



HAL
open science

IDENTIFICATION ET DEVELOPPEMENT DE LA FORCE SPECIFIQUE DU COUREUR DE DEMI-FOND

Jean Slawinski, Jacques Quièvre, Jean-Michel Lévêque, Richard Heubert,
Bruno Gajer

► **To cite this version:**

Jean Slawinski, Jacques Quièvre, Jean-Michel Lévêque, Richard Heubert, Bruno Gajer. IDENTIFICATION ET DEVELOPPEMENT DE LA FORCE SPECIFIQUE DU COUREUR DE DEMI-FOND. [Rapport de recherche] Rapport du Projet de Recherche n°03-051, Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2006. hal-01936312

HAL Id: hal-01936312

<https://insep.hal.science/hal-01936312>

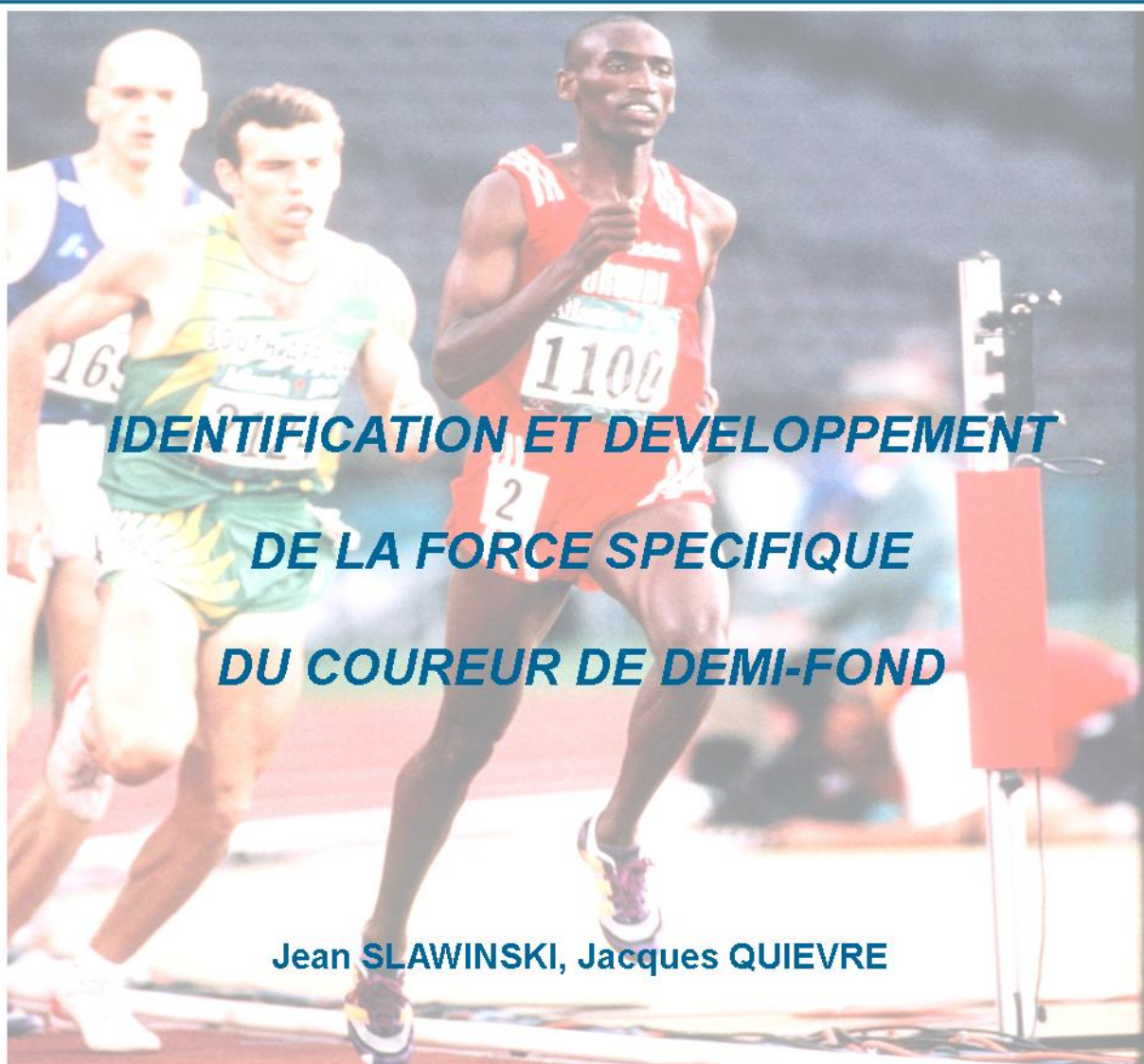
Submitted on 27 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Décembre 2006

Rapport du projet de recherche MJSVA N° 03-051
Département des Sciences du Sport
Laboratoire de Biomécanique et Physiologie



**IDENTIFICATION ET DEVELOPPEMENT
DE LA FORCE SPECIFIQUE
DU COUREUR DE DEMI-FOND**

Jean SLAWINSKI, Jacques QUIEVRE

Collaborateurs scientifiques : J.M. Levêque, R. Heubert

Collaborateur fédéral: B. Gajer*

**Travail Effectué par
Laboratoire de Biomécanique et Physiologie—INSEP**

**En collaboration avec
*la Fédération Française d'Athlétisme**

Téléchargement sur le site : <http://sciences.campus-insep.com>



Institut National du Sport et de l'Éducation Physique
11, avenue du Tremblay - 75012 Paris
01 41 74 41 00 - www.insep.fr





DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT
Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

Dossier Scientifique présenté par
Jean SLAWINSKI et Jacques QUIEVRE,

**IDENTIFICATION ET DEVELOPPEMENT
DE LA FORCE SPECIFIQUE DU COUREUR DE DEMI-FOND**

Collaborateurs scientifiques : Jean-Michel LEVEQUE et Richard HEUBERT

Collaborateurs fédéraux : B. GAJER

Publications scientifiques liées au projet :

1. Slawinski et al. (2005). *9th International Scientific Congress Olympic Sport and Sport for All. 20-23 septembre, Kiev.*
2. Heubert et al. (2003). X^{ème} Congrès international de l'association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives (ACAPS), Octobre 2003, Toulouse.
3. Slawinski et al. (2003). XXVIII^{ème} Congrès de la Société Française de Biomécanique, septembre 2003, Poitiers. *Arch. Physiol. Biochem.* 2003; 111 suppl: 50.

Travail effectué par
Laboratoire de Biomécanique et Physiologie - INSEP
En collaboration avec
Fédération Française d'Athlétisme

1) Introduction

A) Analyse de la performance

L'analyse des exigences bioénergétiques de la performance de demi-fond (des épreuves d'une durée supérieure à trois minutes) permet de définir les facteurs physiologiques déterminant de la performance. Ainsi, di Prampero (1986) propose un modèle d'analyse où la performance de demi-fond dépend de trois paramètres :

- du volume d'oxygène maximal pouvant être consommé par minute et par kilogramme de masse corporelle ($\dot{V}O_{2max}$ exprimé en $ml.kg^{-1}.min^{-1}$). Ce $\dot{V}O_{2max}$ représente le débit maximal ou la puissance maximale du métabolisme aérobie.

- de la fraction du $\dot{V}O_{2max}$ qui peut être soutenue pendant toute la durée de l'effort (F). F représente la capacité à mobiliser un important pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ sur une épreuve donnée. Par exemple, Costill (1981) rapporte qu'un coureur de marathon possédant « seulement » un $\dot{V}O_{2max}$ de $69,7 ml.kg^{-1}.min^{-1}$ mais capable d'en utiliser 86% sur les 42,195 km, pouvait rivaliser avec les meilleures performances en marathon, 2h08min 30s ($19,7 km.h^{-1}$) réalisées en 1967. A l'heure actuelle, pour égaler le record du monde (2h06min 50s, soit une vitesse de $19,96 km.h^{-1}$ maintenue durant les 42,195 km), ce même coureur devrait mobiliser 87% de son $\dot{V}O_{2max}$.

- du coût énergétique (C), c'est-à-dire la quantité d'oxygène consommée par unité de distance parcourue ($mlO_2.kg^{-1}.m^{-1}$). Plus la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) est faible lors de l'épreuve, plus le coureur est économique et plus son coût énergétique est bas.

Ainsi, la combinaison de ces trois paramètres permet de prédire la vitesse moyenne lors d'une course de demi-fond (v_{END}) :

$$v_{END} = \frac{F \cdot \dot{V}O_{2max}}{C}$$

Un simple calcul montre qu'un marathonien possédant un $\dot{V}O_{2max}$ de $78ml.kg^{-1}.min^{-1}$, un seuil d'accumulation lactique à 90% de $\dot{V}O_{2max}$ et un coût énergétique très bas de $180 ml.min^{-1}.km^{-1}$, serait capable de couvrir les 42,195 km à $21.06 km.h^{-1}$, c'est à dire en 2h. L'amélioration de ces différents facteurs aérobie est principalement réalisée à l'aide d'un entraînement en

endurance, celui-ci pouvant prendre la forme d'un entraînement de type intermittent (Billat 2001).

Récemment, différents auteurs ont montré que les capacités anaérobies étaient susceptibles de jouer un rôle important dans la performance de longue distance (Jung 2003). Billat et al. (2001) montrent que lors des trois derniers records du monde de 1500, 5000 et 10000 mètres, la vitesse de course n'est pas stable et varie entre 1 et 5%. Cette étude montre également que lorsque les coureurs gèrent eux-mêmes leur allure de course sur une distance donnée, ils accélèrent tous durant la deuxième partie de l'épreuve et plus particulièrement durant le dernier tour. Dans les compétitions de longue distance, comme le 10 km, l'accélération de la course en fin d'épreuve est habituelle (Foster 1994). Pour les courses plus courtes (800m), Gajer et al. (2000), Thomas et al. (2004) précisent que cette accélération se situe en début de course et non à la fin.

Aujourd'hui, il semble que pour gagner une course (du 1500 au 10000 mètres), les coureurs doivent être capables d'accélérer lors du dernier tour. L'étude des vitesses de course du 1500 au 10000 mètres lors des championnats du monde de Paris en 2003 montre que deux phases peuvent être détectées dans ces courses (Gajer 2003, figure 1, et 3) :

- Une phase où le coureur doit être capable de maintenir une vitesse moyenne de course élevée (22-25 km.h⁻¹), sans faire appel, de manière trop importante, à ses capacités anaérobies. Il doit donc posséder une vitesse maximale aérobie très élevée.
- Une phase où le coureur doit accélérer pour débiter et/ou finir la course.

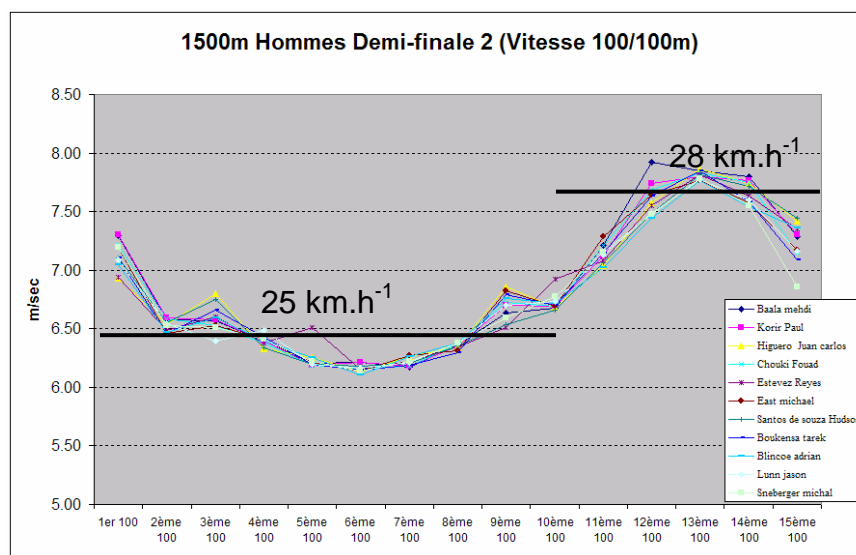


Figure 1: Exemple d'évolution de la vitesse de course sur 1500 m lors des championnats du monde de Paris en 2003.

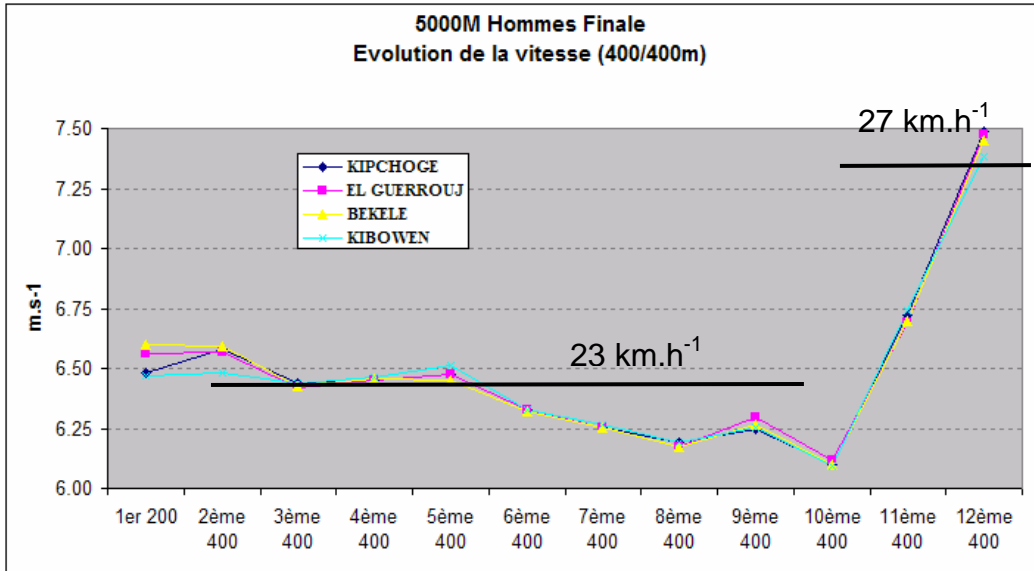


Figure 2: Exemple d'évolution de la vitesse de course sur 5000 m lors des championnats du monde de Paris en 2003.

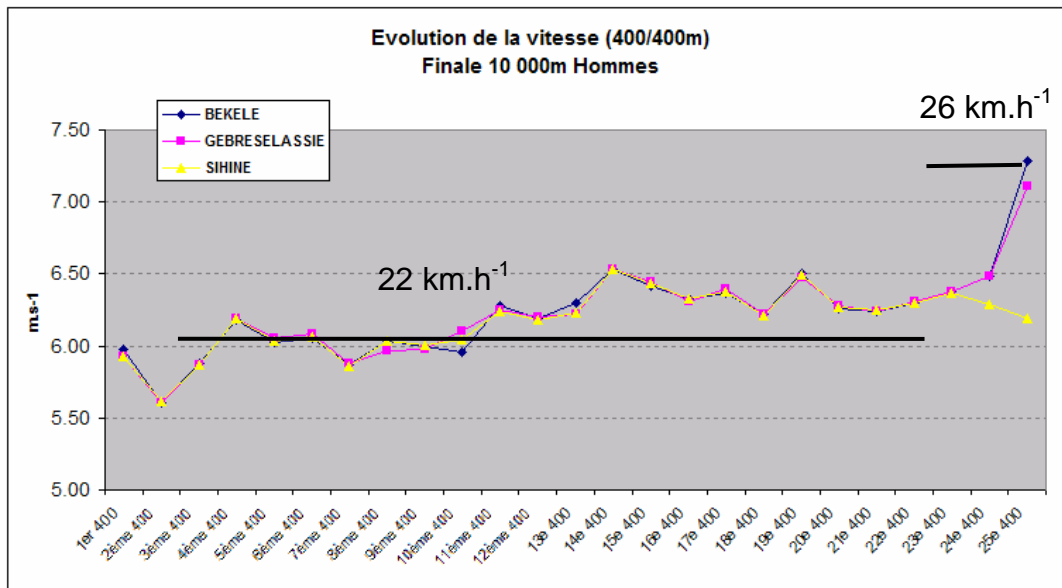


Figure 3: Exemple d'évolution de la vitesse de course sur 10000 m lors des championnats du monde de Paris en 2003.

B) Effet d'un entraînement combiné en force et en endurance

Durant les phases d'accélération, les coureurs doivent donc posséder de très bonnes capacités musculaires. Suite à ce constat, de nombreux entraîneurs et chercheurs ont fait l'hypothèse qu'un entraînement en force pourrait être très bénéfique au coureur de demi-fond.

Les effets d'un entraînement combiné en force et en endurance sur la performance d'athlètes non-entraînés (Hickson et al. 1988 ; Kraemer et al. 1995 ; Marcinik et al. 1991 ; McCarty et al. 1995 ; Sale et al. 1990) ou entraînés (Hoff et al. 1999 ; Johnston et al. 1997 ; Paavolaïnen et al. 1991 ; 1999) ont déjà fait l'objet de nombreuses études. Généralement, ces études montrent qu'un entraînement en force associé à un entraînement en endurance n'altère pas le développement de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) (Hickson 1980 ; Hickson et al. 1988 ; Marcinik et al. 1991 ; Hoff et al. 2002, Millet et al. 2002, Chtara et al. 2005). Ce mode d'entraînement améliore la performance de sujets non entraînés (Hickson 1980 ; Hickson et al. 1988 ; Marcinik et al. 1991 ; McCarty et al. 1995) ou entraînés (Paavolaïnen et al. 1999, Millet et al. 2002, Chtara et al. 2005). L'amélioration de la performance suite à un entraînement de type force est liée à une amélioration de l'utilisation de l'énergie élastique dans le cycle étirement-détente (Paavolaïnen et al. 1999, Millet et al. 2002). Cette amélioration serait associée à une augmentation de la raideur musculaire de la jambe de propulsion ce qui pourrait expliquer la diminution de EC (Dalleau et coll. 1998). Cette amélioration de EC (8%) expliquerait l'amélioration de la performance sur 5000 m (3%) comme l'a suggéré di Prampero (1993). Les résultats obtenus par ces différents auteurs montrent également que les caractéristiques neuromusculaires jouent un rôle important dans la performance d'endurance (Dudley et Rusdan 1985; Marcinik et al. 1991; Bishop et al. 1999; Leveritt et al. 1999). En effet, Arabi et al. (1997) ainsi que Paasuke et al. (2001) montrent que les coureurs de longue distance les plus rapides possèdent les muscles les plus puissants.

C) Spécificité des programmes de renforcement musculaire

L'ajout d'un entraînement de force à l'intérieur d'une programmation d'un entraînement classique en endurance apporte donc un bénéfice certain au coureur de demi-fond sur le plan de ses capacités aérobies et anaérobies. Cependant, dans les différentes études précédemment évoquées, les programmes d'entraînement de la force musculaire sont très différents. Par exemple, Paavolaïnen et al. (1999), s'appuient sur le renforcement de la force explosive (sprints, rebond, pliométrie,...), Millet et al. (2002) ou Hoff et al. (1999, 2002) sur le développement de la force maximale (série à > 85% de 1RM) et Chatara et al. (2005) sur le travail de l'endurance de force.

La multitude de méthodes de renforcement musculaire utilisées dans les différentes études, ainsi que le manque d'information au sujet de ces mêmes méthodes employées pour améliorer la performance en demi-fond, rendent difficile l'élaboration d'un programme de renforcement

musculaire adapté aux coureurs de demi-fond. En d'autres termes, il est aujourd'hui bien établi que le développement des qualités musculaires du coureur de demi-fond, par l'intermédiaire d'un renforcement musculaire, est incontournable pour accéder à la haute performance. Cependant, de nombreuses modalités de développement de ces qualités musculaires existent et aucune ne semble adaptée aux spécificités du coureur de demi-fond.

L'objectif général de ce travail est de mettre au point un programme de musculation adapté aux exigences de la course de demi-fond. Pour atteindre cet objectif, quatre étapes sont nécessaires :

1-Premièrement, mesurer les effets de la vitesse de course sur les forces développées en course et leurs relations avec la force des extenseurs des membres inférieurs (de la jambe et de la hanche) développée sur les appareils de musculation.

2-Deuxièmement, mesurer les niveaux d'activations musculaires en course à différentes vitesses et comparer ces niveaux d'activation à ceux obtenus lors d'exercices de renforcement des extenseurs des membres inférieurs.

3-Troisièmement, mesurer les effets de la fatigue induite par un 2000 mètres sur les forces développées en course.

Ces trois étapes nous permettront de mieux comprendre les exigences en termes de force développée aux allures de courses de demi-fond et leurs liens avec les forces développées lors des exercices de renforcement des muscles extenseurs des hanches et des genoux. Ainsi, nous pourrons élaborer un renforcement musculaire adapté aux exigences de la course de demi-fond.

4-Quatrièmement, mesurer les effets d'un entraînement combiné en force et en endurance sur les capacités du coureur à accélérer en état de fatigue.

Cette étape nous permettra de tester le programme de renforcement musculaire mis au point précédemment.

2)

Etude 1 : Mesure des forces appliquées en course et leurs relations avec la force des extenseurs des membres inférieurs mesurée sur ergomètres

A) Matériel et Méthode

1-Protocole

Des coureurs spécialistes de 10000 mètres furent volontaires pour participer à cette étude. (n = 10). La taille, le poids et la performance sur 10000 mètres de cette population sont respectivement de $1,75 \pm 4,67$ m, de $64,7 \pm 3,8$ kg et de $32\text{min } 39\text{s} \pm 2\text{min } 6\text{s}$.

Les coureurs ont exécuté 1) un test d'intensité progressive, visant à déterminer VMA et la consommation maximale d'oxygène; 2) un test unipodal de force maximale isométrique sur la presse oblique (45° ; UMVIF-OP) et sur la hip machine (UMVIF-HM); 3) un test unipodal de charge-vitesse sur la presse oblique et sur la hip machine 4) des 60 m courus à quatre vitesses différentes ($4,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $5,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et à leur vitesse maximale).

2-Test de VMA

Ce premier exercice d'intensité progressive, par palier continu de trois minutes, permet de déterminer la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$), la vitesse de course associée à cette consommation ($v\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$) et la vitesse au seuil lactique (vSL). Lors de cet exercice, les échanges gazeux sont mesurés en continu à l'aide de l'analyseur portable des gaz expirés à chaque cycle respiratoire précédemment décrit (K4b²; Duffield R. et all. 2004). La vitesse de course est imposée par l'intermédiaire d'un signal sonore émis tous les 20 mètres. Dès que le coureur ne peut plus maintenir la vitesse imposée, il est arrêté.

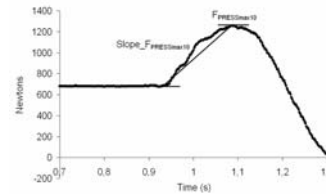
3-Tests de force isométrique et de charge-vitesse

3.1- Les ergomètres :

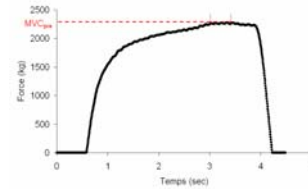
Les ergomètres utilisés sont la presse oblique et la hip machine.

La presse oblique permet la mesure des forces appliquées sur le plateau par extension des membres inférieurs en position assise inclinée avec appui manuel sur des poignées (photo1) . Le mouvement est de type linéaire, il a été réalisé dans le cadre de cette expérimentation à l'aide d'une seule jambe.

Photo 1 : Presse



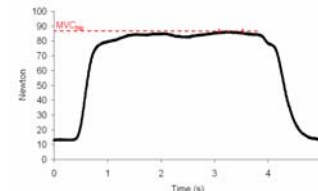
Test de charge-vitesse



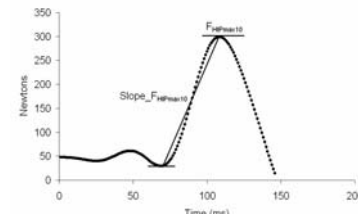
Test de force maximale isométrique

La hip machine permet la mesure de la force des extenseurs de la hanche en position debout (photo 2). Il existe un appui au sol et des appuis manuels, le mouvement est de type angulaire. La réalisation correcte impose de ne pas compenser avec le tronc.

Photo 2 : Hip machine



Test de force maximale isométrique



Test de charge-vitesse

3.2-Force isométrique :

Les test unipodaux de force maximale isométrique sur la presse oblique (UMVIF-OP) et sur la hip machine (UMVIF-HM) étaient précédés d'un échauffement dynamique avec des charges comprises entre 15 et 30% du poids de corps. Durant ces tests, les athlètes ont exercé leur force maximale sur l'ergomètre pendant 5s . Le plateau de la presse, comme le bras de la hip machine étaient bloqués à l'aide d'une gauge de contrainte qui mesurait la force développée par l'athlète. La force maximale isométrique (FMI) était alors définie comme la plus haute valeur de force maintenue pendant 0,5s. Les valeurs sont enregistrées avec une fréquence d'échantillonnage de 200Hz et filtrées à l'aide d'un filtre passe bas de fréquence de coupure 10Hz (Origin). Sur la

presse oblique, l'angle de genou a été standardisé à 135°. Cet angle était choisi car il est spécifique de la course durant la phase d'appui et permet au muscle Quadriceps de développer la plus grande force possible. Sur la hip machine, l'angle de départ entre la jambe de « tracter » et l'axe vertical était de 20°. Cet angle correspond approximativement à la position de la jambe, lorsqu'elle est étendue, juste avant la pose du pied au sol.

3.3-Test de charge-vitesse :

A la presse oblique, les muscles extenseurs de la jambe sont principalement utilisés. Le test consiste à appliquer le plus rapidement possible la plus grande force possible sur le plateau de la presse. Ceci est effectué à différentes charges variant de 53 kg à 103 kg. A la presse, l'accélération du plateau est mesurée à l'aide d'un accéléromètre mono dimensionnel (Myotest Acceltec, Suisse). La force appliquée sur le plateau est calculée en multipliant la masse par l'accélération (m.a) plus la composante du poids de cette masse inscrite sur la direction des rails (m.g.sin45°). La vitesse du plateau est calculée par intégration de l'accélération en fonction du temps. La même procédure est utilisée pour la hip machine. Différents paramètres sont ainsi calculés. Ils sont présentés dans les figures 4 et 5).

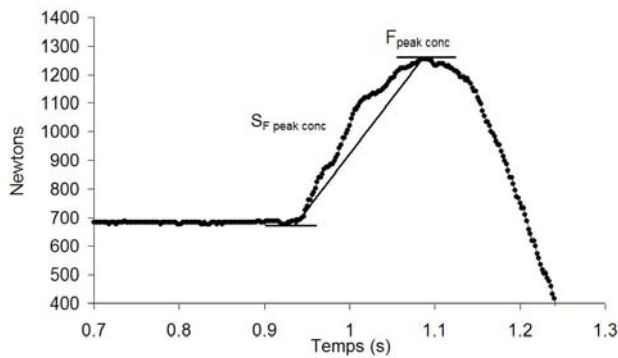


Figure 4 : Paramètres enregistrés lors du test de charge-vitesse à la presse pour une charge donnée : la force maximale mesurée durant la répétition ($F_{peak conc}$), la pente moyenne d'établissement de cette force maximale ($S_{F_{peak conc}}$).

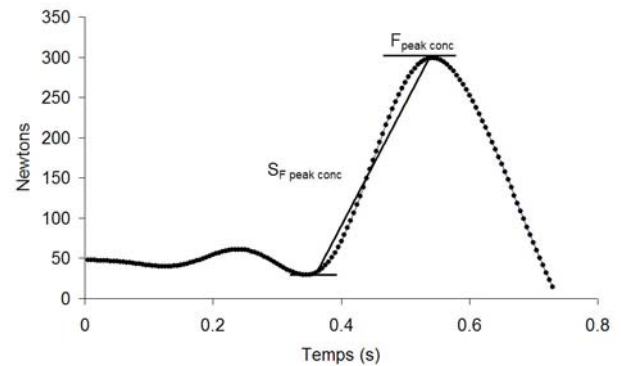


Figure 5 : Paramètres enregistrés lors du test de charge-vitesse à la hip machine pour une charge donnée : la force maximale mesurée durant la répétition ($F_{peak conc}$), la pente moyenne d'établissement de cette force maximale ($S_{F_{peak conc}}$).

$F_{peak conc}$ est exprimée en Newton (N), $S_{F_{peak conc}}$ en $N.s^{-1}$. La force maximale concentrique ($F_{max conc}$) est également calculée. Elle représente la plus grande valeur de $F_{peak conc}$ obtenue durant le test de charge-vitesse.

4-Courses à différentes vitesses

Les coureurs avaient comme consigne de passer sur une plateforme de force (AMTI BP6001200 ; Watertown, USA) à quatre vitesses différentes ($4,15 \text{ m.s}^{-1}$; $5,70 \text{ m.s}^{-1}$; 7 m.s^{-1} et à leur vitesse maximale). Ainsi les composantes verticale et horizontale de la force de réaction du sol sont enregistrées pour une fréquence d'échantillonnage du signal fixée à 500 hz. Ce test est réalisé sur une ligne droite d'une piste couverte d'athlétisme (INSEP, photo 3), balisée tous les 10 m. Ces balises permettent, par l'intermédiaire d'un signal sonore d'indiquer la vitesse de course au coureur. Cette vitesse est contrôlée à l'aide de deux cellules photo-électriques (Brower timing systems, USA, Utah, Salt Lake City) séparés de 10 m et situées de part et d'autre de la plateforme de force. Durant ces dix mètres, les temps de vol et les temps de contact du pied sont également mesurés à l'aide d'un Optojump (Microgate). Pour les vitesses de course inférieures à la vitesse de course maximale (V_{\max}), les coureurs disposaient de 60 mètres pour adopter l'allure de course demandée. A V_{\max} , les coureurs disposaient de 30 mètres depuis la ligne de départ jusqu'à la plateforme de force pour se lancer (Delecluse 1997). Plusieurs essais sont réalisés par chaque coureur à chaque vitesse. Seul l'essai où le coureur pose son pied d'appel sur la plateforme de force, à une allure de course proche de celle choisie, est retenu. Pour une même vitesse, 3 minutes de récupération sont effectuées entre chacun des essais. 10 minutes de récupération sont accordées entre chacune des vitesses. L'ordre de passation des différentes vitesses est aléatoire.



Photo 3 : Test de course à différentes vitesses avec l'optojump et la plateforme de force.

4.1- Les paramètres mécaniques retenus

Temps d'appui (Ta), temps de vol (Tv), amplitude et fréquence de pas (AP et FP).

A chaque vitesse de course, les temps d'appui et de vol (Ta et Tv) ainsi que la fréquence et l'amplitude de pas (FP et AP) moyens sont calculés lors du passage des coureurs dans les 10 mètres d'optojump. Le temps d'appui est également mesuré avec la plateforme de force.

Forces de réaction du sol, pente, impulsion et raideur.

La force de réaction du sol mesurée avec la plateforme de force est décomposée suivant deux résultantes. La résultante verticale (F_z) et la composante horizontale (F_x). Les figures 4 et 5 présentent l'évolution caractéristique de ces deux composantes lors de l'appui du pied au sol. Les paramètres retenus pour répondre à l'objectif de ce travail sont :

- Sur l'axe horizontal, la force maximale de la composante horizontale de la force de réaction du sol ($F_x \text{ max}$) ainsi que la pente (P_x) d'établissement de $F_x \text{ max}$ à partir du point d'inversion de la force (figure 4). Cette force organise la relance du coureur vers l'avant après avoir subi un coup de frein inévitable à la pose du pied au sol.
- Sur l'axe vertical, la force maximale de la composante verticale de la force de réaction du sol ($F_z \text{ max}$). Cette force non seulement s'oppose au poids du coureur mais de plus organise le freinage du mouvement vers le bas du coureur pour l'inverser et donc le réorienter vers le haut. La pente de force (P_z) entre le moment où F_z est maximale et le moment où le pied quitte le sol. Cette pente de décroissance de la force correspond à la séquence de remontée verticale du CG : elle correspond approximativement à la phase d'extension du segment d'appui. Cette pente rend compte de la manière dont le processus de détente s'organise. L'impulsion verticale est également mesurée (figure 5).

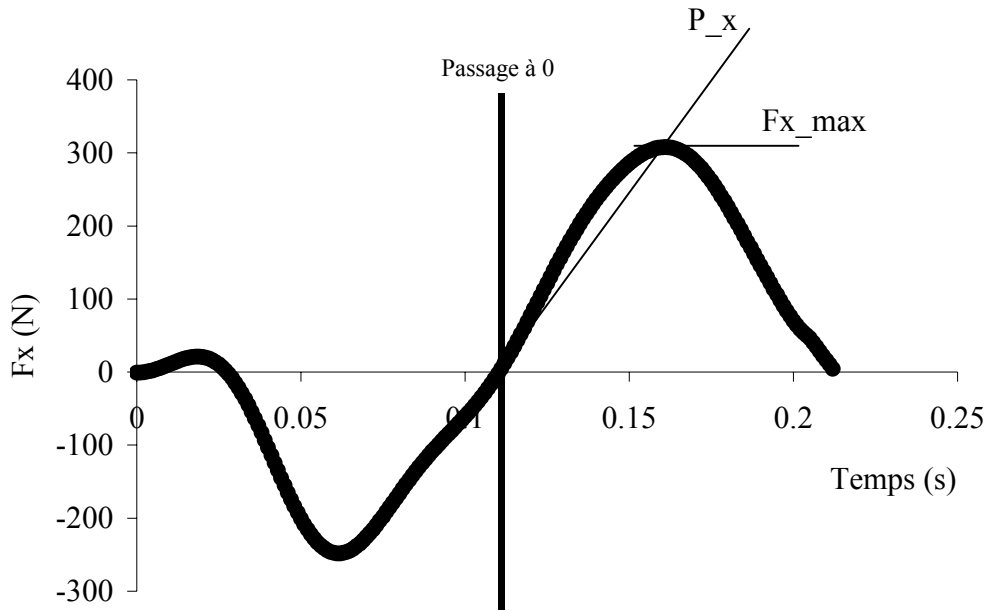


Figure 4 : Evolution de la composante horizontale (F_x) de la force de réaction du sol. Les différents paramètres pris en compte dans cette étude (la force horizontale maximale (F_x max) et la pente d'établissement de F_x max (P_x)) sont également représentés

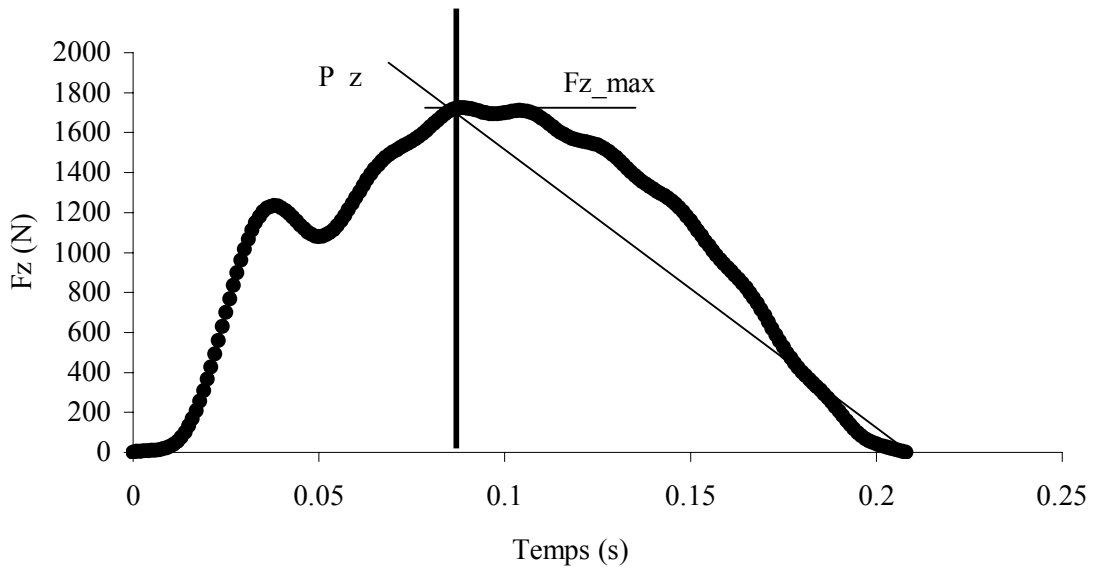


Figure 5 : Evolution de la composante verticale (F_z) de la force de réaction du sol. Les différents paramètres pris en compte dans cette étude (la force verticale maximale (F_z max) et la pente (P_z)) sont également représentés.

La raideur des extrémités inférieures du coureur est calculée en utilisant le modèle « masse-ressort » (Blickhan 1989). Dans ce modèle, la jambe est considérée comme un ressort (figure 6) ce qui permet d'estimer la raideur verticale de la jambe (K_{vert}) :

$$K_{\text{vert}} = \frac{Fz_{\text{max}}}{\Delta z}$$

Δz est la différence de position verticale du centre de masse (CM) entre le moment où le pied touche le sol et le moment où le CM est au plus bas de sa trajectoire. Δz représente la compression du ressort.

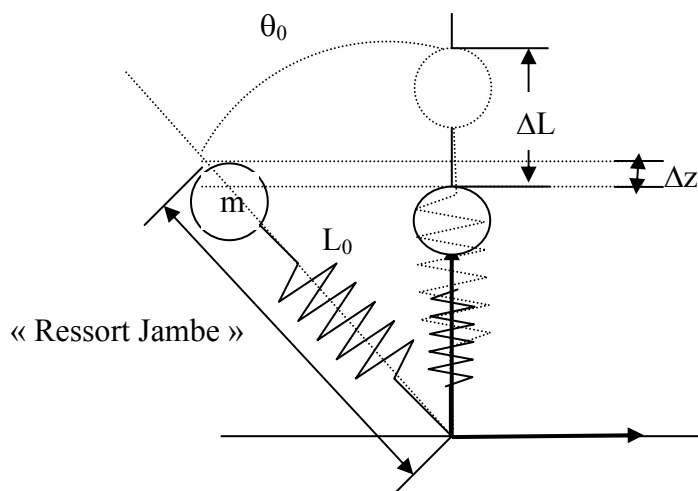


Figure 6 : Modélisation de la jambe considérée comme un ressort.

4-2- Analyse statistique

Les effets de la vitesse sur les paramètres mesurés sont testés à l'aide d'une ANOVA par mesures répétées. Un test post hoc de Fisher permet de déterminer les différences significatives entre les vitesses.

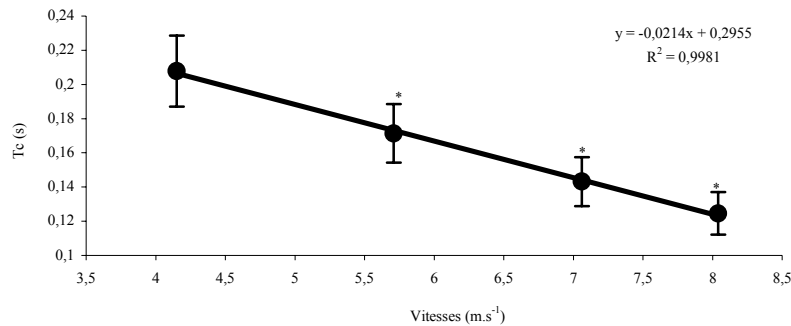
B) Résultats

1-Effet de la vitesse sur les paramètres cinétiques et cinématiques de la foulée.

L'ANOVA par mesures répétées montre que l'augmentation de la vitesse de course possède un effet significatif sur tous les paramètres mesurés.

1.1-Temps de contact du pied au sol (Tc) :

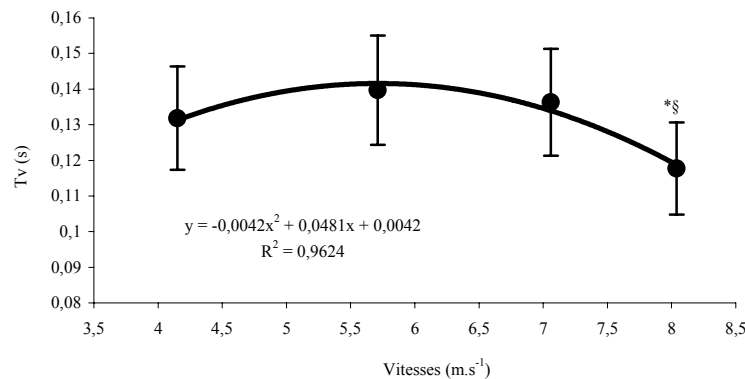
Tc diminue linéairement avec l'augmentation de la vitesse de course (figure 7).



*Figure 7 : Effet de la vitesse sur les temps d'appui du pied au sol (Tc : *significativement différent de la valeur précédente ; $p < 0.001$).*

1.2-Temps de vol du pied (Tv) :

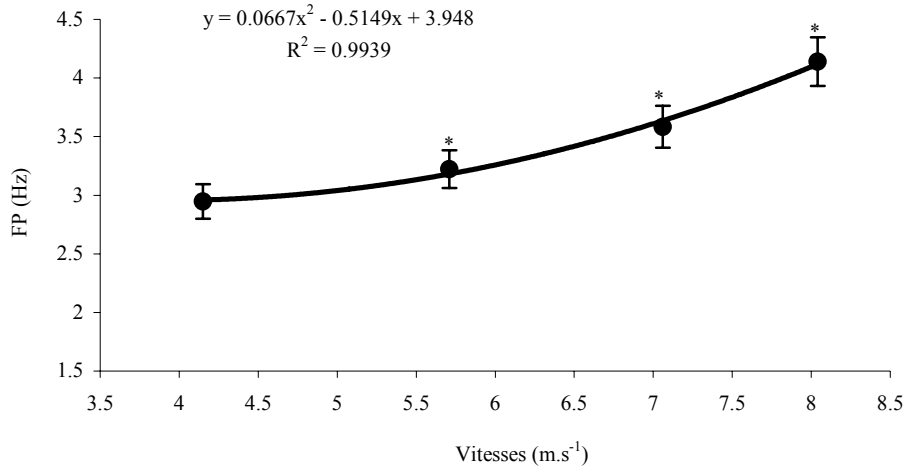
L'augmentation de la vitesse de course ne provoque pas de variation linéaire du temps de vol du pied, comme c'est le cas pour Tc. En effet, l'évolution de Tv avec la vitesse est de type polynomial (figure 8). C'est à dire que pour des vitesses de course inférieures à 7 m.s⁻¹, Tv reste stable, puis il diminue significativement à Vmax ($p = 0.01$).



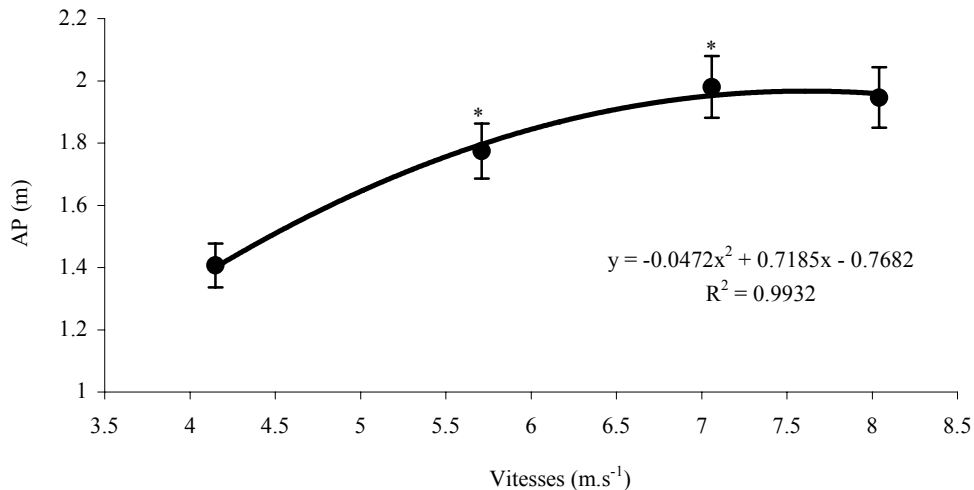
*Figure 8 : Effet de la vitesse sur les temps de vol du pied (Tv: *significativement différent de la valeur précédente, §significativement différent de 5,71 m.s⁻¹ ; $p \leq 0.01$).*

1.3-Fréquence et amplitude des pas (FP et AP) :

Plus la vitesse de course augmente et plus la fréquence et l'amplitude de pas augmentent. Cependant la relation entre la vitesse de course et la fréquence et l'amplitude de pas n'est pas linéaire, mais polynomiale (figure 9 et 10). En effet, jusqu'à 7 m.s^{-1} , FP et AP augmentent linéairement avec la vitesse de course, puis pour atteindre V_{max} , les coureurs augmentent préférentiellement FP et conservent leur amplitude de pas constante.



*Figure 9 : Effet de la vitesse sur la fréquence de pas (FP : *significativement différente de la valeur précédente ; $p \leq 0.0001$).*



*Figure 10 : Effet de la vitesse sur l'amplitude de pas (AP : *significativement différente de la valeur précédente ; $p \leq 0.0001$).*

1.4-Composantes verticale et horizontale maximales de la force de réaction du sol (Fz max et Fh_max) :

La vitesse de course n'a pas d'effet sur Fz max (figure 11). En effet, entre 4,13 m.s⁻¹ et Vmax, Fz max est constante et de l'ordre de 2000 N, soit environ trois fois le poids du corps du coureur. Inversement, Fh_max augmente significativement jusqu'à 7 m.s⁻¹ ($p \leq 0.0004$), puis reste constante jusqu'à Vmax ($p = 0,97$; figure 12).

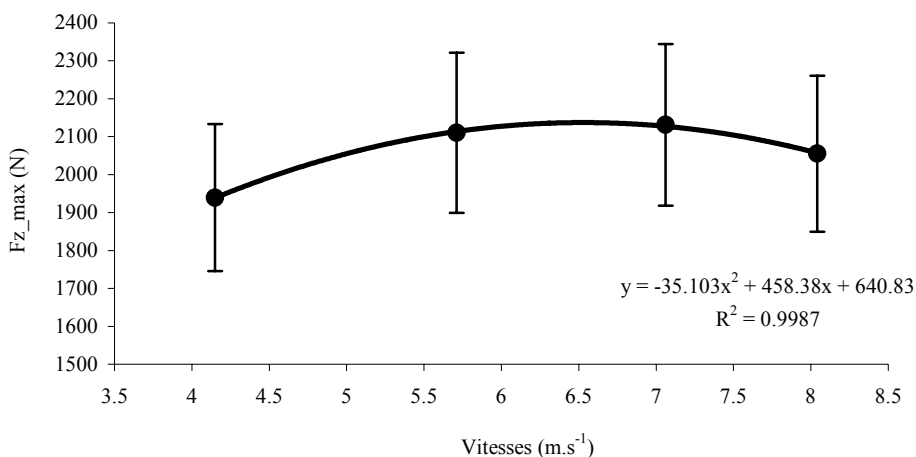
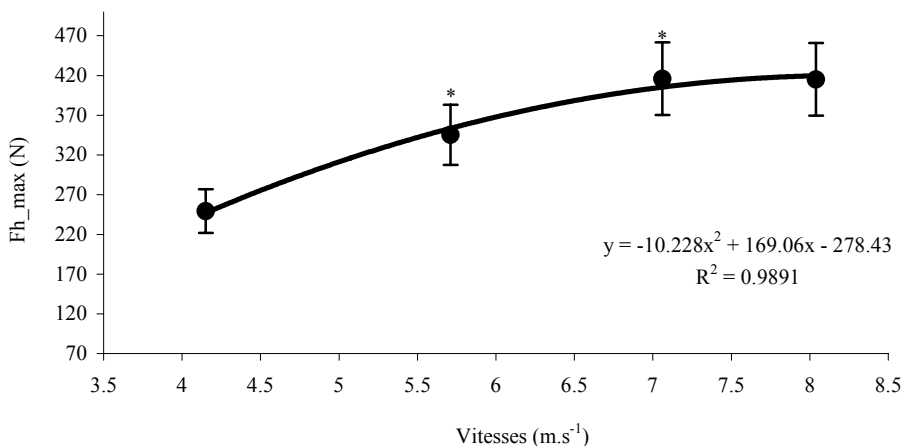


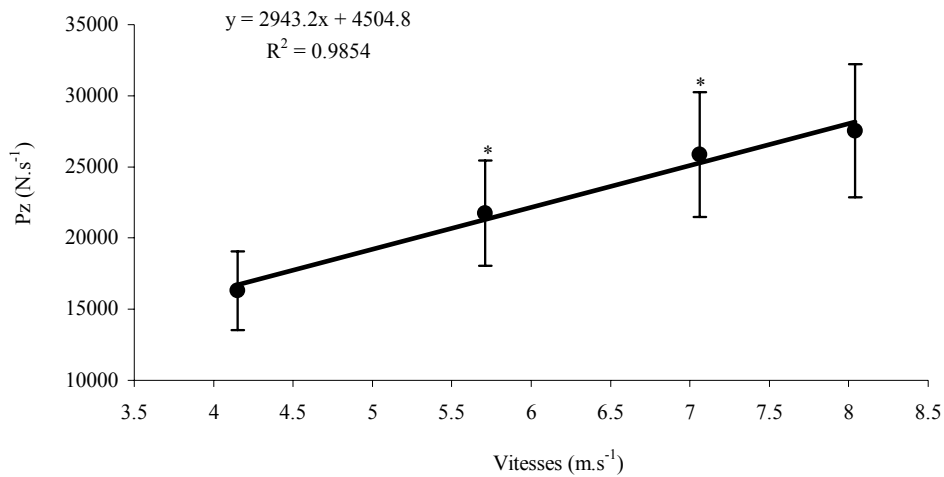
Figure 11 : Effet de la vitesse sur la composante verticale maximale de la force de réaction du sol (Fz max).



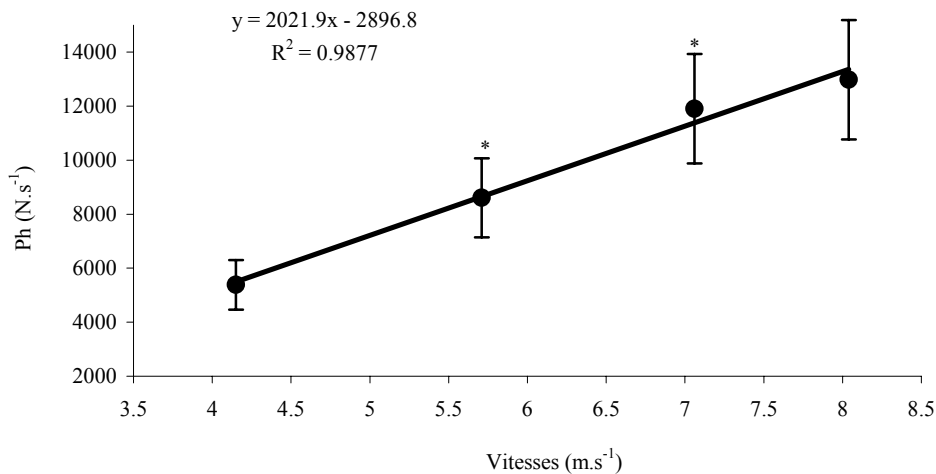
*Figure 12 : Effet de la vitesse sur la composante horizontale maximale de la force de réaction du sol (Fh_max; *significativement différente de la valeur précédente ; $p \leq 0.0004$).*

1.5-Pente verticale et pente horizontale (Pz et Ph) :

Les figures 13 et 14 montrent que la vitesse de course possède un effet significatif sur ces deux paramètres ($p < 0,0001$). En effet, entre 4,15 et 7 $m.s^{-1}$, Pz et Ph augmentent significativement ($p < 0.0001$). Au-delà de 7 $m.s^{-1}$, Pz et Ph continuent d'augmenter mais de manière non significative ($p = 0,32$; $p = 0,12$).



*Figure 13 : Effet de la vitesse sur la pente verticale (Pz; *significativement différente de la valeur précédente ; $p < 0.02$).*



*Figure 14 : Effet de la vitesse sur la pente horizontale (Ph; *significativement différente de la valeur précédente ; $p < 0.0001$).*

1.6-Raideur (K_{vert}) et déplacement vertical du centre de masse durant la phase d'amortissement (Δz) :

La figure 15 montre qu'il existe une relation quadratique entre la vitesse de course et la raideur verticale du coureur (K_{vert}). L'augmentation de cette raideur est donc plus importante pour les vitesses de course élevées, c'est à dire au-delà de 6 m.s^{-1} (figure 15). La composante verticale maximale (Fz_{max}) restant constante, la modification de la raideur est essentiellement liée à la diminution de la variation de hauteur du centre de masse du coureur durant la phase d'amortissement (figure 16).

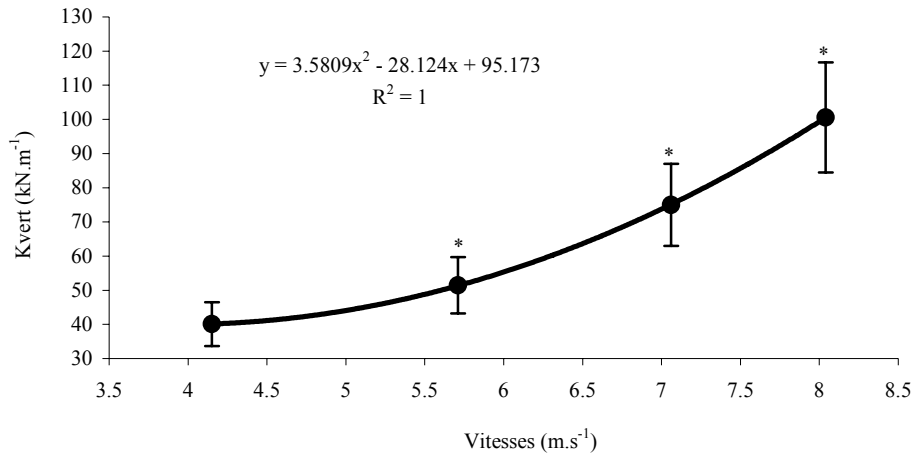


Figure 15 : Effet de la vitesse sur la raideur verticale du coureur (K_{vert} ; *significativement différente de la valeur précédente ; $p = 0,03$ entre $4,15$ et $5,71 \text{ m.s}^{-1}$ et $p < 0,0001$ pour les autres vitesses).

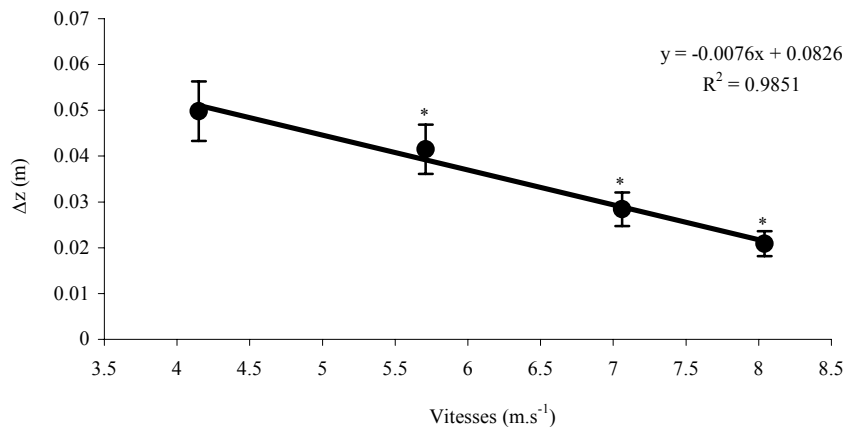


Figure 16 : Effet de la vitesse sur le déplacement vertical du centre de masse entre la pose du pied au sol et la position la plus basse du centre de masse (Δz ; *significativement différente de la valeur précédente ; $p = 0,001$ entre $4,15$ et $5,71 \text{ m.s}^{-1}$, $p < 0,0001$ entre $5,71$ et $7,09 \text{ m.s}^{-1}$ et $p = 0,003$ entre $7,09 \text{ m.s}^{-1}$ et V_{max}).

2-Relation entre les forces développées sur ergomètres et les paramètres mécaniques de la foulée. (tableau 1)

La composante maximale horizontale de la force de réaction du sol (F_x max., exprimée en N (valeur absolue) et $N.kg^{-1}$ (valeur relative)) mesurée en course n'est pas significativement différente de la force pic ($F_{peak conc}$, exprimée en N et $N.kg^{-1}$) mesurée sur la hip machine pour des charges comprises entre 20 et 35 kg. Cependant, la force maximale isométrique mesurée à la hip machine (FMI_{hip}) est significativement supérieure aux différentes F_x max mesurées à différentes vitesses ($p < 0.0001$).

Sur l'axe vertical, les forces mesurées en course (F_z max) sont significativement différentes des $F_{peak conc}$ mesurées à la presse aux différentes charges du test de charge-vitesse (environ deux fois plus grandes ; $p < 0.0001$). Cependant, F_z max mesurée aux différentes vitesses de course est d'une part significativement corrélée à la force maximale isométrique mesurée à la presse (FMI_{presse} ; $r = 0.75$ et $p \leq 0.05$) et d'autre part, pas significativement différente de FMI_{presse} ($p = 0.4$)

Les pentes d'établissement de la force maximale calculées pendant la course sur l'axe vertical et horizontal (P_z et P_x) étaient significativement plus grandes que les pentes d'établissement de la force maximale obtenue à la presse oblique et la hip machine ($S_{peak conc}$). Aux différentes vitesses de course, P_x est positivement corrélée aux pentes d'établissement de la force pic à la hip machine.

Tableau 1 : Force maximale isométrique (FMI, 1A) ; force pic ($F_{peak conc}$) et pente d'établissement de cette force ($S_{peak conc}$) à la presse et à la hip machine (1B) ; composante verticale et horizontale de la force maximale de réaction du sol ($Fz max$ et $Fx max$) ainsi que leur pente d'établissement (Pz et Px ; 1C).

1A	Presse oblique		Hip machine	
	<i>Jambe d'appel</i>		<i>Jambe d'appel</i>	
FMI (Newton)	2240 ± 646		766 ± 122	
FMI (BW)	3.53 ± 0.98		1.21 ± 0.22	
1B	Presse oblique		Hip machine	
Masses additionnelles (kg)	$F_{peak conc}$ (N)	$S_{peak conc}$ (N.s ⁻¹)	$F_{peak conc}$ (N)	$S_{peak conc}$ (N.s ⁻¹)
Presse oblique à vide (48 kg)	738 ± 95	5400 ± 2615		
5	778 ± 94	4287 ± 1712		
10	802 ± 99	4293 ± 2236	187 ± 17	1509 ± 820
15	836 ± 97	3463 ± 1128	237 ± 22	2131 ± 1206
20	866 ± 74	3973 ± 1581	283 ± 28	2139 ± 1370
25	899 ± 95	4647 ± 3285	335 ± 32	2135 ± 1377
30	898 ± 99	4240 ± 3239	376 ± 30	2536 ± 1788
35	944 ± 100	5466 ± 4694	422 ± 31	2869 ± 2049
40	971 ± 98	4897 ± 4118	457 ± 49	2841 ± 1557
45	1018 ± 96	3739 ± 3145	482 ± 48	3061 ± 1405
50	1003 ± 123	3728 ± 3429	530 ± 49	2436 ± 1126
55 (n=8)			570 ± 51	2624 ± 1132
1C	Paramètres verticaux en course		Paramètres horizontaux en course	
Vitesse	$Fz max$ (N)	Pz (N.s ⁻¹)	$Fx max$ (N)	Px (N.s ⁻¹)
V _{4,15}	1939 ± 214	16121 ± 2992	249 ± 28	5385 ± 928
V _{5,7}	2121 ± 213	23449 ± 3949	349 ± 43	8698 ± 1312
V ₇	2119 ± 192	27880 ± 4005	408 ± 40	11909 ± 1664
V _{max}	2055 ± 198	29920 ± 5165	415 ± 45	12980 ± 2011
Effet "vitesse"	*	*	*	*

Pour ces coureurs de demi-fond : **la force spécifique dans la course, sur l'axe vertical Z se situe aux alentours de 2100 N (environ 3.3 x le Poids de corps).** Cette valeur est peu affectée par la vitesse de course. **Ce niveau de force correspond à un niveau de force maximal isométrique d'extension à la presse sur une jambe.**

La force spécifique dans la course sur l'axe horizontal X augmente de 250 N à 415 N en fonction de la vitesse de course. Ce niveau de force correspond à un travail à la hip machine de 15 à 35 kg soit de 20% à 40% de 1RM.

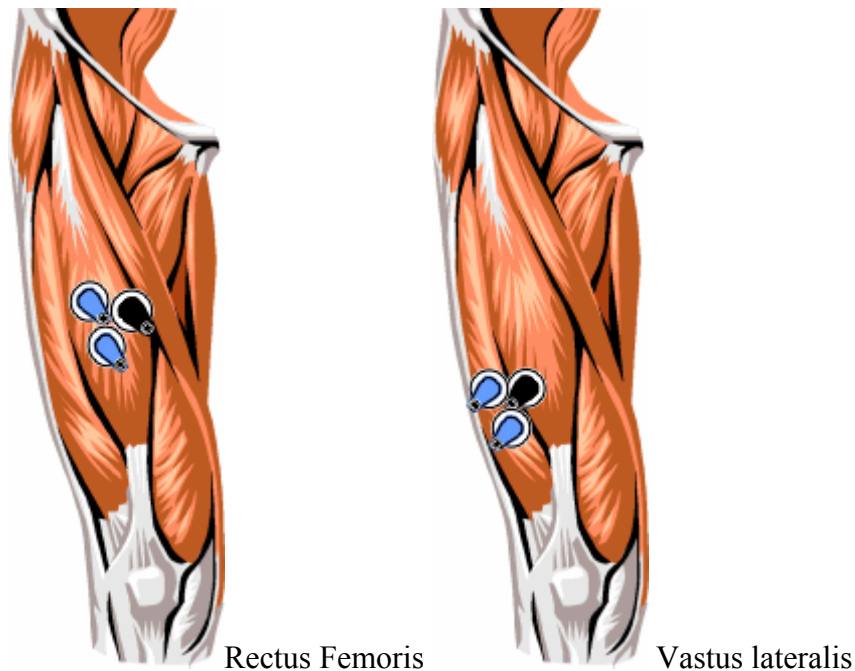
3-Etude 2 : Comparaison des niveaux d'activation des extenseurs des membres inférieurs en course et lors d'exercices de renforcement.

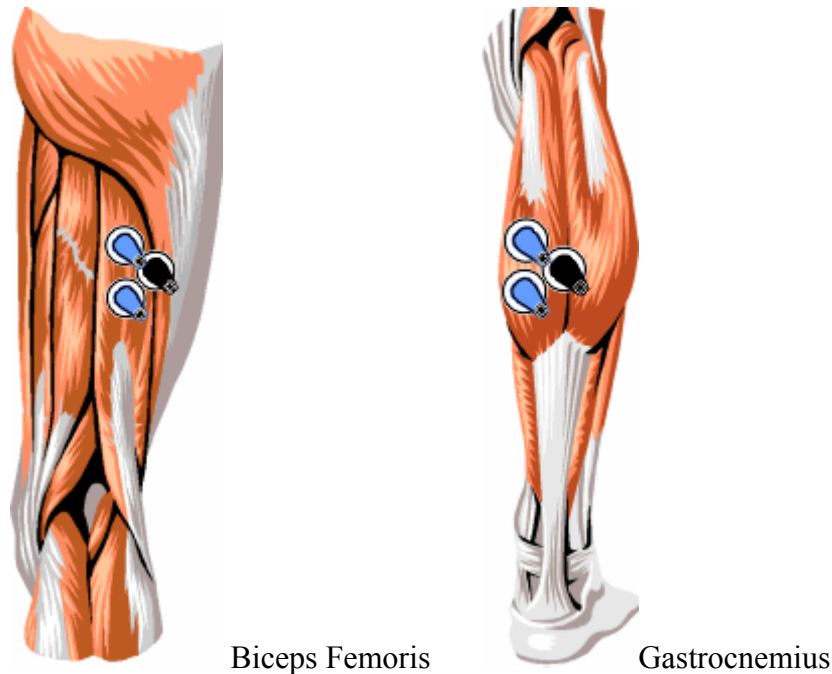
1-Introduction : pourquoi l'électromyographie (EMG) ?

Les forces mesurées à l'aide de la plateforme ne peuvent pas dans toutes les situations être considérées comme le reflet exclusif des seules activations musculaires. La pose d'un appui au sol en course représente un choc entre deux systèmes (l'athlète et la terre) tel que des forces surviennent. Les structures passives sont également susceptibles de produire des transferts d'énergie. Dès lors, si nous voulons appréhender plus précisément la part qui revient à l'activité musculaire à proprement parler, il nous faut mesurer les niveaux d'activation des principaux muscles dans les activités étudiées.

2-Méthodologie

2.1-Les muscles et le positionnement des électrodes





2.2-Illustrations : les tracés EMG bruts

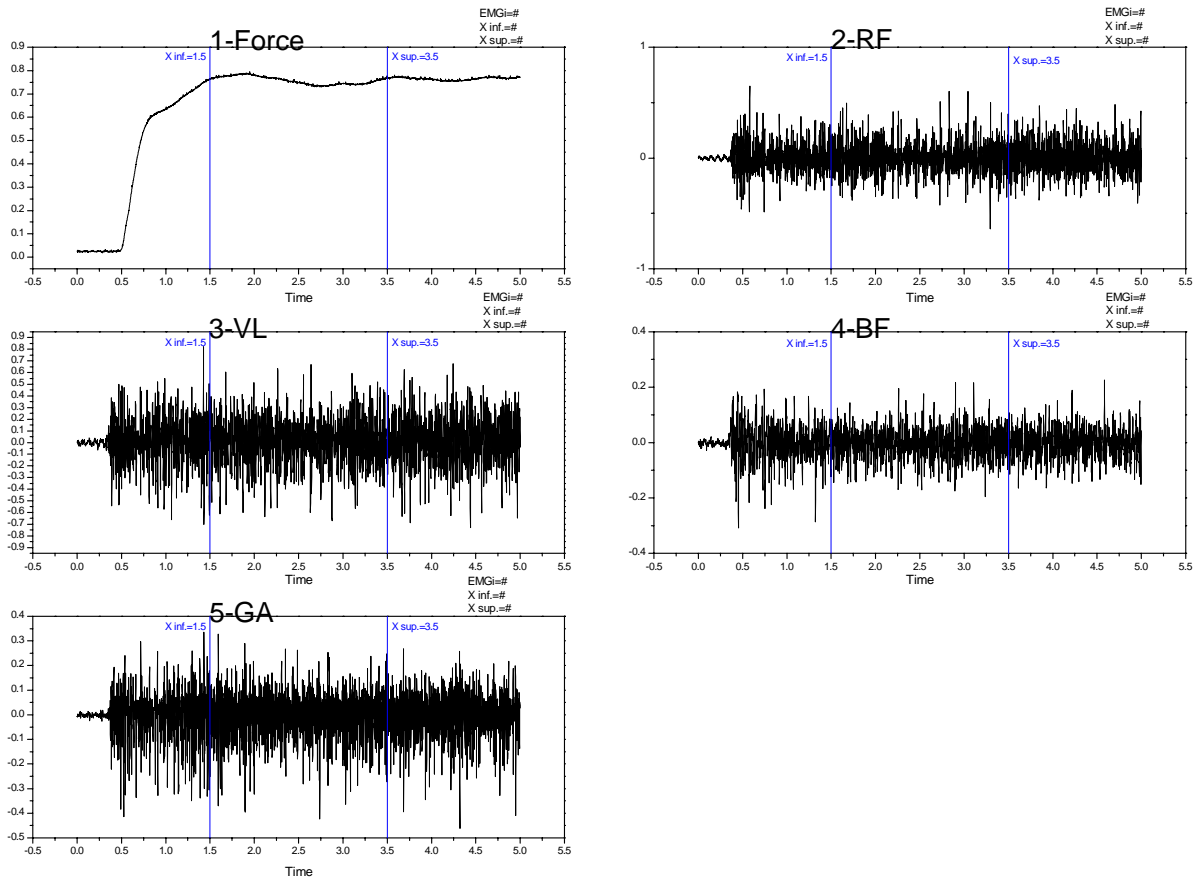
2.2.1-Les Références

Le traitement des EMG oblige à normaliser les niveaux d'activation à une valeur de référence censée représenter le niveau d'activation maximal des muscles étudiés. Ainsi une référence à la presse et à la Hip machine a été obtenue lors d'efforts maximaux isométriques. A la presse, le mouvement retenu est une extension du membre inférieur avec un angle de 135° au niveau du genou. A la Hip machine, la jambe repousse le bras d'entraînement faisant avec la verticale un angle de 25° .

Le graphique (1) montre le tracé mécanique de la force isométrique fourni par la jauge de contrainte.

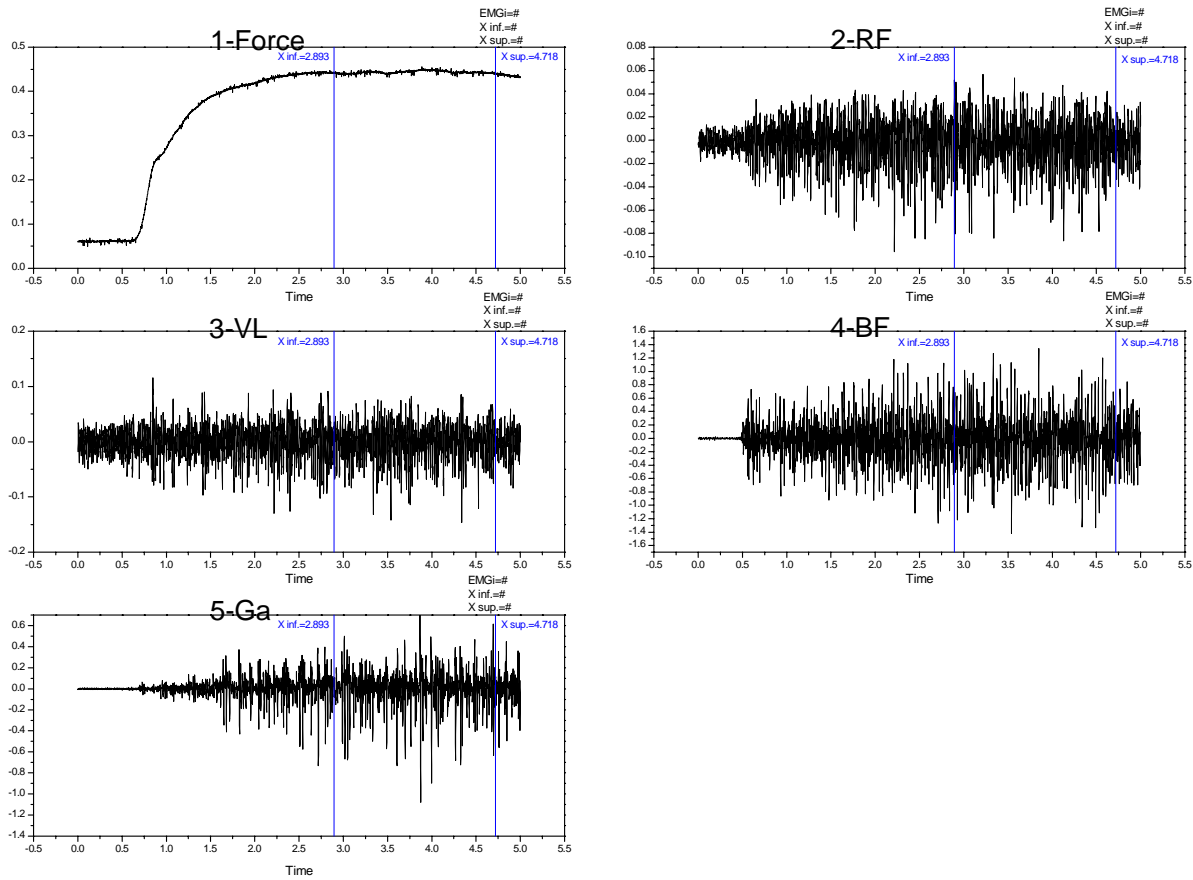
Les graphiques 2, 3, 4, 5 représentent respectivement l'activité électromyographique maximale du Rectus Femoris (RF), du Vastus Lateralis (VL), du Biceps Femoris (BF), du Gastrocnemius (Ga). La séquence qui se situe entre les 2 curseurs bleus a permis le calcul des moyennes de ces différents signaux. Les activités mesurées à la presse sont regroupées sur la figure 17a, les activités mesurées à la Hip machine sont regroupées sur la figure 17b.

Références Presse



*Figure 17a : Données recueillies à la presse
Graphique 1 : Paramètre mécanique de la force.
Graphiques 2, 3, 4, 5 : Paramètres électromyographiques du Rectus Femoris (RF),
du Vastus Lateralis (VL), du Biceps Femoris (BF) et du Gastrocnemius (GA)*

Références Hip



*Figure 17b : Données recueillies à la Hip
Graphique : Paramètre mécanique de la force.
Graphiques 2, 3, 4, 5 : Paramètres électromyographiques du Rectus Femoris (RF),
du Vastus Lateralis (VL), du Biceps Femoris (BF), du Gastrocnemius (GA)*

2.2.2-Les EMG en course

Les signaux électromyographiques recueillis durant les épreuves de course sont ici représentés (figure 18)

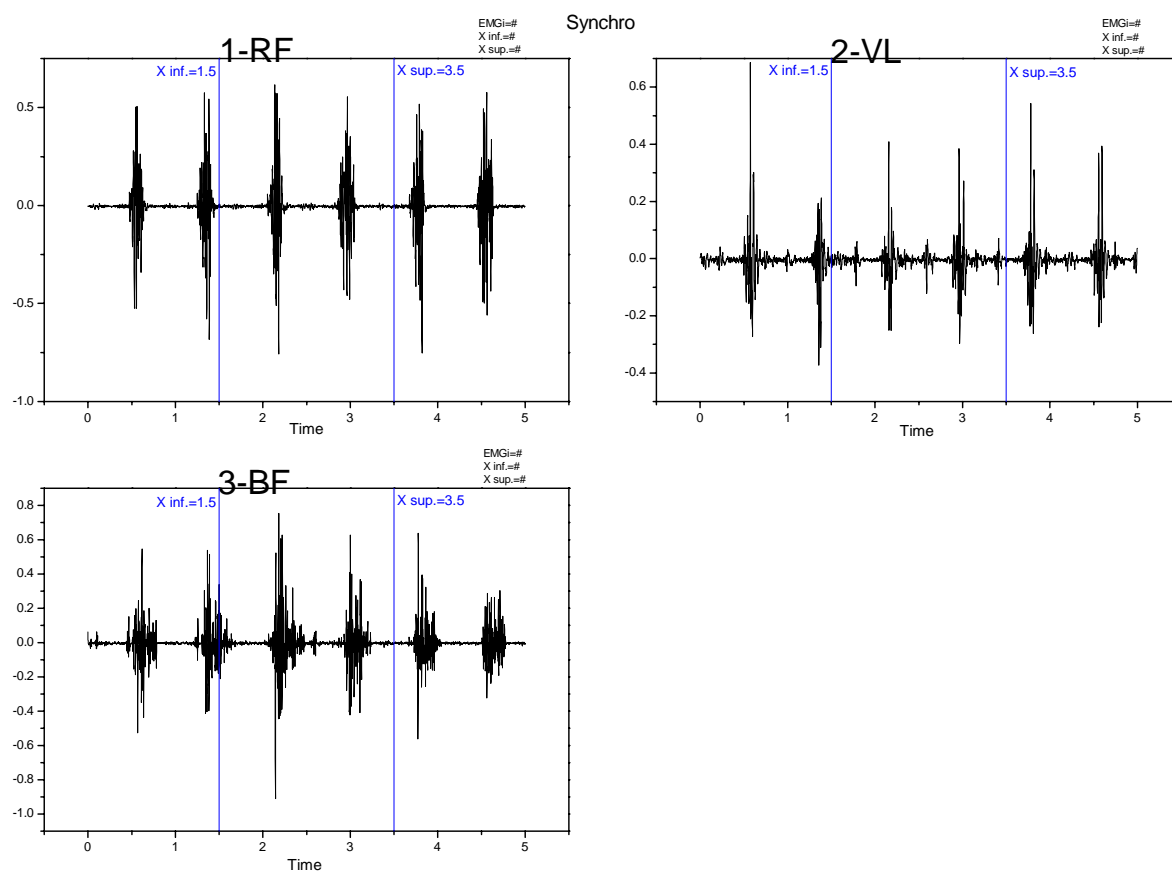
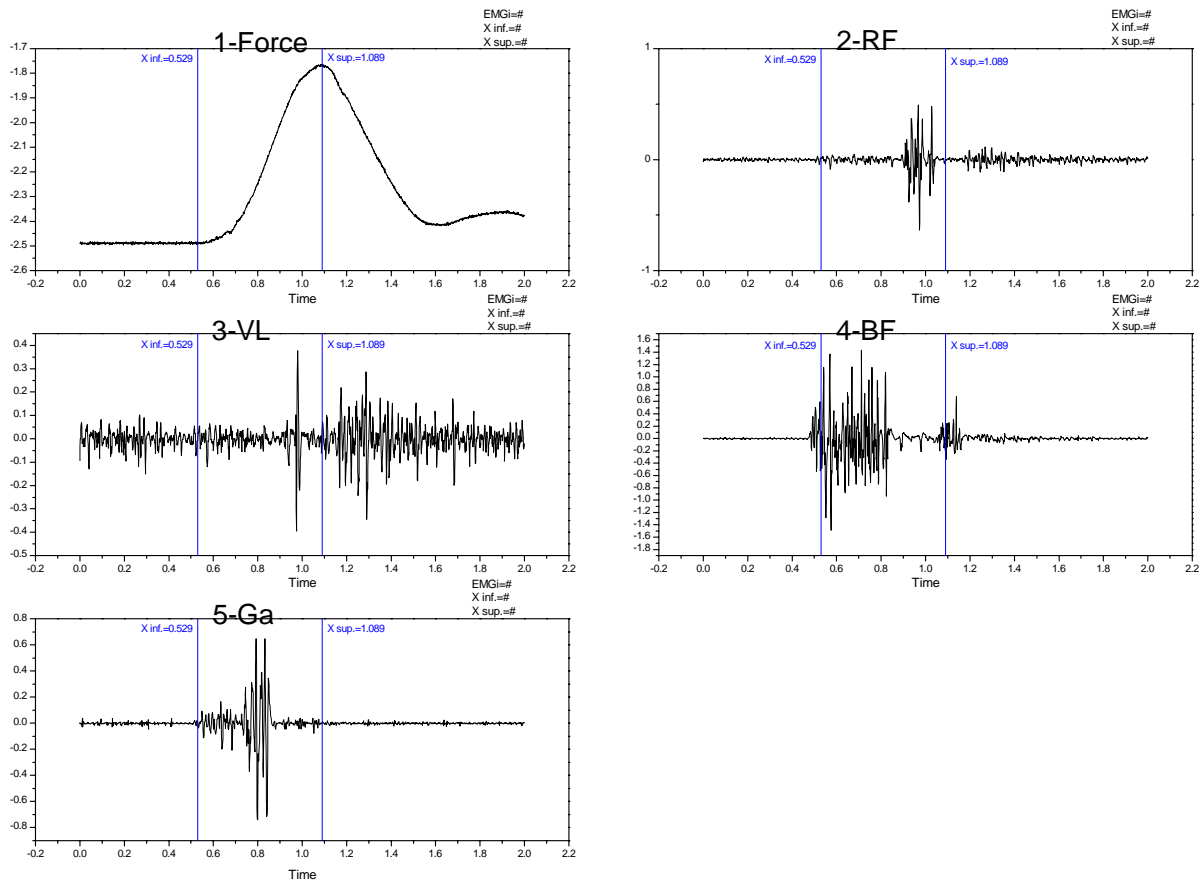


Figure 18 : Données recueillies durant les courses
Graphiques 1,2,3 : paramètres électromyographiques du Rectus Femoris (RF),
du Vastus Lateralis (VL), du Biceps Femoris.

2.2.3-Les EMG sur ergomètres

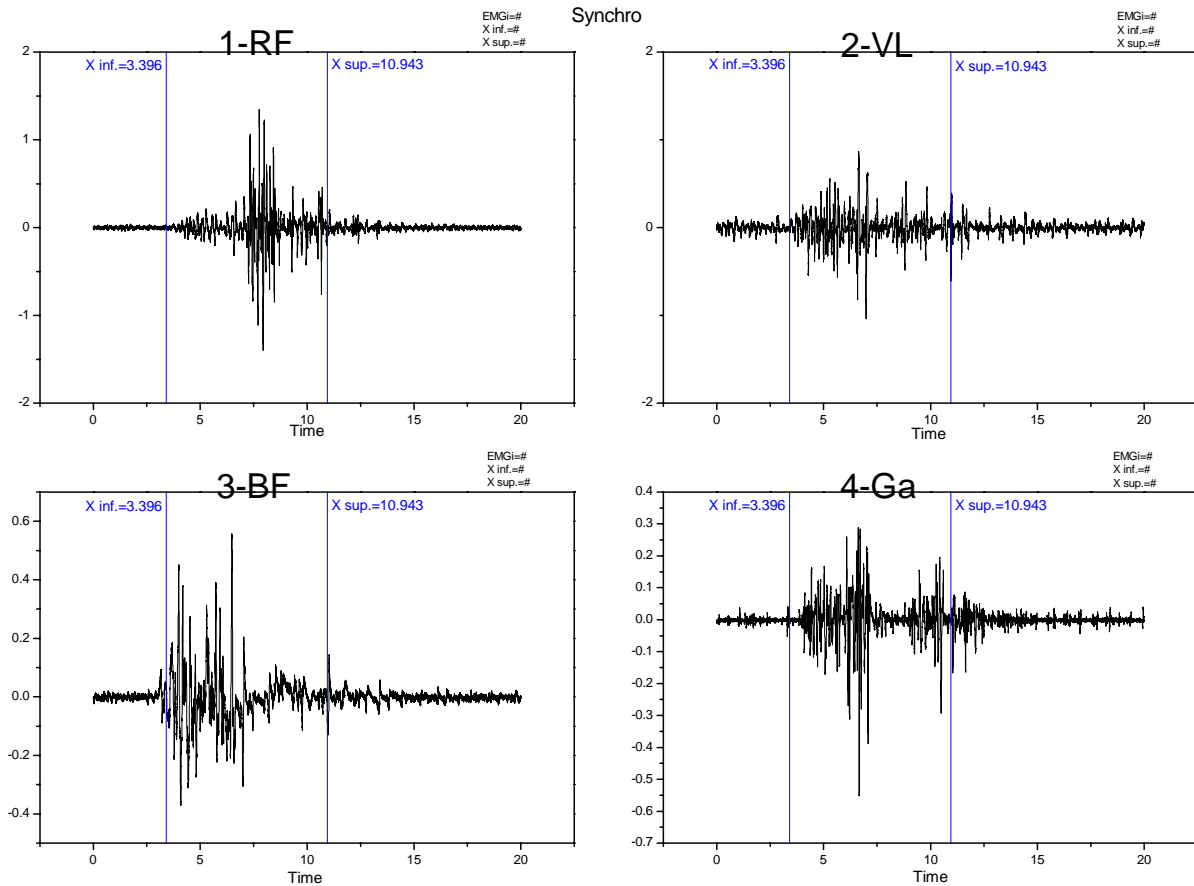
Les signaux électromyographiques recueillis durant les épreuves des tests musculaires sont ici représentés (figure 19). La figure 19a illustre une épreuve réalisée sur la hip machine avec une charge de 30% de la charge maximale mobilisée par un sujet sur cet appareil. La figure 19b illustre une épreuve réalisée sur la presse avec une charge de 30% de la charge maximale mobilisée par un sujet sur cet appareil.

Hip 30%



*Figure 19a : Données recueillies à la Hip
Graphique 1: Paramètre mécanique de la force.
Graphiques 2, 3, 4, 5 : Paramètres électromyographiques du Rectus Femoris (RF),
du Vastus Lateralis (VL), du Biceps Femoris (BF), du Gastrocnemius (GA)*

Presse 30%



*Figure 19b : Données recueillies à la Presse
Graphiques 1, 2, 3, 4 : Paramètre électromyographique du Rectus Femoris (RF),
du Vastus Lateralis (VL), du Biceps Femoris (BF), du Gastrocnemius (GA)*

2.3-La préparation des sujets

La détection de l'activité électromyographique est assurée par des électrodes de surface de type Ag-AgCl et de marque Numéris. Ces électrodes sont auto-collantes et jetables. La conduction du signal

est assurée grâce à une épaisseur de gel conducteur électrolytique. Le diamètre de ces électrodes, incluant la collerette adhésive est de 32 mm pour 10 mm de diamètre pour la surface de recueil.

L'application des électrodes est effectuée après une desquamation préalable de la peau. Elles sont espacées centre à centre de 20 mm et disposées sur le « ventre » du muscle dans l'axe des fibres musculaires. Une électrode-masse est fixée sur une région dépourvue de muscle sous-jacent.

La mesure de la résistance inter-électrodes est entreprise systématiquement avant et après le test : la résistance est toujours inférieure à 1000 ohms.

L'appareil enregistreur utilisé est de marque Sony et de type KMT D-8 Mini (Sony Corporation, Gmbh, KrausMesstechnik, Otterfing, Allemagne). Le signal est enregistré sur des cassettes de type DAT, dont la bande passante s'étend de 1 à 12000 Hz. La fréquence d'acquisition de la chaîne est de 12 KHz par voie avec une résolution de 12 bits.

L'amplification du signal électromyographique est assurée par un conditionneur-amplificateur situé à proximité immédiate des électrodes dont le gain est de 600 pour une fourchette de fréquence de 6 à 1500 Hz. L'impédance est de 2 Gigaohms à l'entrée et de 10 ohms maximum en sortie.

Le signal E.M.G est enregistré en continu tout au cours des différents tests.

2.4-Protocole

Des coureurs spécialistes de demi-fond furent volontaires pour participer à cette étude. (n = 5). La taille, le poids et l'âge de cette population sont respectivement de $1,73 \pm 1,71$ m, de $63,3 \pm 2,5$ kg et de 31 ± 4 ans.

Les coureurs ont exécuté 1) Quatre courses de 40 m à des vitesses différentes. Une course à la vitesse maximale (V_{max}), et 3 courses à 80%, 50% et 30% de cette V_{max} ($V_{80\%}$, $V_{50\%}$ et $V_{30\%}$). La vitesse de course a été vérifiée à l'aide d'un système de cellules photo-électriques (Brower timing system) ; 2) un test unipodal de force maximale isométrique sur la presse oblique (45° ; UMVIF-OP) et sur la hip machine (UMVIF-HM) ; 3) un test unipodal de charge-vitesse sur la presse oblique et sur la hip machine à vide, 30, 50 et 80% de la force isométrique maximale. A la presse, l'angle jambe – cuisse était de 135° . A la hip machine, l'angle entre le membre inférieur et la verticale était de 30° . La même procédure que précédemment a été utilisée dans cette partie expérimentale.

2.5-Traitement des résultats

Les signaux EMG ont été intégrés et normalisés. L'intégration est un processus de quantification du signal redressé (calcul de la surface emprisonnée sous la courbe). Elle permet d'évaluer le niveau d'activation du muscle entre deux instants donnés. L'EMG intégré a alors comme expression :

$$EMGi = \int_{t_0}^{t_1} |EMG| * dt \quad \text{C'est une quantité d'électricité, l'unité en est le mV.s}$$

La normalisation est obtenue en faisant le rapport du niveau d'intégration sur une durée donnée au niveau d'intégration obtenu sur les EMG de référence pendant la même durée lors d'un effort maximale isométrique. Les EMGi sont ainsi comparables. Ils s'expriment alors en % de la valeur de référence

3- Les résultats

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus durant cette expérimentation. Le tableau 2 affiche les valeurs obtenues sur les ergomètres.

		Vide		30%		50%		80%	
		Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
Presse	RF	85.2	± 32.3	91.4	± 23.2	70.9	± 26.7	61.1	± 23.2
	VL	62.1	± 15.9	58.7	± 12.3	57.4	± 9.5	62.0	± 8.3
	GA	123.4	± 73.2	160.0	± 77.3	150.0	± 60.7	145.3	± 47.9
Hip	BF	68.5	± 16.2	72.7	± 9.1	78.4	± 9.9	78.1	± 7.3

Tableau 2 : EMGi du Rectus Femoris (RF), du Vastus Lateralis (VL) et du Gastrocnemius (GA) enregistré lors du test de charge-vitesse à la presse (Résultats exprimés en pourcentage d'un effort maximal isométrique à la presse). EMGi du Biceps Femoris (BF) enregistré lors du test de charge-vitesse à la hip machine (Résultats exprimés en pourcentage d'un effort maximal isométrique à la hip machine)

Sur la Presse, les niveaux d'activation n'augmentent pas avec les charges, voire même, une légère diminution est observable. Sur la Hip machine une très légère tendance à l'accroissement du niveau d'activation peut être observée.

Le tableau 3 affiche les valeurs obtenues dans les courses.

	V30		V50		V80		Vmax	
	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
VL	26.1	± 7.8	32.4	± 9.3	41.3	± 10.5	65.6	± 5.5
RF	39.4	± 26.9	50.6	± 34.0	67.9	± 37.3	79.6	± 39.1
GA	118.7	± 45.1	162.8	± 50.0	201.0	± 71.2	245.6	± 68.8

Tableau 3 : EMGi du Rectus Femoris (RF), du Vastus Lateralis (VL) et du Gastrocnemius (GA) enregistrés lors des courses à la vitesse maximale (Vmax), 80%, 50% et 30% de cette vitesse maximale (V80. V50. V30). (Résultats exprimés en pourcentage d'un effort maximal isométrique à la presse)

Les résultats indiquent que les niveaux d'activation augmentent avec la vitesse de course. Le GA affiche des niveaux d'activation très supérieurs à ceux de la référence.

1- *Discussion*

Les mesures des activations musculaires par les EMG de surface nous renseignent assez peu sur l'implication des différents muscles dans les exercices de musculation réalisés sur les ergomètres. Dans ces appareils (Presse oblique et Hip machine), l'athlète est positionné de telle manière que son appui mécanique est proximal, c'est à dire situé près de la hanche, qui dans les deux ergomètres, est plus ou moins fixée : c'est le pied qui se déplace ou oscille. Dans la course, la mise en jeu des chaînes musculaires se fait à partir d'un appui « pied » accroché au sol et c'est la hanche qui se déplace. Bien sur dans la phase oscillante du segment libre, le pied se déplace autour de la hanche, mais cette situation présente globalement moins de contrainte que la séquence d'appui. Cette situation est peut être une explication pour comprendre que si dans la course, les niveaux d'activation augmentent avec la vitesse, il n'en est rien sur les ergomètres.

Les EMG augmentent avec la vitesse de course, alors que la composante de force verticale de la réaction du sol est quasiment constante (cf. page 18). Il semblerait donc que l'activité musculaire s'oriente davantage vers la fonction de tenseur, participant à la tenue, au maintien des différents segments entre eux, plutôt que vers une fonction motrice de création de mouvement. Dans ce cas, les muscles engagés dans la course développent des forces internes au système athlète qui se traduisent par un accroissement des valeurs d'EMG sans produire de forces externes responsables des impulsions.

4-Etude 3 : Effets de la fatigue induite par un 2000 mètres sur les forces développées en course.

A) Matériel et Méthode

1-Protocole

Neuf coureurs entraînés (tableau 3) furent volontaires pour participer à cette étude. Tous les coureurs ont réalisé un 2000 mètres au maximum de leurs possibilités sur la piste couverte de l'INSEP (340 m). Ils ont réalisé 10 minutes d'échauffement avant l'exercice épuisant et ont eu 10 minutes de récupération sous forme d'une course réalisée à une vitesse de $3,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Durant tout l'exercice (échauffement, 2000 m et récupération), les échanges gazeux ont été mesurés respiration par respiration à l'aide d'un analyseur portable des gaz (Cosmed K4b², Roma, Italy). Avant chaque test, les analyseurs d'O₂ et de CO₂ sont calibrés en utilisant l'air ambiant et un gaz de référence. La turbine est également calibrée avec un volume d'air de 3 litres (Quinton instruments, Seattle, USA).

A chaque tour de piste, les coureurs passent sur une plateforme de force (AMTI 600×1200, 500Hz) intégrée dans la piste. A chaque tour, les composantes verticale et horizontale de la force de réaction du sol sont mesurées (cf. étude 1). La vitesse de course est contrôlée à l'aide d'un système optique de mesure Optojump (Optojump, Microgate, Bolzano, Italie), placé de part et d'autre de la plateforme de force, sur une longueur de 10 mètres.

2-Traitement des résultats

Coût énergétique (CE): la consommation d'oxygène obtenue à chaque cycle respiratoire est filtrée et moyennée sur 5 s, à l'aide du logiciel d'exploitation du K4, pour faire ressortir les caractéristiques de la réponse de $\dot{V}\text{O}_2$. Cette réponse de $\dot{V}\text{O}_2$ est ensuite lissée avec une fonction de forme exponentielle (Barstow et Molé 1991). Les fonctions mathématiques utilisées sont constituées de une ou deux exponentielles, chacune représentant une phase de la réponse de $\dot{V}\text{O}_2$ (phase 2 et 3). La composante initiale de $\dot{V}\text{O}_2$ (phase 1) n'est pas modélisée car les données en cycle à cycle étant moyennées sur 5 s, il n'y a pas assez de points pour caractériser cette phase. Cette modélisation permet d'évaluer les paramètres suivants :

$$\dot{V}O_2(t) = y_0 + A1 \times (1 - e^{-(t-TD1)/\tau_1}) \times U_1 + A2 \times (1 - e^{-(t-TD2)/\tau_2}) \times U_2$$

phase 2 :

phase 3 :

composante rapide

composante lente

$$U_1 = 0 \text{ pour } t < TD1 \text{ et } U_1 = 1 \text{ pour } t \geq TD1$$

$$U_2 = 0 \text{ pour } t < TD1 \text{ et } U_2 = 1 \text{ pour } t \geq TD1$$

Où y_0 représente la consommation d'oxygène de base ou de repos ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$).

$A1$ constitue l'amplitude de la composante rapide (ou de la phase 2) du $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$).

$A2$ est l'amplitude de la composante lente (ou de la phase 3) du $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$).

τ_1 et τ_2 sont les constantes de temps des deux exponentielles (s).

$TD1$, $TD2$ indiquent les temps d'apparition de la composante rapide et de la composante lente de $\dot{V}O_2$ (en seconde). Le test de Fisher est ensuite utilisé pour choisir le modèle associé à la plus grande valeur de F .

Le coût énergétique est ensuite calculé 3 min après le début de l'exercice et 30 s avant sa fin :

$$CE = \dot{V}O_2(t) \cdot V^{-1} \cdot M^{-1}$$

Où V est la vitesse moyenne lors des différentes mesures du $\dot{V}O_2$ et M , la masse corporelle.

La raideur (K_{leg} et K_{vert}) est calculé comme dans l'étude numéro 1, précédemment présentée. La méthode utilisée par Morin et coll. (2005), qui utilise les temps de contact et de vol du pied est également utilisée.

3-Statistiques

Les effets de la fatigue sont déterminés par une analyse de la variance (ANOVA) par mesures répétées. Les relations entre le CE et la raideur sont déterminées par une méthode de régression linéaire et testées par un test de Spearman. La significativité est fixée à $p = 0,05$.

Table 4: Caractéristiques physiques des coureurs. $\dot{V}O_{2max}$ est la consommation d'oxygène maximale atteinte durant le 2000 m.

	Mean \pm SD
Masse (kg)	61.2 \pm 7.3
Taille (cm)	169 \pm 8
Temps sur 2000m (s)	393 \pm 33.3
$\dot{V}O_{2max}$ (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	65.5 \pm 5.8

B) Résultats

1-Effets de la fatigue sur la raideur du coureur

Tous les paramètres mécaniques restent constants lorsqu'ils sont mesurés avant et après le 2000 m. (tableau 5). Ces résultats montrent que sur terrain, la fatigue n'a pas d'influence significative sur des paramètres mécaniques tels que Fz max, Fh_max, K_{leg} et K_{vert}. Lorsque la méthode de Morin et coll. (2205) est utilisée, la raideur reste également constante.

Tableau 5: Effets de la fatigue sur les déplacements verticaux du centre de masse (ΔH), les composantes verticale et horizontale maximales de la force de réaction du sol (Fz max et Fh_max) et la raideur verticale de la jambe mesurée avec la plate-forme de force (K_{vert} et K_{leg}).

	Avant Mean \pm SD	Exercice Mean \pm SD	Après Mean \pm SD	ANOVA
Fh_max (N)	206 \pm 26	307 \pm 56 ^a	210 \pm 24 ^b	≤ 0.0001
Fz max (N)	1771 \pm 266	1851 \pm 312	1740 \pm 242	0.02
ΔH (cm)	11.6 \pm 2.1	10.0 \pm 1.4	10.9 \pm 2.4	0.02
K _{leg} (kN.m ⁻¹)	11.12 \pm 2.76	9.82 \pm 1.78	11.14 \pm 2.48	0.06
K _{vert} (kN.m ⁻¹)	32.52 \pm 6.42	43.42 \pm 9.65 ^a	32.59 \pm 5.48 ^b	0.003

^a Significativement différent d'avant l'exercice

^b Significativement différent de l'exercice.

La performance moyenne réalisée au 2000 m est de 6 min 33s \pm 33s. Le tableau 5 montre que le CE augmente significativement pendant et après le 2000 m. En effet, après l'exercice le CE est 11% plus élevé que pendant l'échauffement. Ces changements du CE sont accompagnés d'une augmentation significative de la fréquence respiratoire (Rf) et de la ventilation (\dot{V}_E) ($p \leq 0,05$).

Tableau 6: Effets de la fatigue sur le coût énergétique (CE), la vitesse de course ($m.s^{-1}$), le temps de contact du pied au sol (T_c), le temps de vol du pied (T_v), la fréquence de pas (FP), l'amplitude de pas (AP), la raideur verticale de la jambe calculée par la méthode de Morin et coll. (2005) (K_{leg_Morin} , K_{vert_Morin}).

	Avant	Exercice		Après	ANOVA
		Begin	End		
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	
CE ($ml.kg^{-1}.m^{-1}$)	0.192 ± 0.006	0.203 ± 0.016	0.210 ± 0.010 ^a	0.216 ± 0.013 ^{ab}	0.0003
K_{leg_Morin} ($kN.m^{-1}$)	8.66 ± 2.05	8.78 ± 2.09	8.48 ± 1.72	8.64 ± 1.83	0.91
K_{vert_Morin} ($kN.m^{-1}$)	23.54 ± 1.93	33.6 ± 5.18 ^a	34.40 ± 6.56 ^a	23.76 ± 1.62 ^b	≤0.0001
T_c (s)	0.234 ± 0.016	0.184 ± 0.015 ^a	0.182 ± 0.016 ^a	0.232 ± 0.014 ^{bc}	≤0.0001
T_v (s)	0.116 ± 0.026	0.128 ± 0.022	0.129 ± 0.018	0.114 ± 0.024	0.0093
FP (Hz)	2.87 ± 0.20	3.18 ± 0.14 ^a	3.22 ± 0.14 ^a	2.90 ± 0.19 ^{bc}	≤0.0001
AP (Hz)	1.27 ± 0.07	1.63 ± 0.18 ^a	1.67 ± 0.18 ^a	1.26 ± 0.07 ^{bc}	≤0.0001
Vitesse ($m.s^{-1}$)	3.63 ± 0.10	5.25 ± 0.41 ^a	5.45 ± 0.57 ^a	3.63 ± 0.20 ^{bc}	≤0.0001

^a Significativement différent d'avant l'exercice

^b Significativement différent du début de l'exercice

^c Significativement différent de la fin de l'exercice

2-Relation entre le coût énergétique, la raideur et les autres paramètres

mécaniques.

Les figures 20C et D montrent qu'avant et après l'exercice, K_{leg} n'est pas corrélé à CE. Durant le 2000 m, K_{leg} moyen est corrélé avec le coût énergétique mesuré en fin d'exercice (figure 20B). En effet, au début de l'exercice, le coefficient de corrélation entre K_{leg} et CE est $r = -0,46$ et $p = 0,22$ et à la fin, $r = -0,73$ et $p = 0,02$. K_{vert} comme les autres paramètres mécaniques n'est pas corrélé au CE (tableau 7).

Table 7: Matrice de corrélation entre le coût énergétique et les différents paramètres mécaniques. Les corrélations sont réalisées pour des paramètres mesurés durant la même période d'exercice.

	Avant		Exercice		Après	
	r	p	r	p	r	p
Tc (s)	- 0,10	0,80	0,39	0,31	0,22	0,59
Tv (s)	0,38	0,33	- 0,37	0,34	0,34	0,39
FP (Hz)	- 0,33	0,40	0,20	0,62	- 0,51	0,16
AP (Hz)	0,17	0,67	0,03	0,94	0,07	0,87
ΔH (m)	0,20	0,62	- 0,36	0,35	- 0,07	0,86
F_{h_max} (N)	0,43	0,26	- 0,13	0,75	0,15	0,71
Fz max (N)	0,46	0,22	- 0,45	0,23	0,31	0,45
K_{vert} (kN.m⁻¹)	0,09	0,82	- 0,04	0,93	- 0,16	0,69

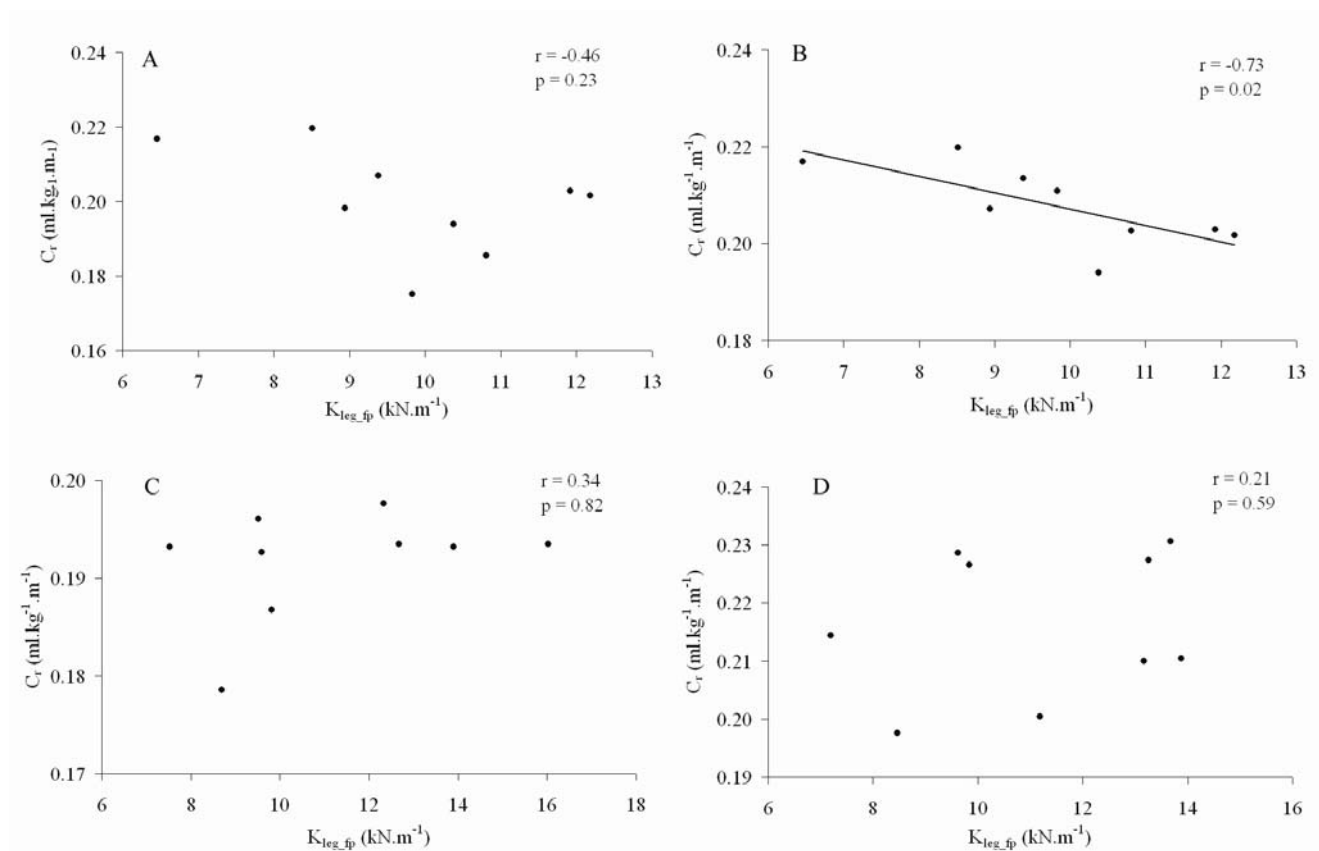


Figure 20: Relations entre la raideur moyenne (K_{leg}) mesurée avec la plateforme de force et le coût énergétique (C_r) mesuré au début (A), à la fin (B), avant (C) et après (D) le 2000 m.

5-Etude 4 : Effets d'un entraînement combiné en force et en endurance sur les capacités du coureur à accélérer en état de fatigue.

A) Matériel et Méthode

1-Protocole

Le protocole suivi par la population étudiée comprend trois phases. Les tests pré-entraînement, l'entraînement proprement dit et le test post-entraînement.

- Les tests sont organisés de la manière suivante :

	Une demi-journée A	Une demi-journée B	Une demi-journée C
Tests	Test de VMA (palier de 3 minutes) réalisé sur le terrain	Réalisation d'une performance sur une distance de 3000m	Test de charge-vitesse à la presse et à la hip machine. Test de détente verticale
Paramètres mesurés ou calculés	-Consommation maximale d'oxygène, - Seuil - Coût énergétique	- Cinétique de la consommation d'oxygène - Coût énergétique - Analyse mécanique et réponse à la fatigue.	- Qualités de force et de Vitesse

Les épreuves de 3000m ont été effectuées à la vitesse imposée de 95% de VMA correspondant à 7 passages dans les rails de l'optojump (figure 21) , l'allure ensuite était librement choisie par le coureur qui avait pour objectif de réaliser un « sprint final » passages 8 et 9.

- **L'entraînement**

La durée de cet entraînement combiné a été de huit semaines à raison de 2 séances de musculation par semaine. Cependant pour tester les effets de l'entraînement combiné, il a fallu diviser la population initiale en deux groupes :

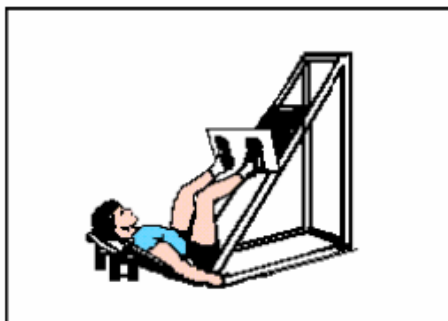
- un groupe pratiquant l'entraînement combiné force et endurance (Groupe expérimental)
- un groupe ne pratiquant que l'entraînement en endurance (les deux séances hebdomadaires de musculation sont remplacées par des footings). L'entraînement a eu lieu à l'INSEP ou au club de chaque coureur.

Il y a eu, par semaine, 4 à 5 entraînement pratiqués : 1 séance de VMA, 1 séance au seuil, 2 séances de musculation ou footing, 1 footing facultatif.

- **La séance de musculation.**

Elle se compose de sept exercices

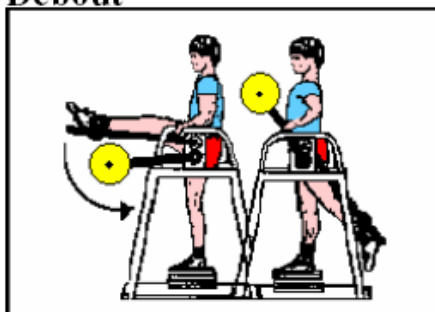
Squat presse oblique



Cet exercice a été retenu parce qu'il sollicite la chaîne des extenseurs des membres inférieurs, chaîne musculaire fortement concernée par les contraintes verticales de la course. L'appui mécanique est à la hanche. Après une période de familiarisation avec ce dispositif, les coureurs l'ont rapidement utilisé de manière plus spécifique c'est à dire de manière unipodale.

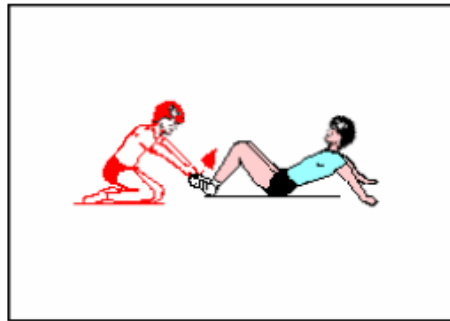
Extension hanche

Debout



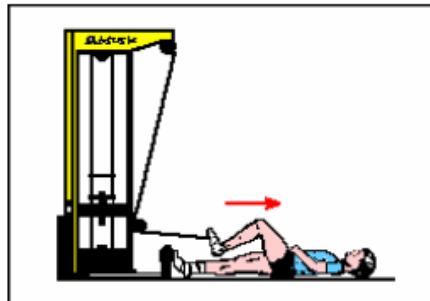
Cet exercice a été retenu parce qu'il sollicite les extenseurs de la hanche (fessiers et ischio-jambiers), groupe musculaire fortement concerné par les contraintes horizontales de la course. L'appui mécanique est proximal (situé à la hanche). L'angle « travaillé » se situe au plus près de l'angle spécifique de la course.

Flexion cheville



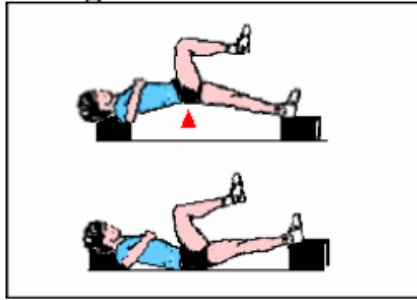
Cet exercice a été retenu parce qu'il sollicite les fléchisseurs de la cheville (Jambier Antérieur), groupe musculaire antagoniste du Triceps Sural participant fortement au gainage de la cheville dans la course.

Flexion membre inférieur



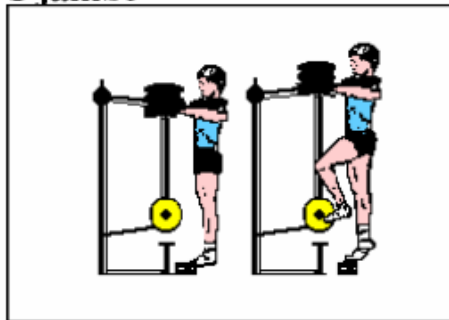
Cet exercice a été retenu parce qu'il sollicite les fléchisseurs de la hanche (Psoas, Droit Antérieur), groupe musculaire antagoniste des extenseurs participant fortement au retour vers l'avant de la jambe après le « quitter » de l'appui.

Extension de hanche allongée



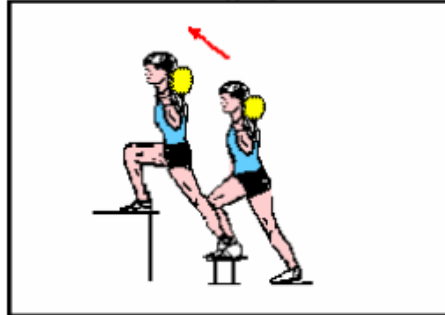
Cet exercice a été retenu parce qu'il sollicite les muscles du plan postérieur. Ce groupe musculaire est fortement sollicité dans la propulsion et participe au maintien des alignements segmentaires dans les phases d'appui.

Extension cheville 1 jambe



Cet exercice a été retenu parce qu'il sollicite les extenseurs de la cheville (Triceps Sural). Ce groupe musculaire est l'agoniste principal de la cheville dans l'appui : il résiste à son effondrement et inverse le mouvement vertical dans une activité pliométrique.

Fente avant montée sur banc



Cet exercice a été retenu parce qu'il sollicite les extenseurs du segment d'appui tout en favorisant une progression vers l'avant du coureur, ce qui sollicite plus particulièrement les extenseurs de la hanche.

- **La Programmation**

La période de huit semaines a été décomposée en 4 cycles de 2 semaines.

Cycle 1 : Familiarisation avec les exercices, apprentissage des réalisations correctes et travail en puissance sous-maximale (charge à 45-50 % de 1RM mobilisée à vitesse réduite.)

Cycle 2 : Cycle de transition préparatoire au travail de Force maximale. L'objectif est le développement de la Puissance-Force (mobilisation de charges comprises entre 45 et 65 % de 1RM à vitesse maximale)

Cycle 3 : Cycle de Force maximale, les charges sont supérieures à 80 % de 1RM, les séries sont très courtes (2 à 3 répétitions) et la récupération entre les séries est importante (4 à 5 minutes effectives).

Cycle 4 : Cycle de développement de l'explosivité, à l'aide principalement du procédé de « contraste de charge ». Le coureur mobilise sans temps d'arrêt 2 types de charge : une lourde (85 % de 1 RM) et une légère (30 % de 1 RM). L'attention est portée essentiellement sur l'exécution très rapide des mouvements exécutés avec charges légères.

B) Résultats

1-Effet de l'entraînement sur les paramètres énergétiques

L'entraînement combiné n'a eu aucun effet sur la $v\dot{V}O_{2max}$, le $\dot{V}O_{2max}$, le CE ou la vitesse au seuil lactique (tableau 8).

Tableau 8 : Effets de l'entraînement sur la masse, la vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène ($v\dot{V}O_{2max}$), la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), le coût énergétique (CE), la vitesse au seuil lactique (V_{SL}), le pic de concentration de lactatémie après le 3000m (La Max) et le temps sur le dernier tour du 3000 m.

	Groupe expérimental (n= 6)		Groupe contrôle (n= 4)	
	Pre	Post	Pre	Post
Masse (kg)	63,3 ± 4,4	63,8 ± 4,5	65,0 ± 3,5	66,2 ± 4,3
$\dot{V}O_{2max}$ (ml.kg⁻¹.min⁻¹)	60,6 ± 4,4	62,7 ± 5,4	65,6 ± 10,0	70,1 ± 15,3
$v\dot{V}O_{2max}$ (km.h⁻¹)	20,1 ± 0,8	20,2 ± 0,6	19,0 ± 0,8	19,5 ± 0,7
V_{SL} (km.h⁻¹)	17,9 ± 1,0	18,4 ± 1,0	16,3 ± 0,9	16,2 ± 1,0
CE (ml.m⁻¹.kg⁻¹)	0,196 ± 0,017	0,195 ± 0,023	0,220 ± 0,030	0,220 ± 0,067
La Max (mmo.l⁻¹)	12,1 ± 2,6	13,0 ± 2,5	13,2 ± 2,2	12,6 ± 0,6
Temps du dernier tour (s)	54,1 ± 3,2	52,9 ± 2,6	60,3 ± 2,8	58,6 ± 1,2

La remarque qui s'impose à ce niveau est la suivante : nous n'avons pas mis en évidence que le travail combiné en force et en endurance participe à un accroissement significatif des paramètres métaboliques mais nous mettons en évidence que ce type de travail ne nuit pas au maintien de leur niveau initial.

2-Effet de l'entraînement sur les paramètres mécaniques

Pour le groupe expérimental (figure 17), comme pour le groupe contrôle, l'entraînement n'a pas eu d'effet sur le temps de contact (respectivement p = 0,4 et p = 0,4), le temps de vol

(respectivement $p = 0,8$ et $p = 0,9$), la fréquence (respectivement $p = 0,1$ et $p = 0,8$), l'amplitude de pas (respectivement $p = 0,9$ et $p = 0,06$) ou la vitesse de course (respectivement $p = 0,8$ et $p = 0,5$). Conformément à la consigne, tous les coureurs ont accéléré dans le dernier tour du 3000 m ($p < 0,001$).

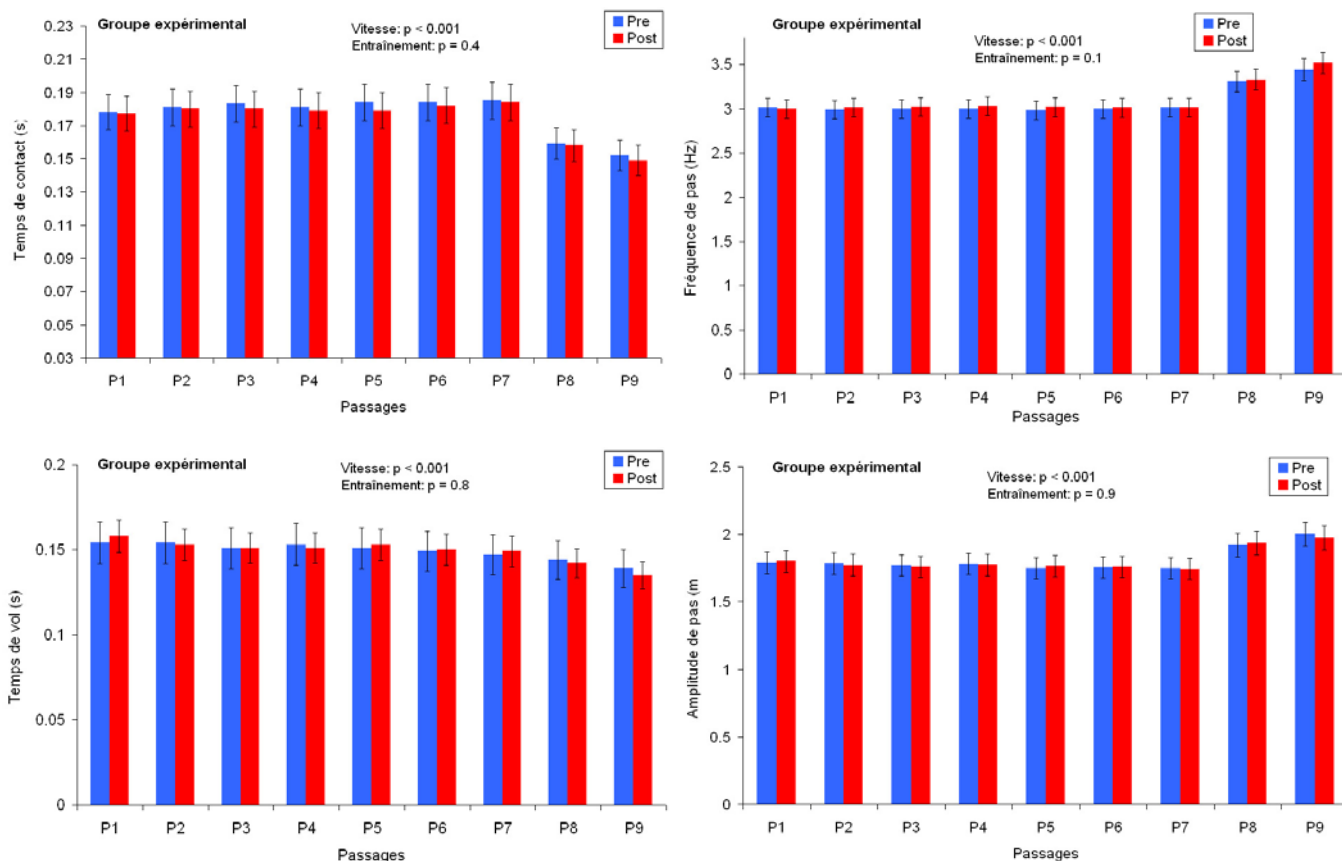


Figure 21 : Effet de la vitesse et de l'entraînement sur le temps de contact, le temps de vol du pied, la fréquence et l'amplitude de pas, pour le groupe expérimental.

Ces mesures ont été fournies par l'optojump (microgate) (figure 21). Les 7 premiers passages sont réalisés à vitesse contrôlée et constante. Il est demandé au coureur d'accélérer juste avant le passage 8, le passage 9 correspondant à la fin de l'épreuve.

La remarque qui s'impose à ce niveau est la suivante : nous mettons en évidence que le travail combiné en force et en endurance participe à un accroissement de la capacité à accélérer sur fond de fatigue. Certes, cet accroissement n'est pas significativement différent de celui du groupe contrôle. Néanmoins, l'accroissement du groupe expérimental, se faisant à partir d'une performance initiale plus élevée (54.1 vs 60.3), apparaît comme

un progrès plus difficile à obtenir, ce dont ne rend pas compte l'estimation statistique. Le travail combiné de force et d'endurance prend ici tout son sens.

3-Effet de l'entraînement sur les paramètres musculaires

Quel que soit le groupe considéré, l'entraînement combiné en force et en endurance n'a modifié significativement aucun des paramètres des tests de force-vitesse mesurés à la presse ou à la hip machine.

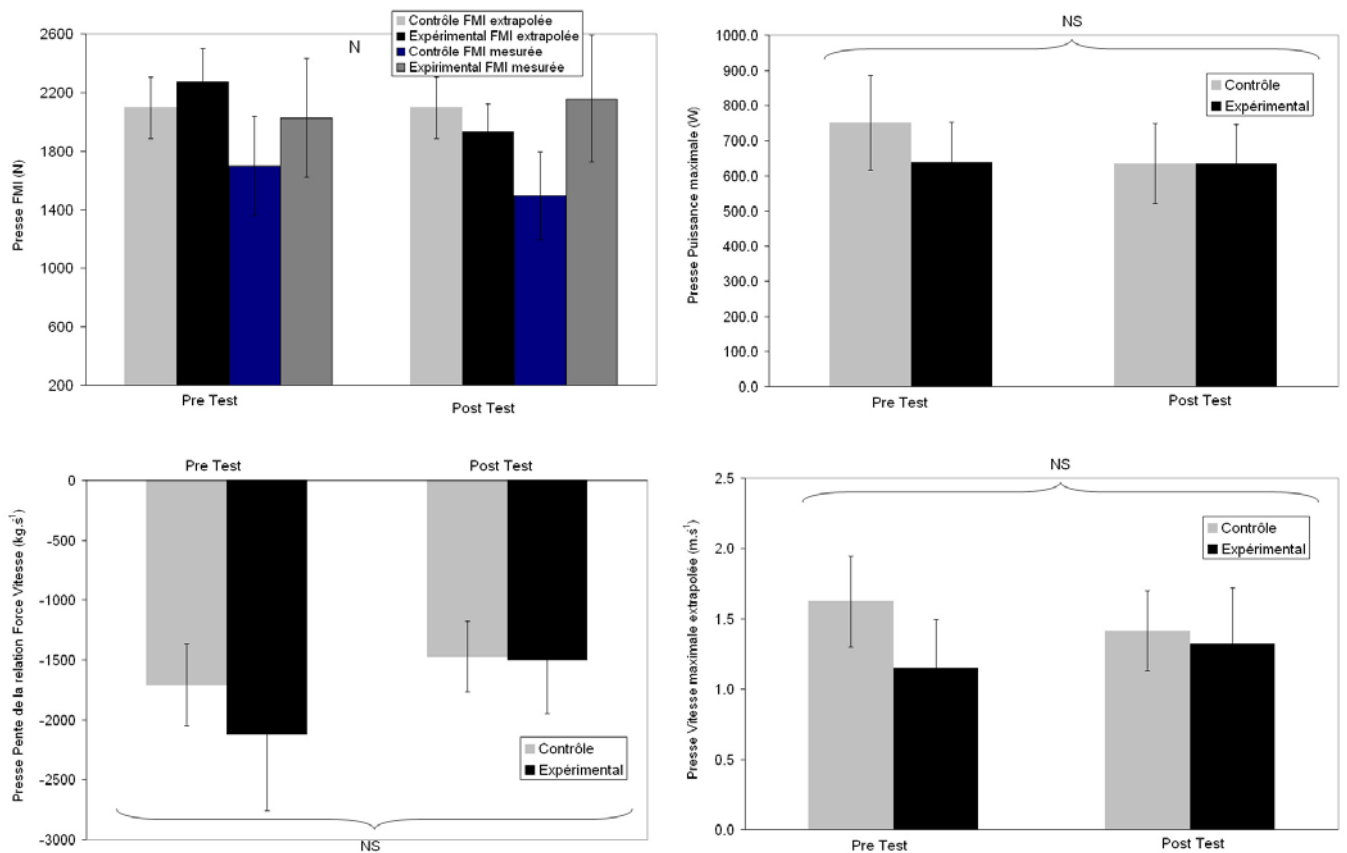


Figure 22 : Effet de l'entraînement pour le groupe contrôle (gris) et expérimental (noir) sur les paramètres mesurés lors du test de force-vitesse à la presse : la force maximale extrapolée et mesurée, le coefficient directeur de la relation force – vitesse, la puissance maximale et la vitesse maximale extrapolée.

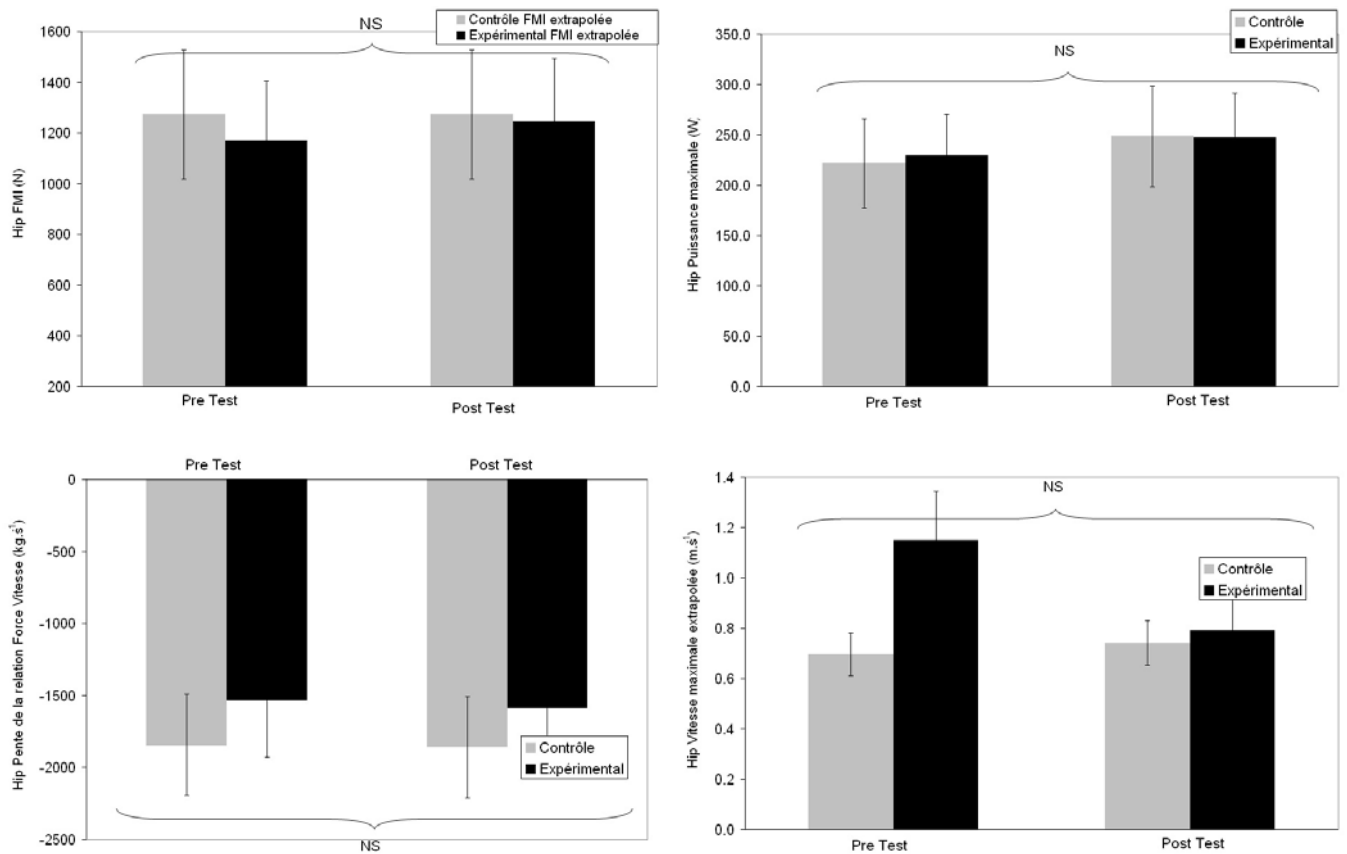


Figure 23: Effet de l'entraînement pour le groupe contrôle (gris) et expérimental (noir) sur les paramètres mesurés lors du test de force-vitesse à la hip machine : la force maximale extrapolée et mesurée, le coefficient directeur de la relation force – vitesse, la puissance maximale et la vitesse maximale extrapolée.

6-Discussion des résultats

A) Effet vitesse

Les présents résultats montrent que la vitesse de course possède un effet sur tous les paramètres mécaniques mesurés. Seule la composante verticale maximale de la force de réaction du sol reste constante avec l'augmentation de la vitesse de course. En effet, pour des coureurs de demi-fond, F_z . max. est égale à environ trois fois le poids de corps du coureur.

Fréquence, amplitude de pas, temps d'appui et temps de vol du pied

Les présents résultats montrent que l'évolution de la fréquence et de l'amplitude de pas (FP et AP) avec la vitesse de course n'est pas linéaire. En effet, cette observation est confirmée par de nombreux auteurs (Dillman 1975 ; Williams 1985 ; Cavanagh et Kram, 1985) et suggère que pour des vitesses de course inférieures à 7 m.s^{-1} , l'augmentation ou la diminution de la vitesse de course dépend principalement de la modification de l'amplitude de pas. Au-delà de 7 m.s^{-1} , l'amplitude de pas n'augmente plus, elle a même tendance à diminuer, alors que la fréquence de pas continue d'augmenter. La modification de la vitesse de course est donc dépendante de la combinaison entre l'amplitude et la fréquence de pas (équation 2). Cependant, ces modifications de fréquence et d'amplitude de pas sont également dépendantes de la modification du temps d'appui et du temps de vol du pied. En effet, l'équation 1 montre que la fréquence de pas dépend du temps d'appui et du temps de vol du pied au sol : plus T_a et T_v sont courts et plus la fréquence de pas est élevée. Les résultats obtenus dans le présent travail montrent clairement que plus la vitesse de course augmente et plus le temps d'appui diminue ($r^2 \approx 1$; figure 4). A chaque vitesse de course étudiée, ce temps d'appui est significativement plus faible qu'à la vitesse précédente et à V_{\max} , il est de l'ordre de 120 ms. A l'inverse, le temps de vol du pied reste constant jusqu'à 7 m.s^{-1} , puis diminue à V_{\max} , cependant la modification de la vitesse de course n'a que peu d'effet sur ce paramètre. Pour des vitesses inférieures à 7 m.s^{-1} , les modifications de AP et de FP sont donc principalement dépendantes de la modification du temps d'appui du pied au sol. Cette diminution de T_a avec l'augmentation de la vitesse de course a pour conséquence de réduire le temps dont dispose le coureur pour produire une force importante. Ainsi, le coureur est confronté à un paradoxe : pour augmenter sa vitesse de course, il doit développer une force de plus en plus importante, mais dans un temps de plus en plus court.

Effet de la diminution du temps d'appui sur $F_z \text{ max}$ et $F_x \text{ max}$

Les effets de la vitesse de course sur les composantes de forces horizontale et verticale de la force de réaction du sol ont fait l'objet de nombreuses études. Munro et al. (1987) ainsi que Nilsson et Thorstensson (1989) montrent que $F_z \text{ max}$ et $F_x \text{ max}$ augmentent avec la vitesse de course. Pour des vitesses de course comprises entre 1,5 et 6 m.s^{-1} , $F_z \text{ max}$ augmente de 2 à 2,9

fois le poids de corps et F_x max est multiplié par 2 à 4 (Nilsson et Thorstensson 1989). Les présents résultats montrent que l'évolution de F_z max et F_x max avec l'augmentation de la vitesse de course est sensiblement différente des résultats obtenus par Munro et al. (1987) ou Nilsson et Thorstensson (1989). En effet, les vitesses de course étudiées dans le présent travail sont comprises entre $4,15 \text{ m.s}^{-1}$ et V_{max} et sont différentes de celles étudiées par Munro et al. (1987). Ainsi, lorsque seules les vitesses similaires entre les études sont prises en compte (entre $4,15$ et $5,71 \text{ m.s}^{-1}$), les présents résultats montrent que F_z max augmente en moyenne de 3 à 3,3 fois le poids de corps et F_x max augmente d'un tiers environ (figures 8 et 9). Pour des vitesses de course similaires, les présents résultats ne sont donc pas différents de ceux obtenus par Munro et al. (1987) ou Nilsson et Thorstensson (1989). Cependant, pour des vitesses de course supérieures à 7 m.s^{-1} , les résultats obtenus dans le présent travail montrent que F_z max ainsi que F_x max n'augmentent plus et atteignent un plateau qui est de l'ordre de 2100 N pour F_z max (soit 3,3 fois le poids de corps) et de 415 N pour F_x max (soit 0,65 fois le poids de corps).

Ainsi, les coureurs de demi-fond, pour augmenter la vitesse de course entre 4 m.s^{-1} et leur vitesse maximale n'augmentent pas F_z max. Seule F_x max augmente mais seulement jusqu'à 7 m.s^{-1} . Ces faibles modifications des niveaux de force engagés dans la course, notamment dans le plan vertical, pourraient être en relation avec la diminution du temps d'appui du pied au sol. En effet, comme cela a précédemment été évoqué, plus le T_a diminue et moins le coureur dispose de temps pour produire une force importante. Sukop et Nelson (1974) ou Thorstensson et al. (1976) montrent que pour développer leur force maximale, la majorité des muscles ont besoin de 300 ms (i.e. les fléchisseurs de l'épaule et les extenseurs du genou). Or dans des activités telles que la course à pied, le temps dont disposent les muscles pour développer leur force maximale est beaucoup plus court puisque le temps d'appui du pied est compris entre 208 ± 22 et 125 ± 13 ms. Donc, lors des mouvements rapides de jambe, plus la vitesse de course augmente et moins les muscles possèdent de temps pour développer une force importante. Ainsi, plus le temps de contact diminue et plus la capacité à produire une force importante dans un temps court est importante. Cette capacité est exprimée par la pente de la relation force-temps (P_z et P_x). Ces paramètres ont des conséquences fonctionnelles importantes car ils déterminent la force qui peut être générée au début de la contraction musculaire (0-200 ms) (Aagaard et al. 2002). Plus ces pentes sont grandes et plus le coureur est capable de produire une force élevée dans un temps court. Les présents résultats montrent que P_z et P_x augmentent jusqu'à 7 m.s^{-1} , puis se stabilisent.

L'augmentation de ces pentes permet au coureur, malgré la diminution du temps d'appui d'augmenter la force produite, sur l'axe antéropostérieur et de la maintenir constante sur l'axe vertical.

Ainsi, pour augmenter sa vitesse de course, le coureur de demi fond augmente son amplitude et sa fréquence de pas. Jusqu'à 7 m.s^{-1} , ces modifications cinématiques sont essentiellement le résultat de la diminution du temps d'appui du pied au sol. Cependant cette diminution du temps d'appui limite la durée de contraction musculaire empêchant les muscles de produire une force importante. Pour compenser cette baisse du temps d'appui, le niveau de force atteint dans un temps donné augmente (i.e. la force explosive). Ainsi, dans le plan vertical, grâce à l'augmentation de P_z , $F_z \text{ max}$ est maintenue constante, malgré la diminution du temps d'appui. Sur l'axe horizontal, P_x ainsi que $F_x \text{ max}$ augmentent jusqu'à 7 m.s^{-1} . Au-delà de cette vitesse, le temps d'appui continue à diminuer, mais P_z , P_x ainsi que $F_z \text{ max}$ et $F_x \text{ max}$ restent constants. Pour atteindre la vitesse de course maximale, d'autres modifications mécaniques doivent donc intervenir.

Hypothèse de la raideur

La raideur du coureur a été évoquée comme un paramètre qui jouerait un rôle majeur dans le maintien de la vitesse maximale atteinte lors d'un 100 mètres (Bret et al. 2002). Ces auteurs, ainsi que Chelly et Denis (2001), suggèrent que même si une grande puissance musculaire est nécessaire pour maintenir une vitesse maximale de course élevée, la capacité à produire un rebond raide est également déterminante. Les présents résultats confirment ces résultats en montrant que la raideur verticale du coureur (K_{vert}) augmente de manière quadratique avec la vitesse de course (McMahon et Cheng, 1990). Plus la vitesse de course augmente et plus le déplacement vertical du centre de masse (Δz) diminue. $F_z \text{ max}$ restant constante, K_{vert} augmente.

En conclusion, les présents résultats montrent que pour augmenter la vitesse de course, la modification des forces développées durant l'appui du pied au sol n'est pas le seul paramètre déterminant. En effet, la capacité du coureur à générer une force importante dans un temps très court apparaît également comme un paramètre essentiel de la production de vitesse. Cependant, les coureurs testés étant des coureurs de demi-fond, il serait intéressant de mesurer, chez des

coureurs plus rapides, si ce paramètre possède un impact plus important sur la production de vitesse. Enfin, la raideur du coureur est également un élément important mais surtout pour des vitesses de course élevées car elle limite le déplacement vertical du centre de masse. D'autres études sont cependant nécessaires pour mieux comprendre les adaptations à l'entraînement de ces différents paramètres.

B) Fatigue

Le propos de cette étude était de mesurer les effets de la fatigue sur les paramètres du modèle masse-ressort. Les résultats obtenus montrent que sur la piste, la raideur reste constante après un exercice épuisant de 2000 m. De plus, la raideur (K_{leg}) est significativement corrélée au coût énergétique (CE). Cependant cette corrélation est uniquement observée durant le 2000 m. Avant et après cet exercice, il n'y a aucune corrélation entre ces paramètres.

Effets de la fatigue

Au regard de la littérature, seulement une étude a mesuré les effets de la fatigue sur la raideur verticale et de la jambe (K_{vert} et K_{leg}). Dutto et Smith (2004) ont montré que K_{leg} et K_{vert} diminuaient significativement de 9,3 à 9,0 $kN.m^{-1}$ pour K_{leg} et de 23,9 to 23,1 $kN.m^{-1}$ for K_{vert} . Les principaux résultats de la présente étude montrent que K_{leg} et K_{vert} restent constantes après une course épuisante. Ces différences peuvent être expliquées par la méthode de mesure utilisée. Premièrement Dutto et Smith (2004) ont mesuré K_{leg} et K_{vert} toutes les 5 min durant la totalité de la durée de l'exercice exhaustif. Dans le présent travail, la raideur a été mesurée avant et juste après un exercice épuisant réalisé sur piste. Deuxièmement, la durée de l'exercice n'était pas la même. En effet, dans notre travail, cette durée était de 6 min \pm 33 s, alors que dans le travail de Dutto et Smith (2004), elle était en moyenne 57 \pm 19 min. Six minutes d'exercices ne sont peut-être pas suffisantes pour produire assez de contractions excentriques et modifier les propriétés élastiques du muscle. En effet, dans leur étude, Dutto et Smith montrent que la modification de la raideur survient aux alentours de 14 min d'exercice. Troisièmement, la course sur tapis roulant induit des adaptations mécaniques spécifiques et particulièrement en état de fatigue (Elliott et Blanksby, 1976 ; Gazeau et coll., 1997 ; Wank et coll., 1998). De plus ces adaptations concernent

la fréquence de pas et l'amplitude des déplacements verticaux du centre de masse (Wank et coll., 1998). Une variation de ce paramètre entre le tapis roulant et la piste, surtout en état de fatigue pourrait influencer la mesure de la raideur du coureur. Donc, sur la piste, les effets de la fatigue sur la raideur pourraient être différents de ceux observés sur tapis roulant. Les différences observées entre les deux études pourraient être expliquées par les protocoles de mesures utilisés et par les adaptations mécaniques spécifiques induites par la course sur tapis roulant.

Les études sur les effets de la fatigue sur les paramètres mécaniques suggèrent que les modifications de la foulée observées en fin d'exercice permettent de maintenir l'intensité de l'exercice (Cavanagh et coll., 1985 ; Elliott et Roberts, 1980 ; Gazeau et coll., 1997 ; Siler et Martin, 1991 ; Williams et coll., 1991). Sur tapis roulant, ces études montrent que la fatigue induit une augmentation de la longueur de pas et une diminution de la fréquence de pas. Cette augmentation est associée à une modification des temps de contact.

En ce qui concerne l'augmentation du CE après l'exercice épuisant, elle pourrait être expliquée par une augmentation de la ventilation, la restauration des réserves en phosphate et la transformation du lactate, accumulé pendant l'exercice, en glycogène, CO₂ et H₂O (Borsheim et Bahr, 2003). Cependant, les paramètres mécaniques n'expliquent pas cette augmentation.

Relation entre la raideur et le CE

De nombreuses études (Craib et coll., 1996 ; Dalleau et coll., 1998 ; Gleim et coll., 1990 ; Heise et Martin, 1998 ; Spurr et coll., 2003) ont observé une relation directe entre la flexibilité des membres inférieurs et la demande aérobie. Ces études suggèrent que les coureurs les moins « élastiques » avaient un cycle étirement-détente plus efficace et donc un coût énergétique plus faible. Un cas extrême a été étudié par McMahon et coll., (1987) qui examinèrent la mécanique et la demande énergétique de la course avec les genoux exagérément fléchis (la course de Groucho). Les résultats ont montré que la diminution de la raideur du coureur est associée à une augmentation de plus de 50% du CE. Les auteurs font l'hypothèse que l'augmentation du CE est liée à une utilisation supplémentaire de force pour maintenir le genou en position exagérément fléchi. Bien que la raideur ne soit pas artificiellement diminuée dans la présente étude, la relation inverse obtenue entre la raideur et le CE est en accord avec l'hypothèse de McMahon et coll., (1987).

Cependant cette relation n'est significative que lorsque le CE et la raideur sont mesurés pendant l'exercice exhaustif. De manière surprenante, ces deux paramètres ne sont pas corrélés pour des vitesses de course plus faibles (avant ou après l'exercice). La relation inverse obtenue entre la raideur et le CE pourrait donc dépendre de l'intensité de l'exercice. En effet, le 2000 m est réalisé à une vitesse proche de celle qui sollicite la consommation maximale d'oxygène, alors que la vitesse avant et après le 2000 m était 30% plus faible.

Lors d'un exercice d'intensité constante, de cyclisme ou de course à pied, une augmentation lente de c apparaît après la 3^{ème} minute d'exercice (Billat et coll., 1998 ; Gaesser et Poole, 1996). Ce phénomène est appelé composante lente de $\dot{V}O_2$ et il induit une augmentation du CE entre la 3^{ème} minute et la fin de l'exercice. De nombreux facteurs physiologiques ont été étudiés pour expliquer cette augmentation de CE entre la 3^{ème} minute et la fin de l'exercice. Cependant, les facteurs biomécaniques sont peu évoqués pour expliquer cette composante lente. Récemment, Borrani et coll. (2003) ont montré que l'augmentation du CE n'est pas liée à une modification du travail mécanique externe. Cependant, les changements observés dans certains paramètres mécaniques (fréquence de pas et temps de contact) suggèrent que la raideur des membres inférieurs pourrait être associée à l'augmentation du CE observée lors d'un exercice d'intensité supérieure au seuil lactique. Dans la présente étude, la relation inverse durant le 2000 m observée entre la raideur et le CE est en accord avec l'hypothèse de Borrani et coll. (2003).

Pour conclure, l'augmentation du CE après un exercice exhaustif sans modification de la raideur, montre que l'augmentation du CE n'est pas liée à la raideur du coureur. Cependant, la corrélation inverse entre le CE et la raideur observée durant la course sur 2000 m suggère que la raideur du coureur pourrait être associée à la composante lente de $\dot{V}O_2$ plutôt qu'au coût énergétique.

C) Effet entraînement

Mécanismes explicatifs des adaptations neuromusculaires

Cependant, les mécanismes explicatifs des adaptations liés aux effets de l'entraînement en force sont encore mal connus. Paavolaïnen et al. (1999) font l'hypothèse que les modifications observées suite à un entraînement combiné seraient liées à une amélioration des caractéristiques neuromusculaires en rapport avec des adaptations neuronales. En effet, il semble que le système

nerveux joue un rôle important, notamment dans la régulation de la raideur musculaire et l'utilisation de l'élasticité musculaire lors du cycle étirement-détente (Kyröläinen et al. 1991). Cependant, les adaptations neuromusculaires suite à un entraînement combiné en force et en endurance ne sont pas bien comprises. Généralement, les différentes études mesurent soit les adaptations de l'activité des unités motrices suite à un entraînement en force seul, soit suite à un entraînement en endurance seul. Après un entraînement en force, le signal intégré de l'EMG atteint durant une contraction isométrique maximale, augmente (Hakkinen et al. 1985b ; Moritani et De Vries 1979) ou reste stable (Garfinkel et Cafarelli 1992 ; Thorstensson et al. 1976). De manière similaire, les adaptations neuro-musculaires, suite à un entraînement en endurance, consistent en une diminution du recrutement des unités motrices pour produire la même puissance (Cafarelli et al. 1995). A notre connaissance, une seule étude a mesuré les effets d'un entraînement combiné en force et en endurance sur le recrutement neuromusculaire (McCarthy et al. 2002). Ces auteurs montrent que le niveau d'activation, suite à un entraînement combiné reste stable. Cependant, ces mesures ont été réalisées lors d'un exercice isométrique d'extension du genou et suite à un entraînement en endurance réalisé sur bicyclette ergométrique.

En conclusion générale, cette étude montre que la capacité du coureur de demi-fond à accélérer, à faire varier sa vitesse de course en fonction des exigences de la tactique reste sous la dépendance des deux facteurs essentiels que sont d'une part, les réserves et la mise en jeu rapide des énergies métaboliques et d'autre part, des capacités neuro-musculaires accrues qui optimisent la mise en œuvre des impulsions de force régissant sa course.

Bibliographie

1. **ARABI H., VANDEWALLE H, PITOR J., De LATTRE J., MONOD H.** (1997) - Relationship between maximal oxygen uptake on different ergometers, lean arm volume and strength in paraplegic subjects- Eur. J.Appl.Physiol. 76 : 122-127
2. **AUBERT F.** (1999) L'entraînement des ischio-jambiers du sprinter au-delà du renforcement musculaire. AEFA 153, 8-12
3. **BILLAT V., PINOTEAU J., PETIT B., RENOUX J.C., KORALSZTEIN JP.** (1994) -Reproducibility of running time to exhaustion at $\dot{V}O_2\text{max}$ in sub-elite runners- Med. Sci. Sports Exercise., 26, 254-257
4. **BISHOP D., JENKINS D.G., MACKINON L.T., McENEIRY M., CAREY M.F.** (1999) -The effects of strength training on endurance performance and muscle characteristics- Med. Sci. Sports Exerc. 31 : 886-891
5. **CHASSAING P., P. CAMPILLO, V. BILLAT** (Soumis) Une méthode simple d'évaluation de la fonction musculaire balistique par l'analyse de la performance de saut.
6. **DELECLUSE C.** (1997) -Influence of strength training on sprint running performance- Sports Med 24 : 147-156
7. **DUDLEY G.A. et RUSDAN D.** (1985) -Incompatibility of endurance and strength-training modes of exercise- J.Appl.Physiol. 59 : 1446-1451
8. **FATOUROS I.G., A.Z. JAMURTAS, D. LEONTSINI, K. TAXILDARIS, N. AGGELOUSIS, N. KOSTOPOULOS, P. BUCKENMEYER** (2000) Evaluation of plyometric exercise training, weight training, and their combination on vertical jumping performance and leg strength J Strength Cond Res 14, 470-476

9. **GACON G.** (1997) Amélioration de la force de l'appui et entraînement chez le coureur de demi-fond. AEFA 146, 19-25
10. **GAJER B.** (1996) Renforcement musculaire de la foulée et course de demi-fond. AEFA 144, 15-17
11. **GAZEAU F.** (1996) Renforcement local des groupes musculaires intervenant dans le retour de la jambe libre en course de vitesse. AEFA 142, 34-37
12. **HAKKINEN K., KOMI P.V., ALEN M.** (1985a) -Effect of explosive type strength training on isometric force and relaxation time, electromyographic and muscle fibre characteristics of leg extensor muscles- Acta Physiol Scand 125 : 587-600,
13. **HAKKINEN K., ALEN M., KOMI P.V.** (1985b) -Changes in isometric force and relaxation time, electromyographic and muscle fiber characteristics of human skeletal muscle during strength training and detraining- Acta Physiol Scand 125 : 573-585
14. **HANON C., THEPAUT-MATHIEU C., HAUSSWIRTH C., LE CHEVALIER J.M.** (1998) -Electromyogram as an indicator of neuromuscular fatigue during incremental exercise- Eur J.Appl.Physiol.
15. **KYROLAINEN H., BELLI A., KOMI P.V.** (2001) -Biomechanical factors affecting running economy- Med. Sci. Sports Exerc. 33 : 1330-1337
16. **KYROLAINEN H., KOMI P.V., BELLI A.** (1999) -Changes in muscle activity patterns and kinetics with increasing running speed- J Strength Cond Res 13, 400-406
17. **LEVERITT M., P.J. ABERNETHY, B.K. BARRY, P.A. LOGAN** (1999) - Concurrent strength and endurance training. A review- Sports Med 28, 413-427

18. **MARCINIK E.J., POTTS J., SCHLABACH G., WILL S., DAWSON P. HURLEY B.F.**(1991) -Effects of the strength training on lactate treshold and endurance performance- Med. Sci. Sports Exerc 23 : 739-743
19. **MERO A. et KOMI V.** (1994) -EMG, force, and power analysis of sprint-specific strength exercises- Journal of Applied Biomechanics 10 : 1-13
20. **MICHAILIDIS C., A. PASIDIS, E. BASSA, G. PAPAIAKOVOU, I. KOLLIAS, C. KOTZAMANDIS** (2000) -The effect of combined strength (of high intensity) and speed training program on the strength and running speed of amateur soccer players- 5th annual congress of the european college of sport science pp 494
21. **NAGANO A. et GERRITSEN G.M.** (2001) -Effects of neuromuscular strength training on vertical jumping performance-a computer simulation study- Journal of Applied Biomechanics 17 : 113-128
22. **PAASUKE M., ERELINE J., GAPEYEVA** (2001) -Knee extension strength and vertical jumping performance in Nordic combined athletes- J Sports Med Phys Fitness 41: 354-361
23. **PAAVOLAINEN L., HAKKINEN K., HAMALAINEN I., NUMMELA A., RUSKO H.** (1999) -Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power- J.Appl.Physiol. 86 : 1527-1533
24. **TANAKA H. et SWENSEN T.** (1998) -Impact of resistance training on endurance performance- Sports Med 25 : 191-200

Résumé

L'objectif de ce travail a été de **mettre au point un programme de musculation adapté aux exigences de la course de demi-fond**. Pour atteindre cet objectif, il a fallu envisager quatre étapes :

- 1- Identifier les paramètres mécaniques des forces appliquées au sol en course, mesurer les effets de la vitesse de course sur leur valeur et étudier leurs relations avec la force des extenseurs des membres inférieurs évaluée sur les appareils de musculation.
- 2- Mesurer les niveaux d'activations musculaires en course à différentes vitesses et comparer ces niveaux d'activation à ceux obtenus lors d'exercices de renforcement des extenseurs des membres inférieurs.
- 3- Déterminer les effets de la fatigue induite par un 2000 mètres sur les forces développées en course.
- 4- Analyser les effets d'un entraînement combiné en force et en endurance sur les capacités du coureur à accélérer en état de fatigue.

Pour chaque étape, une dizaine de coureurs de demi-fond ont participé à l'étude. Les différents tests étaient composés de deux séquences.

Une première séquence où les coureurs réalisaient :

- Un test de course permettant de mesurer la consommation maximale d'oxygène, la vitesse associée à cette consommation maximale et la vitesse associée au seuil lactique.
- Un test à allure constante durant lequel différents paramètres mécaniques (force, impulsion, temps d'appui et de vol, fréquence, amplitude de pas) étaient recueillis.

Une deuxième séquence où les coureurs réalisaient :

- Un test de force isométrique maximale.
- Un test de charge-vitesse à la presse et à la hip machine (extension de la hanche)

Les résultats montrent que :

- 2- Sur l'axe antéropostérieur, afin de relancer le mouvement sur l'horizontale, les coureurs doivent développer leur force d'extension de hanche le plus rapidement possible dans un contexte de résistance faible. Sur l'axe vertical, les coureurs doivent résister aux contraintes verticales (s'opposer au poids de leur corps et inverser la quantité de mouvement vertical) ; ces exigences mécaniques impliquent de posséder une force isométrique importante.
- 3- Les résultats de l'étude électromyographique confirment que l'entraînement en force pourrait donc s'établir autour de contractions concentriques à vitesse maximale pour les muscles extenseurs de la hanche et de contractions isométriques pour les muscles extenseurs des membres inférieurs. Ceci nous amène à formuler l'idée suivante : les muscles extenseurs de la hanche sont impliqués dans une bi-fonctionnalité : ils doivent à la fois participer à la résistance à l'écrasement (la hanche ne doit pas se fléchir) et en même temps ils doivent animer la hanche dans une extension rapide. Ce groupe musculaire doit-il être capable de se raccourcir rapidement sur des niveaux de tension mécanique élevés ?
- 4- La fatigue induite par une course de 2000 mètres n'a pas d'effet sur les paramètres mécaniques de la foulée (temps d'appui, de vol, force de réaction du sol, raideur, impulsion).
- 5- L'entraînement combiné en force et en endurance améliore la performance.