$  et à la baisse de  $AE$ , mais n'est pas corrélée à l'évolution de  $H$ ,  $TV$  et  $DA$ . L'augmentation de  $V$  entre octobre et décembre n'est donc pas seule responsable de l'évolution des paramètres mécaniques sur cette période. En conséquence, la baisse de la hauteur de vol n'étant pas corrélée à l'augmentation de la vitesse, elle pourrait être le signe d'une amélioration de l'économie de course engendrée par l'entraînement.

Les effets de l'entraînement semblent donc s'orienter vers une réorganisation mécanique de la foulée privilégiant une grande distance parcourue sur l'appui ainsi qu'une diminution des oscillations verticales du centre de gravité. Les causes de cette adaptation de la foulée se situent probablement dans la réorganisation des forces de réaction du sol grâce à la modification du comportement de la jambe d'appui et des segments libres (orientation du grand axe du corps, gainage général).

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de corrélation entre l'augmentation de la vitesse entre octobre et décembre et la baisse de  $H$  et  $TV$ . Pourtant, il semblerait que cette diminution soit en partie imputée à la hausse de vitesse. En effet, les calculs de  $H$  et  $AE$  prenant en compte  $V$ , il y a une dépendance directe de ces paramètres par rapport à  $V$ . D'autre part, la littérature retient qu'une augmentation de la vitesse se traduit mécaniquement par une diminution de l'angle d'envol, de la hauteur et du temps de vol (Cavagna G.A, L. Komarek, S.Mazzoleni, 1974 ; Komi et Al, 1983 ; Luhtanen et Komi, 1978). Cette évolution conforte l'idée que de faibles valeurs de  $H$ ,  $AE$  et  $TV$  influencent favorablement la structure mécanique de la foulée,

conduisant en particulier à un gain de distance sur l'appui. L'augmentation de la vitesse observée au cours des tests pourrait donc expliquer une partie des modifications mécaniques de la foulée des athlètes. Les séances étant réalisées aux vitesses cibles de compétition, l'objectif n'était pas d'atteindre une vitesse maximale. Il paraîtrait donc selon toute vraisemblance que cette augmentation de la vitesse se fasse de façon involontaire. L'amélioration des moyens physiques des athlètes expliquerait alors ce gain de performance sur ces séances à allure cible.

Malgré l'évolution de la vitesse au cours du temps, TC n'a pas évolué. Le temps de contact du pied au sol ne semble donc pas constituer un facteur déterminant de l'augmentation de V à ces allures. Par contre, il semblerait que l'augmentation de V dans cette partie de course se fasse prioritairement par une hausse de la fréquence et non par une augmentation de l'amplitude.



*Figure 22 : Effets de l'entraînement sur les paramètres mécaniques de la foulée*

La figure 22 schématise les résultats obtenus précédemment. On observe que sur la période des tests, l'amplitude de pas est restée stable, mais que la distance parcourue sur l'appui a augmenté. Comme  $A = DA + DS$ , on en déduit la diminution de la distance en suspension, ce qui explique la réduction du temps de vol, et par conséquent, de l'angle d'envol et de la hauteur de vol. Ces modifications se traduisent mécaniquement par une diminution des oscillations verticales du centre de gravité. En effet, le temps de contact n'ayant pas subi de modifications, l'augmentation de la distance sur l'appui peut s'expliquer par une diminution de la distance parcourue par le centre de masse durant la phase de vol. De plus, l'abaissement de l'angle d'envol vient appuyer cette hypothèse. Par ailleurs, l'augmentation de la fréquence de pas entre octobre et décembre permet d'expliquer le gain de vitesse, puisque l'amplitude de pas reste inchangée sur cette période. Il semblerait donc que la réorganisation de la foulée observée avec l'entraînement s'opère en faveur d'une augmentation de la distance parcourue sur l'appui.

Cette recherche n'ayant pas de comparaisons possibles avec un groupe témoin, les résultats obtenus doivent être modérés. Une étude comparative entre deux groupes d'experts et de sédentaires ou entre plusieurs groupes bénéficiant de méthodes et de charges d'entraînement différentes doivent être envisagées pour confirmer les présents résultats.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ASTRAND P.O., RODAHL K. (1994) – Précis de physiologie de l'exercice musculaire. Ed Masson.
- BATES B., HAVEN B. (1974) – *Effects of fatigue on the mechanical characteristics of highly skilled female runners*. In *International Series on Sport Sciences*, R. C. Nelson & C. A. Morehouse (eds.). The Pennsylvania State University. 1, 121-12.
- BILLAT V., KORALZTEIN J.P. (1996) – *Significance of the velocity at VO<sub>2</sub> max and time to exhaustion at this velocity*. *Sports Med.* 22, 90-108.
- BRANDSFORD D. R., HOWLEY E.T. (1977) – *Oxygen cost of running in trained and untrained men and women*, *Med. Sci. Sports Exercise* 9(1):41-44.
- CAVAGNA G.A, KOMAREK L., MAZZOLENI S. (1971) – *The mechanics of sprint running*, *J. Physiol.* 217: 709-721.
- CAVAGNA, G. A., THYS, H., ZAMBONI, A. (1976) – *The sources of external work in level walking and running*. *J. Physiol.* 262, 639-57.
- CAVANAGH, G. A., KANEKO M. (1977) – *Mechanical work and efficiency in level walking and running*. *J.Physiol.* 268, 647-81.
- CAVANAGH P. R., POLLOCK M. I., LANDA J. (1977) – *A biomechanical comparison of elite and good distance runners*. In *The marathon : physiological, medical, epidemiological, and psychological studies*, P. Milvy, ed. New York: New York Acad. Sci. pp. 328-345.
- CAVANAGH P. R., WILLIAMS K. R. (1982) – *The effects of stride length variation on oxygen uptake during distance running*. *Med. Sci. Sports Exercise* 14(1):30-35.
- CHAPMAN A. E. (1982) – *Hierarchy of changes induced by fatigue in sprinting*. *Can J. Appl. Spt. Sci.* 7:(2) 116-122.
- CONLEY D. L., KRAHENBUHL K. R., BURKETT L.N. (1981) – *Training for aerobic capacity and running economy; Physician Sports Med.* 9(4):107-115.
- DAVIES C. T. M. (1980) – *Effects of wind resistance and resistance on the forward motion of a runner*. *Journal Appl. Physiol. : respiratory, environmental, and exercise physiology* 48(4): 702-709, 1980.
- DILLMAN C. J. (1970) - *A kinetic analysis of the recovery leg during sprint running*. In *Selected topics on biomechanics. Proceedings of CIC symposium on biomechanics*, Cooper J. M., ed Chicago: Athletic institute, 1970, pp 137-165.
- DI PRAMPERO P. E., DAVIES C. T., CERRETELLI P., MARGARIA R. (1970) – *An analysis of O<sub>2</sub> debt contracted in submaximal exercise*, *J Appl Physiol.* 29(5):547-51.
- ELLIOTT B., BLANKSBY B. (1976) – *A cinematographic analysis of overground and treadmill running by males and females*. *Med. Sci. Sports.* 8, 84-87.
- ENOKA R. M., STUART D. G. (1992) - *Neurobiology of muscle fatigue*, *J. Appl. Physiol.* 72(5):1631-48.
- GAJER B., DUREY A., HANON C., THEPAUT-MATHIEU C. (1996) – *Stride evolution in an 800-m race*. *Int pre olympic scientific congress, Dallas, TX, USA* 124 10.
- GAJER B. (2002) - *Analyse descriptive du 400 mètres, Rapport de recherche, Insep*.
- GREGOR R. J., KIRKENDAL (1978) – *Performance efficiency of world class female marathon runners*. In *Biomechanics, VI-B*, Asmussen E, Jorgensen K, eds. Baltimore: University Park Press, pp 40-45.
- GRILLNER S., HALBERTSMA J., NILSSON J., THORSTENSSON A. (1979) – *The adaptations to speed in human locomotion*. *Brain Rev.* 165: 177-182.

- HANON C., VIVIER L. (2005), *Evaluation de la contribution du système aérobie lors d'une épreuve de 1500-m en course à pied, Rapport de recherche, Insep.*
- HEUGAS A.M., BRISSWALTER J., VALLIER J.M. (1997) - *Effect of a three month training period on the maximal oxygen deficiency in high level performance sprinters, Can. J. Appl. Physiol. Apr;22(2):171-81.*
- HIRVONEN J., NUMMELA A., RUSKO H., REHUNEN S., HARKONEN M. (1992) – *Fatigue and change of ATP, Creatine Phosphate, and lactate during the 400-m sprint, Can. J. Spt. Sci. 17:2 141-144.*
- HOGBERG P. (1952) – *How do stride length and stride frequency influence the energy output during running, Arbeitsphysiol. 14:437-441.*
- HORITA T., ISHIKO T. (1987) – *Relationships between muscle lactate accumulation and surface EMG activities during isokinetic contractions in man, European Journ. Appl. Physiol., 56:18-23.*
- KANEKO M., MATSUMOTO M., ITO A., FUCHIMOTO T. (1987) - *Optimum step frequency in constant speed running. In Biomechanics X-B (Edited by Jonsson, B.), Human Kinetics Publishers, Champaign. pp 803-807.*
- LUTHANEN P., KOMI P. V. ((1978) – *Mechanical factors influencing running speed. In Asmussen A., Jorgensen K. (Eds) Biomechanics VI-B, pp. 23-29, University Park Press, Baltimore.*
- MARGARIA, R. (1976) – *Biomechanics and Energetics of Muscular Exercise.* Oxford: Clarendon Press. 146pp.
- MAYHEW J. L. (1977) – *Oxygen cost and energy expenditure of running in trained runners, Br. J. Sports Med. 11(3):116-121, 1977.*
- MC MAHON T. A., GREENE P. R. (1979) – *The influence of track compliance on running, J. Biomech. 12: 893-904.*
- MERO A., LUTHANEN P., KOMI P. V. (1982) – *Zum Einfluss von kontaktphasenmerkmalen auf die schrittfrequenz beim maximal sprint, Leistungssport 12(4):308-313.*
- MERO A., KOMI P. V. (1986) – *Force, EMG, and elasticity velocity relationships at submaximal, maximal and supramaximal running speeds in sprinters, European J. Appl. Physiol., 55:553-561.*
- MERO A., KOMI P. V. (1987) – *Effects of stimulated supramaximal sprinting on force production, neural activation and blood lactate. XI International Congres of Biomechanics, Amsterdam.*
- MERO A., KOMI P. V., GREGOR R. J. (1992) – *Biomechanics of sprint running, a review. Sports Med. 13(6):376-392.*
- NELSON R., DILLMAN C., LAGASSE P., BICKETT P. (1972) – *Biomechanics of overground versus treadmill running. Med. Sci. Sports. 4, 233-240.*
- NELSON R. C., GREGOR R. J. (1976) – *Biomechanics of distance running : a longitudinal study. Res. Q. 47(3):417-428.*
- NELSON R. C., OSTERHOUDT R. G. (1976) – *Effets of altered slope and speed on the biomechanics of running. In Med. Sport, vol 6: biomechanics II. Basel Karger pp. 220-224.*
- NUMMELA A., RUSKO H. (2000) – *Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level, Journ. Sp. Sc. 18, 411-419.*
- NUMMELA A., RUSKO H., MERO A. (1994) – *EMG activities and ground reaction forces during fatigued and nonfatigued sprinting, Med. Sc. Sp. Exerc. 26(5), 605-609.*
- NUMMELA A., VUORIMA T., RUSKO H. (1992) – *Change in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint, Journ. Sp. Sc. 10: 217-228.*
- SLOCUM D. B., BOWERMAN W. (1962) – *The biomechanics of running. JAMA 205(11):97-104.*

SPRAGUE, P., MANN, R. (1983) – The effects of muscular fatigue on the kinetics of sprint running. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 54, 1, 48-60.

THOMAS C., HANON C., PERREY S., LE CHEVALIER J-M., COUTURIER A., VANDEWALLE H. (2005) – *Oxygen uptake response to an 800-m running race. Int. J. Sports. Med.*, 26:268-273.

WHIPP BJ, WASSERMAN K. (1972) – *Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. J Appl Physiol ; 5 : 351-356*

WHIPP BJ, WARD SA, LAMARRA N, DAVIS JA, WASSERMAN K (1982) – *Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. J Appl Physiol* 52, 1506–1513

Cinquième partie :

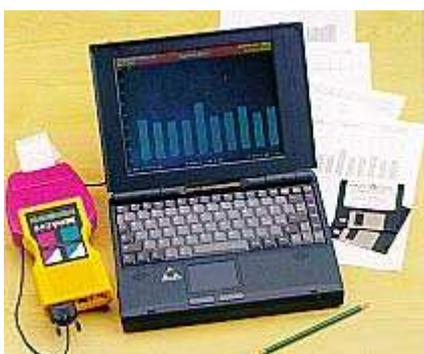
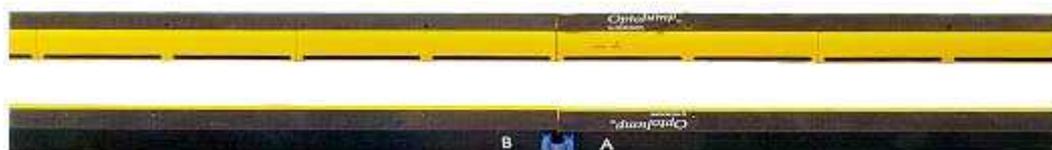
## **ANNEXES**

## ANNEXE 1

### L'OPTOJUMP



L'OPTOJUMP est un système de mesure optique qui permet d'apprécier (au 1000ème) les temps de contact au sol et de vol d'une série de sauts ou de pas effectués par un athlète. Il se compose de deux barres (dimension 100 x 4 x 3 cm), l'une contenant l'électronique de contrôle et les récepteurs, l'autre le système émetteur. Connectées bout à bout, nous avons bénéficié d'une plateforme d'analyse d'une longueur de 20 mètres.

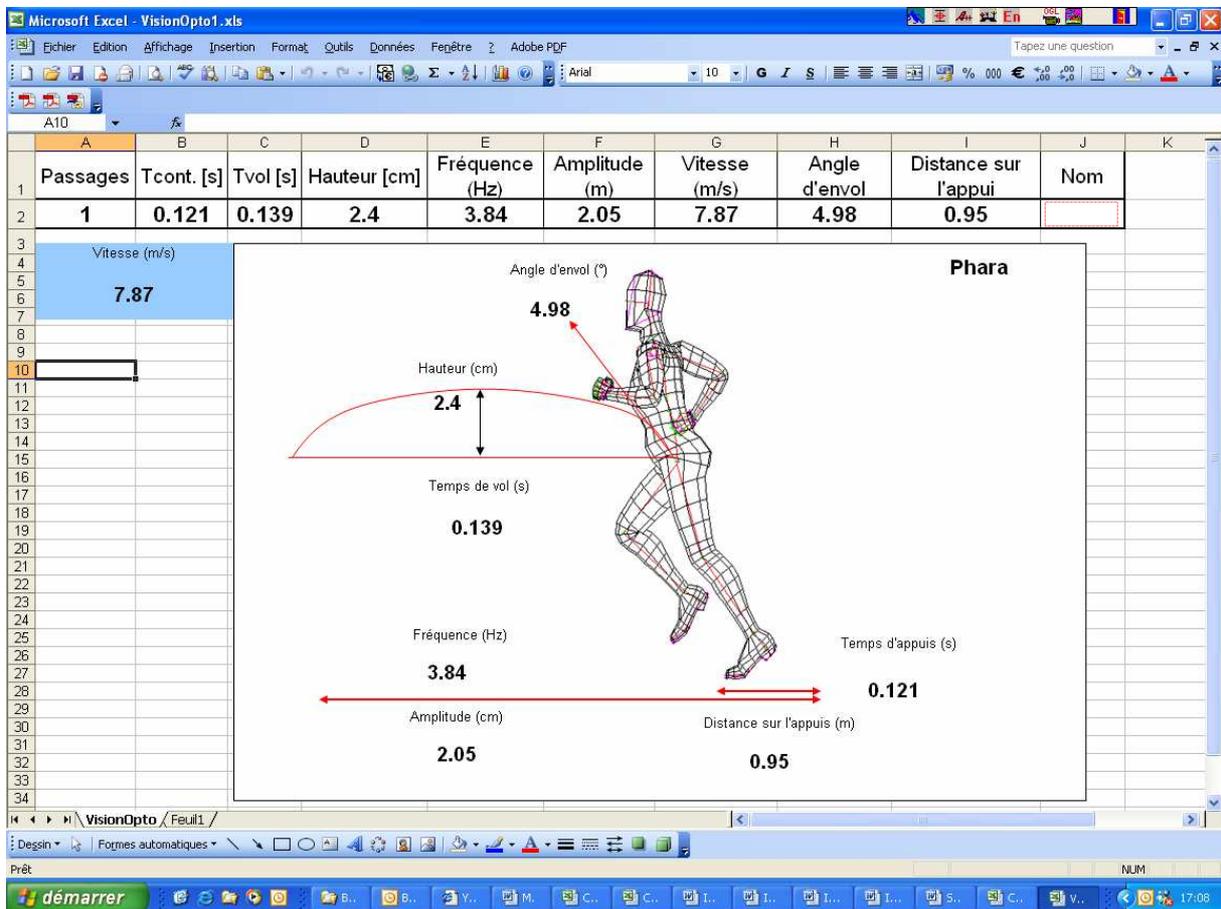


Au moyen du logiciel, OPTOJUMP permet le relèvement des données relatives au temps de contact, temps de vol et hauteur de vol, fréquence et amplitude de pas, vitesse.

L'OPTOJUMP est utilisé en connexion avec le chronomètre RACETIME 2.

## ANNEXE 2

### PROJECTION DES PARAMETRES MECANIQUES D'UNE ATHLETE APRES SA COURSE



## ANNEXE 3

### RESUME POUR LES « JOURNEES INTERNATIONALES DU SPORT » 2007

Cette étude a été soumise et retenue pour une présentation poster à l'occasion des prochaines journées internationales du sport qui auront lieu en novembre 2007 à l'Institut National de Sport et de l'Education Physique.

---

Damien Riviere<sup>1</sup> ; Jean Slawinski<sup>1</sup> ; Bruno Gajer<sup>2</sup> ; Jacques Quievre<sup>1</sup>  
[rivieredamien@yahoo.fr](mailto:rivieredamien@yahoo.fr)

<sup>1</sup>*Laboratoire de Biomécanique et de Physiologie de l'INSEP – Département des Sciences du Sport – 11 avenue du Tremblay, 75012 PARIS*

<sup>2</sup>*Fédération Française d'Athlétisme, 33 avenue Pierre de Coubertin 75640 PARIS Cedex 13*

#### **EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT SUR LES PARAMETRES MECANIQUES DE LA FOULEE CHEZ DES COUREUSES DE 400 METRES EXPERTES**

##### **Résumé :**

L'objectif de ce travail était de mesurer les effets de l'entraînement sur les paramètres mécaniques de la foulée. Cinq coureuses du pôle INSEP ont réalisé 3 fois, à 4 semaines d'intervalle, une séance de 9 x 60 mètres à la vitesse spécifique d'un 400 mètres de compétition. Les paramètres mécaniques de la foulée ont été mesurés à l'aide d'un optojump. Les résultats montrent que l'entraînement en sprint se traduit par une réorganisation structurelle de la foulée. Le gain de la distance parcourue sur l'appui et la baisse du temps de vol associés à une stabilisation de l'amplitude de pas engendrent une diminution des oscillations verticales du coureur. Cette diminution pourrait être liée à une amélioration de l'économie de course aux vitesses spécifiques de compétition. Enfin, le recours à une fréquence de pas plus élevée explique l'augmentation de la vitesse à ces allures.

Mots clés : sprint, biomécanique, entraînement, foulée.

Présentation poster

## EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT SUR LES PARAMETRES MECANIQUES DE LA FOULEE CHEZ DES COUREUSES DE 400 METRES EXPERTES

*Damien Riviere<sup>1</sup> ; Jean Slawinski<sup>1</sup> ; Bruno Gajer<sup>2</sup> ; Jacques Quievre<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Laboratoire de Biomécanique et de Physiologie de l'INSEP – Département des Sciences du Sport – 11 avenue du Tremblay, 75012 PARIS

<sup>2</sup>Fédération Française d'Athlétisme, 33 avenue Pierre de Coubertin 75640 PARIS Cedex 13

### Introduction

Plusieurs études se sont intéressées à l'analyse mécanique des épreuves de sprint long (Mero et al. 1992). La majorité de ces travaux décrivent l'évolution des paramètres mécaniques de la foulée avec l'apparition de la fatigue. Ainsi, lors d'une course de 400-m, la fatigue entraîne une baisse de la vitesse associée à une baisse de la fréquence (F), de l'amplitude de pas (A), et à une augmentation du temps de contact (TC) et de l'EMG intégré (Nummela et al. 1994). De plus il semble que ces effets soient indépendants du niveau d'expertise (Gajer 2002). Récemment, Zfeiridis et al. (2005) ont montré que l'entraînement avec chariot lesté augmentait le gain de vitesse dans la phase d'accélération en sprint. Cette amélioration est principalement expliquée par une augmentation de la fréquence de pas. Cependant, à notre connaissance, très peu d'études se sont attachées à rendre compte de l'influence de l'entraînement sur les facteurs mécaniques de performance en sprint long. L'objectif de cette étude est donc de mesurer les effets d'un entraînement de sprint long sur les différents paramètres mécaniques de la foulée chez des athlètes féminines, spécialistes du 400-m. Cette analyse biomécanique des effets de l'entraînement répond à une demande du terrain et se place dans le cadre de l'aide à la performance.

### Méthode

Les coureuses de 400-m du pôle INSEP (n = 5 ; âge : 23,8 ± 3,6 ans ; performance sur 400-m : 54,27 ± 1,64 s) ont participé à ce suivi longitudinal, effectué entre les mois d'octobre et décembre 2005. Une séance de vitesse type (9 x 60-m) à l'allure cible des 200 premiers mètres du 400-m (8,36 ± 0,3 m/s) a été répétée trois fois à quatre semaines d'intervalle. A chaque course le temps de contact (TC), le temps de vol (TV) et l'amplitude de pas (A) ont été mesurés à l'aide d'un optojump (Microgate, Bolzano, Italie) sur une portion de 20 mètres. Les temps sur 60-m ont été chronométrés à l'aide de cellules photoélectriques (Microgate, Bolzano, Italie). Ces données ont servi de base pour le calcul d'autres paramètres mécaniques : la hauteur de vol (H), la fréquence de pas (F), l'angle d'envol (AE) et la distance parcourue sur l'appui (DA).

$$H = \frac{1}{8} g TV^2 \quad F = \frac{1}{TC + TV} \quad \cos AE = \frac{V_h}{\sqrt{2gH + V_h^2}} \quad DA = A - \frac{(2gH + V_h^2) \sin 2AE}{g}$$

Pour mesurer les effets de l'entraînement, un test de Fridman a été utilisé pour comparer les différents paramètres mesurés. Les relations entre les différents paramètres mécaniques ont été déterminées à l'aide d'un test de Spearman.

### Résultats

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1, et laissent apparaître les évolutions suivantes :

**Tableau 1 :** Evolution des paramètres mécaniques entre octobre et décembre (temps de contact : TC ; temps de vol : TV ; hauteur de vol : H ; fréquence de pas : F ; amplitude de pas : A ; vitesse : V ; angle d'envol : AE ; distance parcourue sur l'appui : DA).

	Octobre	Novembre	Décembre	Evolution
TC ± ET (s)	0,121 ± 0,008	0,122 ± 0,006	0,122 ± 0,006	=
TV ± ET (s)	0,148 ± 0,007	0,144 ± 0,007	0,140 ± 0,004	↘
H ± ET (cm)	2,7 ± 0,2	2,5 ± 0,3	2,4 ± 0,1	↘
F ± ET (Hz)	3,71 ± 0,13	3,77 ± 0,11	3,83 ± 0,10	↗
A ± ET (cm)	216 ± 12,6	218 ± 9,1	218 ± 7,0	=
V ± ET (m/s)	8,1 ± 0,5	8,2 ± 0,3	8,3 ± 0,2	↗
AE ± ET (deg)	5,1 ± 0,4	4,9 ± 0,3	4,7 ± 0,2	↘
DA ± ET (cm)	0,96 ± 0,01	1,00 ± 0,05	1,01 ± 0,04	↗

↘ : évolution significative entre octobre et décembre

### Discussion

Les résultats mettent en évidence une augmentation de la vitesse entre les mois d'octobre et décembre, malgré la consigne visant à respecter la vitesse cible de compétition. Cette augmentation est principalement associée à une augmentation de F. Cette hausse de F est attribuée à une diminution de TV puisque TC reste constant. Ces modifications mécaniques aboutissent à une augmentation de DA et à une diminution des oscillations verticales du centre de gravité. Cette diminution pourrait être caractéristique d'une plus grande économie de course en sprint (Mero et al. 1992). D'autre part, l'augmentation de V est corrélée à l'augmentation de F ( $r = 0,553$  ;  $p = 0,103$ ) et à la baisse de AE ( $r = - 0,787$  ;  $p < 0,0001$ ), mais n'est pas corrélée à l'évolution de H, TV et DA. L'augmentation de V entre octobre et décembre n'est donc pas seule responsable de l'évolution des paramètres mécaniques sur cette période. Les effets de l'entraînement semblent donc s'orienter vers une réorganisation mécanique de la foulée privilégiant une grande distance parcourue sur l'appui ainsi qu'une diminution des oscillations verticales du centre de gravité. Les causes de cette adaptation de la foulée se situent probablement dans la réorganisation des forces de réaction du sol grâce à la modification du comportement de la jambe d'appui et des segments libres (orientation du grand axe du corps, gainage général). Cependant, cette étude ne comportant pas de groupe contrôle, d'autres travaux doivent être menés pour confirmer les présents résultats.

### Références

1. Gajer (B) – Analyse descriptive du 400 mètres, recherche INSEP, 2002
2. Mero (A), Komi (P.V), et Gregor (R.J) – Biomechanics of Sprint Running. *Sports Medicine*. 13:376-392, 1992
3. Nummela (A), Rusko (H) et Mero (A) – EMG activities and ground reaction forces during fatigued et nonfatigued sprinting. *Med. Sci. Sports Exerc.*, Vol. 26, No. 5, pp. 605-609, 1994.
4. Zfeiridis (A), Saraslanidis (V), Manou (P), Ioakimidis (K), Dipla (K), Kellis (S) – The effects of resisted sled-pulling sprint training on acceleration and maximum speed performance. *J. Sport. Med. Phys. Fit.*, 2005.