



Altération des performances neuromusculaires après un exercice physique prolongé. Analyse comparée d'une épreuve de marathon et de triathlon

Christophe Hausswirth, R. Lepers

► To cite this version:

Christophe Hausswirth, R. Lepers. Altération des performances neuromusculaires après un exercice physique prolongé. Analyse comparée d'une épreuve de marathon et de triathlon. Movement & Sport Sciences - Science & Motricité, 1998, 34, pp.37-43. hal-01781763

HAL Id: hal-01781763

<https://insep.hal.science/hal-01781763>

Submitted on 30 Apr 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.

Altération des performances neuromusculaires après un exercice physique prolongé. Analyse comparée d'une épreuve de marathon et de triathlon

R. Lepers ¹ C. Hausswirth ²

¹ Groupe analyse du mouvement, UFR STAPS Campus universitaire, BP 138, 21004 Dijon Cedex (France)

² Laboratoire biomécanique et physiologie, INSEP, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris (France)

Résumé

L'objet de cette étude était de comparer les effets d'un triathlon et d'un marathon sur les performances neuromusculaires de types isométrique et dynamique. Sept triathlètes ont réalisé : un triathlon de 2 h 15 mn (30 minutes de natation, 60 minutes de cyclisme et 45 minutes de course à pied), une course marathon de 2 h 15 mn et une course à pied contrôle de 45 minutes à une allure correspondant à celle maintenue lors du triathlon. Les résultats montrent une réduction du temps d'endurance isométrique des muscles extenseurs du genou (35 % de la force maximale volontaire) de 41 ± 24 % après le triathlon et de 59 ± 19 % après le marathon. On observe aussi une diminution de l'élévation du centre de gravité lors des sauts avec contre-mouvement plus importante après le marathon (-12 ± 1 cm) qu'après le triathlon ($-2,5 \pm 0,5$ cm). L'analyse détaillée de la cinétique des sauts révèle des modifications lors de la phase de flexion dont une partie correspond à un travail excentrique des quadriceps. Des sollicitations de type excentrique associées à des contraintes mécaniques plus importantes lors du marathon pourraient expliquer en partie la plus grande altération des performances après le marathon. Mots clés : Détente / Saut avec contre-mouvement / Contraction isométrique / Fatigue / Excentrique

Abstract

The aim of this study was to compare the effects of a marathon and a triathlon on isometric and dynamic neuromuscular performances. Seven triathletes took part in 3 experimental situations : a 2 h 15 mn triathlon (TRI) (30 min swimming, 60 min cycling and 45 min running), a 2 h 15 mn marathon (MA) and a 45 min isolated run done at triathlon speed. The results showed a reduction of the isometric endurance time for knee extensor muscles (35 % of maximal voluntary contraction) after TRI (41 ± 24 %) and after MA (59 ± 19 %). The height of rise of the center of gravity of the counter-movement jumps (CMJ) was also significantly lower after MA (-12 ± 1 cm) than after TRI ($-2,5 \pm 0,5$ cm). Kinetic analysis of the CMJ showed changes during the flexion phase where quadriceps act in part eccentrically. More eccentric contractions and mechanical constraints during the marathon may explain the greater alterations of performances after the marathon. **Key-words** : Jump test / Counter-movement jump / Isometric contraction / Fatigue / Eccentric

Introduction

Si les conséquences systémiques de l'exercice prolongé ont fait l'objet de nombreuses études, les altérations de l'effecteur musculaire au décours des épreuves de longue durée sont, quant à elles, plus mal connues. Des résultats antérieurs établis par Hausswirth *et coll.* (1996, 1997) ont montré qu'une épreuve de course à pied prolongée (2 h 15) entraînait de plus grandes perturbations physiologiques et biomécaniques qu'un triathlon de même durée. Ces auteurs ont mis en évidence, par exemple, que le coût énergétique (exprimé en $\text{mLd'O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1}$) en fin de marathon était plus élevé que durant la phase pédestre terminale du triathlon. Les paramètres du mouvement sont aussi différents : les sujets adoptant en fin du marathon une plus grande fréquence de foulée en comparaison de celle utilisée lors du triathlon. L'ensemble des résultats tendent donc à montrer que l'efficacité de course est plus altérée en fin de marathon qu'en fin de triathlon.

Les territoires musculaires des membres inférieurs sont impliqués différemment en triathlon et en marathon et leurs modes de sollicitation sont différents, excepté au cours de la partie pédestre du

triathlon. On peut dès lors s'interroger sur les effets de ces deux types d'exercices sur les performances neuromusculaires des membres inférieurs. L'altération des capacités contractiles musculaires a été observée aussi bien après des exercices sollicitant de façon intensive mais relativement brève un groupe musculaire des membres inférieurs (Horita *et coll.*, 1996 ; Nicol *et coll.*, 1996) ou supérieurs (Gollhofer *et coll.*, 1987), qu'après des exercices prolongés sollicitant la filière aérobie : marathon (Sherman *et coll.*, 1984 ; Komi *et coll.*, 1986 ; Nicol *et coll.*, 1991), triathlon (Guezennec *et coll.*, 1986) ou ski de fond (Forsberg *et coll.*, 1979 ; Viitasalo *et coll.*, 1982).

L'exercice physique prolongé affecte d'une part, la capacité à développer une force maximale et, d'autre part, le temps d'endurance musculaire. Sherman *et coll.* (1984) ont mis en évidence, après un effort de type marathon, une réduction de la capacité de travail musculaire (-47 %) et du moment maximal isocinétique (-30 %) des extenseurs du genou. Pour le même type d'exercice, Nicol *et coll.* (1991b) ont trouvé une réduction de 26 % de la force maximale volontaire (FMV) isométrique des extenseurs du genou et une diminution de 39 % du temps de maintien d'une contraction isométrique soutenue à 60 % de la FMV. Guezennec *et coll.* (1986) ont mis en évidence une diminution (-25 %) du temps de travail des extenseurs du genou à puissance maximale après une course de 100 km et un triathlon de durée similaire. Concernant la course à pied prolongée, Nicol *et coll.* (1991a) en examinant les forces de réaction au sol au décours d'un marathon ont mis en évidence une altération de la tolérance aux impacts. Ces observations laissent penser que la fatigue musculaire se traduit par des modifications de la compliance musculaire et, par la même occasion, de la capacité de stockage/restitution de l'énergie élastique par le système musculo-tendineux. Cependant, très peu d'auteurs se sont intéressés aux effets de l'exercice prolongé sur les qualités de détente verticale. Nicol *et coll.* (1991a) n'ont pas observé de baisses significatives des performances lors de sauts réalisés avec un contre-mouvement préalable (CMJ) après marathon alors que d'autres performances (sprint, saut en longueur, saut en contre-bas) diminuaient de façon très nette. Par contre, Nicol *et coll.* (1996) ont observé une réduction significative de l'élévation du centre de gravité de 7 % à 9 % suivant le type de saut, mais après un exercice fatigant de durée relativement courte, constitué d'une répétition de sauts avec rebonds. Paavolainen *et coll.* (1994), quant à eux, ont étudié l'évolution de la hauteur d'un saut, à la fin de chaque palier d'un exercice de course d'intensité progressive, pour deux groupes d'athlètes : sprinteurs et skieurs de fond. Les résultats montrent que les performances des sprinteurs diminuent au cours de l'exercice, alors que celles des athlètes dit endurants sont peu altérées. Les effets de l'effort prolongé sur les qualités de détente restent donc encore mal connus d'autant qu'aucune analyse biomécanique des paramètres des sauts n'a été réalisée.

L'objet de cette étude a donc été de comparer les effets de deux types d'exercices prolongés (triathlon vs marathon), sollicitant différemment les membres inférieurs, sur les performances neuromusculaires : maintien d'une contraction isométrique à 35 % de la FMV et test de détente verticale avec contre-mouvement. D'autre part, afin de tenter d'expliquer les diminutions des performances lors des tests de détente, la cinétique des sauts a aussi été analysée avant (pré) et après (post) chacun des exercices sur plate-forme de forces.

Matériel et méthodes

Sujets

Sept sujets entraînés en endurance (30 ± 3 ans ; $71,5 \pm 2,2$ kg ; $175,1 \pm 3,1$ cm), pratiquant le triathlon (natation, cyclisme, course à pied) depuis au moins 4 ans, ont été volontaires pour participer à cette expérimentation. L'entraînement total hebdomadaire de ces sujets, dans les trois disciplines, était compris entre 10 et 15 heures. Tous les sujets ont effectué préalablement un test de détermination de consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) sur tapis roulant motorisé (type 2500ST, GYMROL, Andrézieux-Bouthéon, France). Les valeurs de VO_{2max} , mesurées avec un système automatique d'analyse des échanges gazeux en circuit ouvert (type CPX, Medical Graphics, Saint-Paul, EU), furent en moyenne égales à $65,3 \pm 6$ mL. min⁻¹ kg⁻¹. Les critères d'atteinte de VO_{2max} utilisés furent : un plateau de VO_2 en dépit d'une augmentation de la vitesse de course, un quotient respiratoire supérieur à 1,1 et une fréquence cardiaque supérieure à 80 % de la fréquence cardiaque maximale prédite (Astrand et Ryhming, 1954).

Protocole

Les sujets ont réalisé un pré-test et trois tests, dans un ordre aléatoire, avec au moins 10 jours de récupération entre chaque test. L'ensemble des expérimentations s'est déroulée à l'Institut National des Sports de l'Education Physique (INSEP, Paris). Le pré-test permit aux sujets de se familiariser avec le protocole (tapis roulant, plate-forme de force, ergomètre isométrique) et les installations sportives (piscine, circuit de cyclisme). Chaque sujet dut réaliser, au cours du pré-test, quelques sauts avec contre-mouvement sur la plate-forme de force, un test de détermination de la force maximale volontaire (FMV) isométrique pour un mouvement d'extension de la jambe ainsi qu'un temps limite de maintien isométrique à 35 % de la FMV qui servit ensuite de temps de référence. Tous ces exercices ont été effectués après un échauffement dynamique standardisé.

La première partie de l'expérimentation consistait à nager 30 minutes en piscine, pédaler 60 minutes sur un circuit extérieur balisé de 3,2 km et enfin courir 45 minutes sur tapis roulant (0 % de pente) à une allure correspondant à 75 % de leur vitesse maximale aérobie, obtenue lors du test de détermination de consommation maximale d'oxygène. Chaque sujet réalisa le triathlon (TRI) comme s'il s'agissait d'une compétition. Les distances moyennes parcourues dans les trois disciplines furent respectivement : natation $1\,433 \pm 322$ m (2,8 km. h⁻¹), cyclisme $34,4 \pm 3,7$ km (34,4 km. h⁻¹), course à pied $10,6 \pm 1,3$ km (14,1 km. h⁻¹).

Le second et le troisième test consistaient en la réalisation, de façon aléatoire, d'un exercice de course à pied de durée identique au triathlon, i.e. 2 h 15 (course marathon, MA), ou d'un exercice de course de 45 minutes sur tapis roulant (course contrôle, CC) correspondant au temps de course lors du triathlon. En ce qui concerne la course marathon, seules les dernières 45 minutes furent réalisées sur tapis roulant, les 90 minutes précédentes furent effectuées sur un circuit extérieur balisé. La distance parcourue par les sujets lors de la course marathon fut en moyenne égale à $31,2 \pm 1,9$ km.

Immédiatement après la fin des trois épreuves TRI, MA et CC, les sujets réalisèrent un test d'endurance isométrique à 35 % de FMV d'un mouvement d'extension de la jambe sur la cuisse. Une série de trois sauts avec contre-mouvement était effectuée avant et après (en moyenne deux minutes après le test d'endurance isométrique) chacune des trois épreuves TRI, MA et CC.

Sauts avec contre-mouvement

Les sujets, mains sur les hanches, effectuèrent une série de trois sauts avec contre-mouvement sur une plate-forme de force (AMTI, LG6-4, Newton, Massachusetts, EU), de dimensions 61 x 122 cm. La composante verticale de la résultante des forces au sol R_z a été enregistrée durant la globalité du mouvement (figure 1). La terminologie utilisée est la suivante :

La phase d'allègement correspond à la première partie de la courbe R_z durant laquelle les valeurs sont inférieures au poids du corps (repérée en noir sur la figure 1). Durant cette phase, le centre de gravité du corps (CdG) est accéléré vers le bas. La phase suivante correspond à une phase de freinage (ou phase de contraction excentrique des quadriceps) du CdG alors que celui-ci continue de progresser vers le bas, ceci jusqu'à la flexion maximale où la vitesse du CdG est nulle. Les valeurs d'impulsion de ces deux premières phases sont égales et opposées puisque l'impulsion totale de cette phase de flexion doit être nulle (vitesses initiale et finale nulles). L'impulsion propulsive du CMJ correspond à la phase d'extension (contraction concentrique des quadriceps), le CdG du corps est alors en accélération vers le haut. La valeur de cette impulsion propulsive est aussi égale à l'impulsion totale du contre-mouvement (flexion + extension).

Le calcul des durées et des valeurs des impulsions au cours des différentes phases du CMJ a été réalisé directement grâce à un logiciel d'exploitation.

L'élévation maximale du centre de gravité $H_{\max}$ au cours du saut a été calculée grâce à la formule de Asmussen et Bonde-Petersen (1974) : $H_{\max} = g \cdot T_{\text{air}}^2 / 8$ (g : accélération de la gravité, T_{air} durée de la phase aérienne du saut). Les résultats ont été analysés en faisant la moyenne des trois sauts.

Contractions isométriques

Les contractions isométriques des extenseurs du genou droit ont été réalisées sur un ergomètre isométrique (SCHNELL, Selephon, Allemagne). Les sujets, assis confortablement dans un siège, étaient sanglés de façon à ce que leur posture reste constante durant le test. Les angles de la hanche et du genou étaient fixés à 100° (180° étant l'extension complète). La force développée lors de la contraction, mesurée par un capteur à jauges de contraintes, pouvait être visualisée en temps réel sur un oscilloscope placé devant les sujets. Lors du pré-test, la meilleure performance après quatre essais de 2 à 3 secondes, séparés de 2 à 3 minutes de récupération, a été prise comme étant égale à la force maximale volontaire. La FMV post-exercice n'a pas été mesurée dans le souci de réduire le plus possible l'intervalle de temps entre l'arrêt des épreuves et les tests d'endurance isométrique et de détente verticale.

Lors du test de maintien isométrique, les sujets devaient maintenir, aussi longtemps que possible, une contraction isométrique correspondant à 35 % de leur FMV (Hauswirth *et coll.*, 1995). Le temps limite de cette contraction sous-maximale du quadriceps était atteint quand le sujet n'était plus capable de maintenir la force correspondante. Durant la totalité du test, les sujets ont été encouragés verbalement par l'expérimentateur. A la fin de l'exercice, l'effort perçu ou RPE (Rating of Perceived Exertion) a été évalué à partir de l'échelle de Borg (1970) comprenant des indices de difficulté croissante allant de 6 à 20.

Traitements statistiques

Les moyennes et écart-types de tous les paramètres ont été calculés pour chaque situation expérimentale. Les différences statistiques entre les conditions pré et post pour un même type d'exercice ou entre les différentes conditions post-exercices (CC, MA et TRI) ont été analysées au moyen d'un test non paramétrique de Mann Whitney.

Résultats

Les performances réalisées lors des sauts avec contre-mouvement sont représentées sur la figure 2. On observe une diminution significative de l'élévation maximale du centre de gravité au cours des sauts de $2,5 \pm 1,3$ cm après le triathlon et de $12,5 \pm 5,6$ cm après le marathon. Cette diminution de la hauteur des sauts correspond à une diminution de la durée de la phase aérienne des sauts (tableau 1).

Les durées des différentes phases du CMJ et les valeurs des impulsions correspondantes, avant et après les trois types d'efforts, sont indiquées dans le tableau 1. La durée totale du CMJ ainsi que les durées des phases d'allègement, de freinage et de propulsion ne sont pas modifiées post-exercice, quel que soit le type d'effort réalisé. On note toutefois une tendance à un accroissement de la durée de la phase de freinage post-exercice. Toutes conditions confondues, la durée de la phase d'allègement représente en moyenne 45 % de la durée totale du CMJ, le freinage : 28 %, et l'impulsion propulsive : 27 %. Par contre, on note une diminution significative des valeurs de l'impulsion correspondant à la phase d'allègement et par conséquent de l'impulsion de freinage du mouvement, après le marathon ($P < 0,01$) et après le triathlon ($P < 0,05$).

La figure 3 représente les valeurs de R_z mesurées à trois instants caractéristiques de la courbe $R_z(t)$ du CMJ : (a) pic négatif correspondant à l'instant où la courbe R_z atteint sa valeur minimale lors de la flexion, (b) début de la phase propulsive i.e. immédiatement après la flexion maximale et (c) lors du pic positif de la phase propulsive i.e. juste avant la phase aérienne. Les valeurs atteintes lors du pic négatif de la courbe R_z sont significativement plus grandes ($P < 0,05$) après le marathon et le triathlon. Ceci correspond à un pic d'accélération du centre de gravité plus important lors de la flexion post-exercice. La force initiale de propulsion qui correspond à la valeur de R_z en début de phase propulsive est plus faible après les efforts prolongés de type marathon et triathlon ($P < 0,01$). Par contre, la valeur maximale atteinte par R_z lors du pic positif en phase de propulsion ne présente pas de différence significative avant et après exercice.

Les résultats concernant les temps limites de contractions isométriques du quadriceps à 35 % de la FMV font apparaître une diminution du temps d'endurance de 41 % après le triathlon et de 59 % après le marathon (tableau 2). Cette différence est significative (MA : $P < 0,01$; TRI : $P < 0,01$) en comparaison de la course contrôle. La perception de l'effort évolue dans le même sens, avec des valeurs de RPE plus élevées en fin de marathon ($P < 0,01$) et de triathlon ($P < 0,05$) toujours en comparaison de la course isolée.

Discussion

Les principaux résultats de cette étude font apparaître une diminution de la hauteur des sauts, ainsi qu'une réduction du temps limite de contraction isométrique à 35 % de la FMV des extenseurs du genou plus marquée après le marathon en comparaison du triathlon. D'autre part, l'analyse détaillée de la cinétique des sauts avec contre-mouvement révèle des modifications significatives post-exercice durant la phase de flexion composée d'une phase d'allègement (relâchement des extenseurs) et d'une phase de freinage (contraction excentrique des extenseurs) ; la phase d'extension ne subissant, quant à elle, que peu de modifications.

Concernant les tests isométriques pré et post-exercice, le niveau absolu de l'intensité de la contraction a été maintenu à 35 % de la FMV mesurée en situation contrôle. Même si la FMV post-exercice n'a pas été mesurée, on peut penser, au regard de certaines études (Forsberg *et con.*, 1979 ; Sherman *et con.*, 1984 ; Guezennec *et coll.*, 1986 ; Nicol *et con.*, 1991), que celle-ci était plus faible ; ainsi le niveau d'intensité de la contraction lors des tests d'endurance post-exercice représentait, en fait, plus de 35 % de la FMV. Une réduction du temps limite de contraction isométrique a déjà été observée après différents types d'exercices prolongés (Forsberg *et coll.*, 1979 ; Sherman *et con.*, 1984 ; Nicol *et con.*, 1991). L'originalité de cette étude réside dans la comparaison entre deux épreuves de même durée (2 h 15), mais sollicitant les territoires musculaires des membres inférieurs différemment. Il apparaît, au vu de nos résultats, qu'une épreuve de course à pied prolongée affecte davantage la capacité de travail musculaire qu'une épreuve de triathlon.

Les résultats concernant l'analyse cinétique des sauts avec contre-mouvement mettent en évidence des modifications post-exercice durant la flexion qui se décompose en deux phases : une accélération du centre de gravité vers le bas puis un freinage de celui-ci avant la flexion maximale. Le résultat le plus intéressant concerne les modifications relatives à l'impulsion lors de la phase d'allègement et donc à l'impulsion de freinage du mouvement (puisque'elles sont égales), après le marathon et après le triathlon. L'impulsion lors de la phase d'allègement correspond à la quantité de mouvement qui est donnée au corps vers le bas, lors du relâchement des extenseurs en particulier. L'impulsion de freinage rend compte, quant à elle, de la capacité de freinage du corps en phase terminale de la flexion ; phase pendant laquelle les extenseurs se contractent de façon excentrique. Si les résultats font apparaître une diminution de la valeur de ces impulsions post-exercice, on observe aussi une augmentation du pic d'accélération initiale du corps vers le bas. Cette dernière observation peut être mise en relation avec la tendance à l'accroissement de la durée de la phase de freinage bien que celle-ci ne soit pas significative. Ainsi, cette modification de la stratégie du contre-mouvement préalable à la phase de propulsion peut être interprétée comme un indice de fatigue musculaire, accrue après le marathon. Cette hypothèse demanderait à être validée par des tests sur ergomètre isocinétique permettant de mesurer la capacité de contraction concentrique et excentrique des extenseurs de la jambe pour différentes vitesses angulaires. Enfin, il a été montré que l'exercice prolongé pouvait avoir des effets sur le contrôle postural et en particulier sur le traitement des informations en provenance des différents capteurs sensoriels (Lepers *et coll.*, 1997). Ainsi, des perturbations de type postural liées à une altération du contrôle des différentes afférences, en particulier proprioceptives, pourraient aussi expliquer une modification de la stratégie des sauts. Le contrôle des différentes angulations (hanche, genou et cheville) pré et post-exercice, qui n'a pas été réalisé dans cette étude, pourrait à ce titre donner des indications intéressantes concernant la posture des sujets durant les sauts.

Il est classiquement admis que les épreuves d'endurance en course à pied sont plus traumatisantes que la combinaison des trois disciplines du triathlon (Von Rensburg *et coll.*, 1986 ; Fellman *et coll.*, 1988). Ceci est vérifié 1) lorsque l'on compare les réponses endocriniennes consécutives à un triathlon

comparées à un marathon de durée identique (Hauswirth *et coll.*, 1996), et 2) lorsque l'on analyse les altérations des paramètres du mouvement qui sont aussi plus marquées lors d'une course de 2 h 15 (diminution de l'angle de flexion du genou durant la phase aérienne, oscillations verticales plus importantes de la cheville, extension plus grande du genou lors de la pose du talon au sol) que lors d'un triathlon de même durée (Hauswirth *et coll.*, 1997). Ces altérations des paramètres de la foulée peuvent aussi être mises en relation avec une modification éventuelle des propriétés élastiques des muscles au cours d'un effort prolongé qui irait, ici, dans le sens d'une augmentation de la compliance musculaire avec la fatigue. Cette hypothèse va dans le même sens que celle de Lensel et Vigreux (1982) pour qui, la fatigue, en réduisant la force musculaire, provoque une augmentation de la compliance et par conséquent diminue la quantité d'énergie élastique stockable.

Il a été aussi rapporté qu'un travail excentrique comme la course à pied induisait des dommages « musculaires », associés à une perméabilité membranaire accrue de la cellule musculaire (Magazanik *et coll.*, 1974) ainsi qu'à une réduction de la capacité de contraction du tissu musculaire (Gunderson *et coll.*, 1983). La fréquence de foulée au décours d'un marathon couru à vitesse constante tendant à augmenter avec la distance parcourue, ceci accentue les contraintes mécaniques en terme de nombre d'impacts au sol (Hauswirth *et coll.*, 1996) mais pas nécessairement en terme d'intensité des forces d'impact car la longueur de la foulée diminue. Une charge de travail excentrique plus importante lors du marathon que lors du triathlon semble dès lors pouvoir expliquer la plus grande altération des performances post-marathon.

Par ailleurs, il apparaît au vu des résultats que les valeurs de R_z mesurées au début de la phase propulsive et immédiatement après la flexion maximale sont plus faibles post-exercice avec une diminution plus marquée après le marathon en comparaison du triathlon. Cette force « propulsive » initiale qui détermine la quantité d'énergie stockée dans les éléments élastiques séries au début de la phase concentrique (Van Ingen Schenau *et coll.*, 1997) est donc un facteur important dans la performance du saut et sa diminution peut expliquer les hauteurs de sauts plus faibles post-exercice. Il est à noter que si la valeur du pic de force R_z en fin de propulsion ne montre a priori pas de différence significative post-exercice, ce qui irait dans le sens d'une moindre altération de la capacité de travail concentrique des extenseurs, les grandes différences pre-exercice dans les valeurs de ce pic de force R_z n'autorisent pas ici cette hypothèse.

Certains auteurs ont aussi montré que les sollicitations intensives du cycle étirement-détente pouvaient diminuer la sensibilité des fuseaux neuro-musculaires et donc avoir des effets sur l'amplitude et les caractéristiques temporelles des différentes composantes du réflexe d'étirement (Gollhofer *et coll.*, 1987 ; Horita *et coll.*, 1996 ; Nicol *et coll.*, 1996). Les résultats vont en général dans le sens d'une réduction de l'amplitude des composantes du réflexe et d'une relative stabilité de leur latence. Cependant, les mécanismes responsables de cette diminution de la sensibilité du réflexe d'étirement restent encore hypothétiques. Dans notre cas de sauts avec contre-mouvement, les modifications des boucles réflexes consécutives à un exercice prolongé ne semblent pas a priori être un facteur déterminant dans l'altération la performance lors des CMJ car la lenteur relative de la phase de flexion et de son enchaînement avec l'extension limite de toute façon l'efficacité du cycle étirement-détente lors du CMJ (Komi et Gollhofer, 1997).

En conclusion, les performances neuro-musculaires, quelles soient de types isométriques ou dynamiques, sont plus altérées après le marathon qu'après le triathlon comme le montrent les résultats concernant les tests de détente verticale et les temps de maintien isométrique à 35 % de la FMV. Ces résultats sont aussi à rapprocher des données obtenues concernant la pénibilité de l'effort (RPE) beaucoup plus importante, elle aussi, après le marathon. L'analyse de la cinétique des CMJ, faisant apparaître des modifications de stratégie durant la phase de flexion, laisse penser que la capacité de production d'un travail excentrique des extenseurs de la jambe est plus altérée après le marathon. Cependant cette hypothèse demanderait à être vérifiée plus précisément au moyen de tests (concentrique versus excentrique) sur ergomètre isocinétique ou par des tests de résistance à différentes charges d'impact (exemple : Drop Jump de différentes hauteurs) qui pourraient donner d'autres informations sur les problèmes potentiels de travail excentrique. Les mécanismes par lesquels les sollicitations répétées du cycle étirement-détente lors d'une course à pied prolongée peuvent affecter les

caractéristiques neuromusculaires et/ou proprioceptives, restent hypothétiques et demandent encore à être explorés.

Les auteurs tiennent à remercier Jacques Quièvre du Laboratoire de Biomécanique de l'INSEP pour ses conseils lors de l'interprétation des résultats.

Bibliographie

ASMUSSEN E, BONDE-PETERSEN F (1974) Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol Scand* 91 : 385-392.

ASTRAND PO, RYHMING I (1954) A monogram for calculation of aerobic capacity from pulse rate during submaximal work. *J Appl Physiol* 7 : 218-222.

AURA O, KOMI PV (1986) The mechanical efficiency of locomotion in men and women with special emphasis on stretch-shortening cycle exercise. *Eur J Appl Physiol* 55 : 37-43.

BORG GAV (1970) Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehab Med* 2 : 92-98.

BOSCO C, MONTANARI G, RIBACCHI R, GUOVENALI P, LATTER S (1987) Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetic cost of running. *Eur J Appl Physiol* 56 : 138-143.

CAVAGNA GA (1968) Travail mécanique dans la marche et dans la course. *Journal de Physiologie*, Paris 61 : 3-42.

CAVAGNA GA, KANEKO M. (1977) Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J Physiol* 268 : 467-481.

FELLMAN N, SAGNOL M, BEDU M, FALGAIRETTE G, VAN PRAAGH E, GAILLARD G, JOUANEL P, COUDERT J (1988) Enzymatic and hormonal responses following a 24 h endurance run and a 10 h triathlon race. *Eur J Appl Physiol* 57 : 545-553.

FORSBERG A, TESCH P, KARLSSON J (1979). Effect of prolonged exercise on muscle strength performance. In E Asmussen et K Jorgensen. Biomechanics VI (A). Baltimore : University Park Press 6 : 62-67.

GOLLHOFER A, KOMI PV, FUJITSUKA N, MIYASHITA (1987) Fatigue during stretch-shortening cycle exercises. II. Changes in neu-

romuscular activation patterns of human skeletal muscle. *Int J Sports Med* 8 : 38-47.

GUEZENNEC CY, GIAOUI M, VOIGNIER JP, LEGRAND H, FOURNIER E (1986) Evolution des taux plasmatiques des LDH (lacticodehydrogénase), CPK (créatine phosphokinase) et de la myoglobine à l'issue d'une course de 100 km et d'un triathlon. *Science & Sports* 1 : 255-263.

GUNDERSON HM, PARLIMAN JA, PARKER JA, BELL G (1983) Membrane permeability changes as a fatigue factor in marathon runners. In : HG Knuttgen et coll. The biochemistry of exercise. Champaign, IL. Human Kinetics Publishers 13 : 877-881.

HAUSSWIRTH C, BIGARD AX, LEPERS R, BERTHELOT M, THOMAIDIS M, GUEZENNEC CY (1995) Sodium citrate ingestion and muscle performance in acute hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol* 71 : 362-368.

HAUSSWIRTH C, BIGARD AX, BERTHELOT M, THOMASIDIS M, GUEZENNEC CY (1996) Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 17 : 572-577.

HAUSSWIRTH C, BIGARD AX, GUEZENNEC CY (1997) Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 18 : 1-10.

HORITA T, KOMI PV, NICOL C, KYROLAINEN H (1996) Stretch shortening cycle fatigue : interactions among joint stiffness, reflex and muscle mechanical performance in the drop jump. *Eur J Appl Physiol* 73 : 393-403.

KOMI PV, GOLLHOFER A (1997) Stretch reflexes can have an important role in force enhancement during SSC exercise. *J Applied Biomech* 13 : 451-459.

KOMI PV, HYVARINEN T, GOLLHOFER A, MERO A (1986) Man-shoe surface interaction : special problems during marathon running. *Acta Univ Oulu [A]* 179 : 69-72.

LENSEL G, VIGREUX B (1982) Elasticité musculaire et mouvement. In : 1res Journées d'Automne : Activités Physiques, Sports, Biomécanique, Beg Rohu.

LEPERS R, BIGARD AX, DIARD JP, GOUTEYRON JF, GUEZENNEC CY (1997) Posture control after prolonged exercise. *Eur J Appl Physiol* 76 : 55-61.

MAGAZANIK A, SHAPIRO Y, MEYTES D, MEYTES I (1974). Enzyme blood levels and water balance during a marathon race. *J Appl Physiol* 36 : 214-217.

NICOL C, KOMI PV, MARCONNET P (1991a) Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance. I. Changes muscle force and stiffness characteristics. *Scand J Med Sci Sports* 1 : 10-17.

NICOL C, KOMI PV, MARCONNET P (1991b) Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance. II. Changes in force, integrated electromyographic activity and endurance capacity. *Scand J Med Sci Sports* 1 : 18-24.

NICOL C, KOMI PV, HORITA T, KYROLAINEN, TAKALA TES (1996) Reduced stretch-reflex sensitivity after stretch-shortening cycle exercise. *Eur J Appl Physiol* 72 : 401-409.

PAAVOLAINEN L, HAKKINEN K, NUMMELA A, RUSKO H (1994) Neuromuscular characteristics and fatigue in endurance and sprint athletes during a new anaerobic power test. *Eur J Appl Physiol* 69 : 119-126.

SHERMAN WM, ARMSTRONG LE, MURRAY TM, HAGERMAN FC, COSTILL DL, STARON RC, IVY JL (1984) Effect of a 42.2 - Km footrace and subsequent rest or exercise on muscular strength and work capacity. *J Appl Physiol* 57 (6) : 1668-1673.

VAN RENSBURG JP, KIELBLOCK AJ, VAN DER LINDE A (1986) Physiological and biochemical changes during a triathlon competition. *Int J Sports Med* 1 : 30-35.

VIITASALO JT, KOMI PV, JACOBS I, KARLSSON J (1982) Effects of prolonged cross-country skiing on neuromuscular performance. In : PV Komi. Exercise and sport biology international series on sport sciences. Champaign, IL : Human Kinetics Publishers 12 : 191-198.

Figure 1 — Exemple d'un enregistrement caractéristique de la composante verticale de la résultante des forces au sol $R_z(t)$ au cours d'un CMJ avec les différentes postures correspondantes.

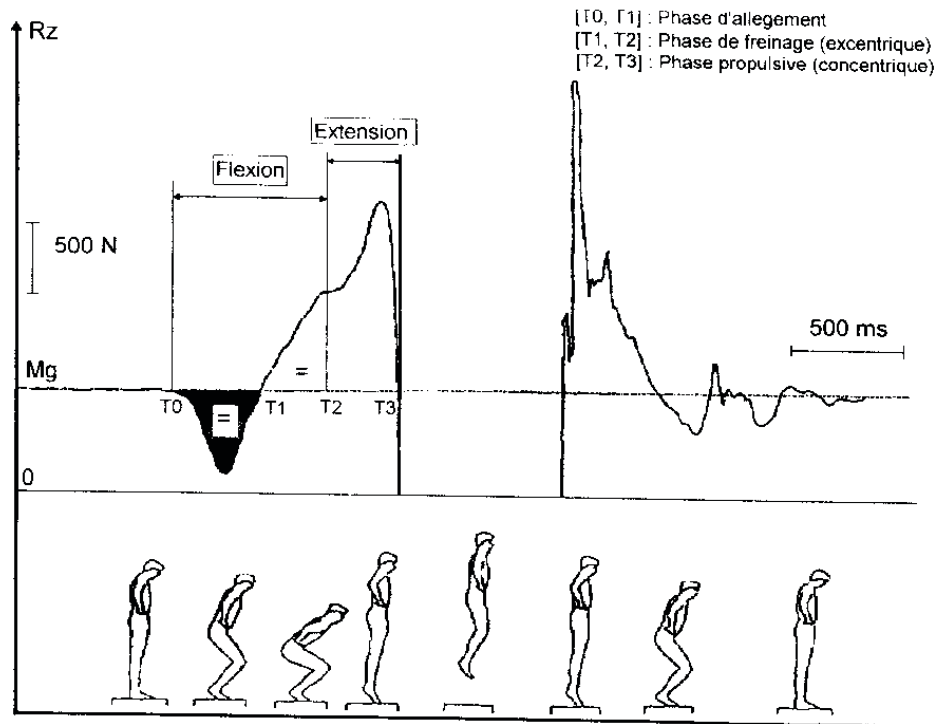


Figure 2 — Variabilité de l'élévation maximale du centre de gravité au cours du CMJ avant et après les différents types d'efforts. Différence significative avec la situation après-exercice correspondante : ** $P < 0,01$. Différence significative avec la situation après-triathlon : ££ $P < 0,01$.

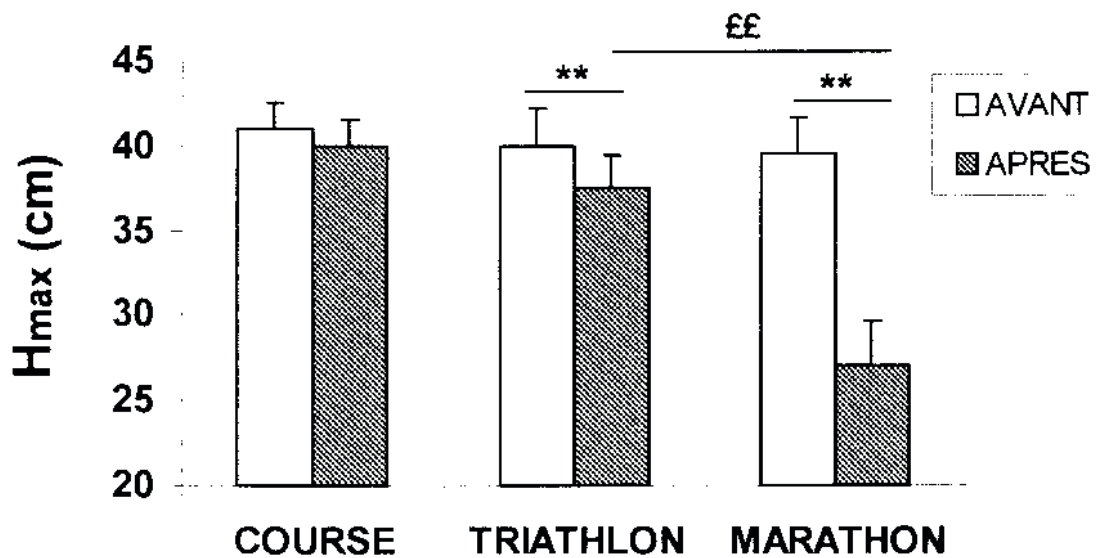


Figure 3 — Variabilité de la composante verticale des forces au sol avant et après les différents types d'efforts : a lors du pic négatif, b en début de propulsion, c lors du pic positif de R_z durant la phase propulsive. Différence significative : ** $P < 0,01$, * $P < 0,05$.

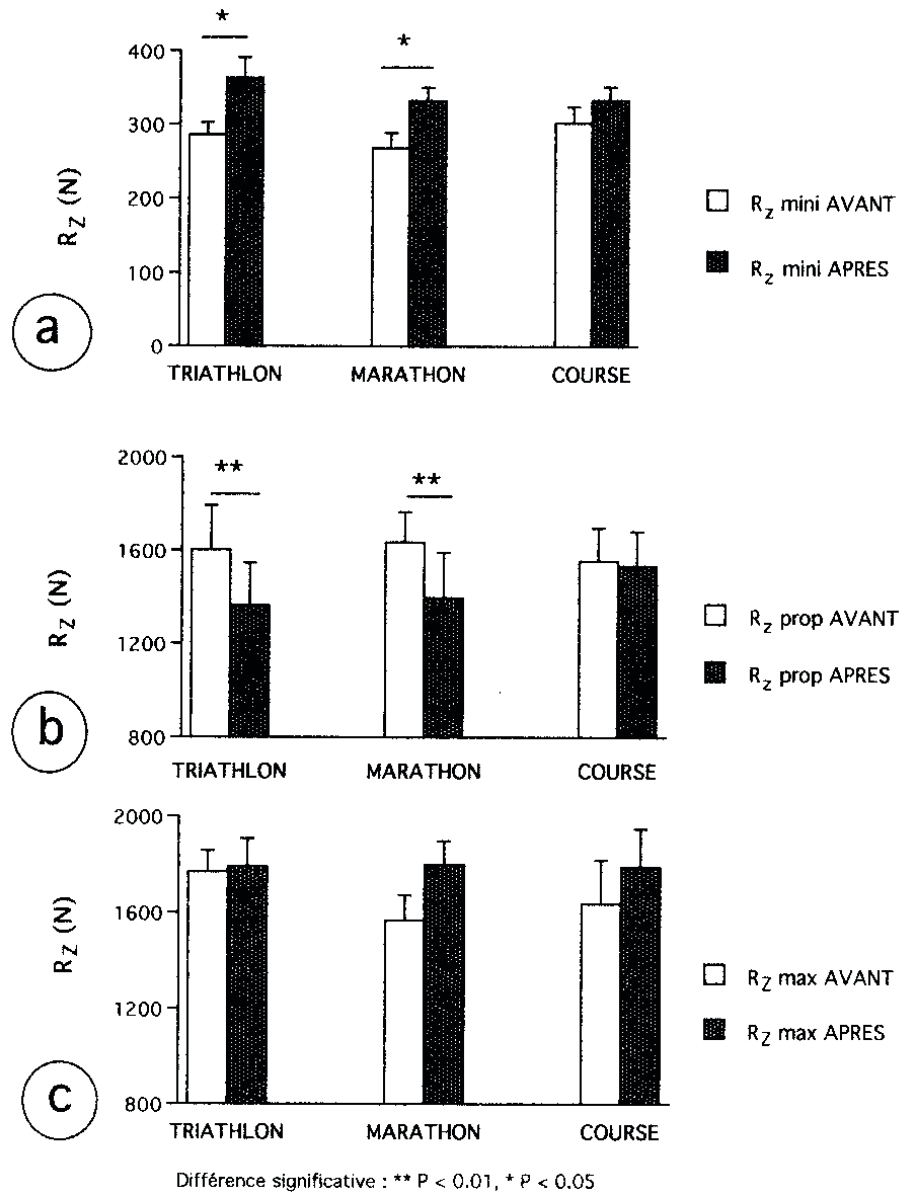


Tableau 1 — Variabilité des différents paramètres du saut avec contre-mouvement avant (pré) et après (post) les différentes épreuves.

	Triathlon		Marathon		Course Contrôle	
Paramètres	pré	post	pré	post	pré	post
Durée du CMJ (ms)	818 ± 57	885 ± 68	866 ± 80	909 ± 66	890 ± 120	875 ± 67
<i>Phase d'allègement</i>						
Durée (ms)	396 ± 24	395 ± 14	399 ± 83	374 ± 51	408 ± 97	384 ± 16
Impulsion (N. s)	78 ± 7,8	62 ± 3,7 *	77 ± 4,5	61 ± 3,2 **	70 ± 1,4	68 ± 3,7
<i>Phase de freinage</i>						
Durée (ms)	174 ± 38	247 ± 53	214 ± 61	305 ± 54	248 ± 32	262 ± 39
<i>Phase propulsive</i>						
Durée (ms)	248 ± 35	243 ± 45	253 ± 40	230 ± 35	234 ± 37	229 ± 48
Impulsion (N. s)	198 ± 12	192 ± 13	196 ± 21	162 ± 24	201 ± 18	199 ± 11
Durée phase aérienne (ms)	569 ± 45	552 ± 38 **	565 ± 44	466 ± 59 **	579 ± 27	571 ± 27

Différence significative avec le groupe PRE-exercice correspondant, * ($P < 0,05$), ** ($P < 0,01$)

Tableau 2 — Variabilité des temps limites et des valeurs de perceptions de l'effort (RPE) pour les contractions isométriques du quadriceps à 35 % de la FMV après les différentes épreuves.

	Référence	Triathlon	Marathon	Course contrôle
Temps limites (s)	126 ± 54	74 ± 30 *	51 ± 24 **	105 ± 45
RPE fin d'exercice	14 ± 1,2	17 ± 0,9 *	19 ± 0,2 **	15,2 ± 0,7

Différence significative avec le groupe course isolée : * ($P < 0,05$), ** ($P < 0,01$)