

Comparaison inter-sexuelle des réponses thermique, cardiaque, et musculaire lors d'une course prolongée en ambiance chaude

Foued Ftaiti^{1,2}, Asma Kacem², Imed Latiri², Samia Ben Mdalla², Zouhair Tabka², Nouri Zouari⁴, Feriel Ellouze⁵, et Laurent Grélot³

Catalogue Data

Ftaiti, F.; Kacem, A.; Latiri, I.; Ben Mdalla, S.; Tabka, Z.; Zouari, N.; Ellouze, F.; et Grélot, L. (2005). Comparaison inter-sexuelle des réponses thermique, cardiaque, et musculaire lors d'une course prolongée en ambiance chaude. *Can. J. Appl. Physiol.* 30(4): 404-418. © 2005 Canadian Society for Exercise Physiology.

Mots-clés: exercice, déshydratation, hyperthermie, température tympanique, fatigue, puissance

Key words: exercise, dehydration, hyperthermia, tympanic temperature, fatigue, power

Résumé/Abstract

Cette étude vise à comparer les réponses thermiques, cardiaques, et musculaires induites par une course prolongée en ambiance chaude chez deux groupes de sujets de sexes différents. Douze volontaires répartis en deux groupes ont été enrôlés dans ce protocole. Le premier groupe est constitué de 6 hommes âgés de 24 ± 2 ans; le second constitué de 6 femmes âgées de 23 ± 2 ans. La force explosive des membres inférieurs a été mesurée immédiatement avant et 40 minutes après une course réalisée à une intensité de 65% de la vitesse maximale aérobie de chaque sujet. La force, la vitesse, la puissance, et la hauteur de déplacement du centre de gravité des sujets ont été mesurées avec une plate-forme de force au cours de deux types de saut verticaux, le squat-jump (SJ) et le counter-movement-jump (CMJ). En ambiance chaude (31–33 °C, humidité relative 30%), la course s'est ponctuée par une perte

¹Institut Supérieur du Sport et de l'Education Physique de Sfax, Route de l'aéroport, Sfax, Tunisie; ²Laboratoire de Physiologie et des Explorations Fonctionnelles, Faculté de Médecine de Sousse, Tunisie; ³UPRES EA 3285 – IFR107 Marey, Faculté des Sciences du Sport, 163 ave. de Luminy – 13288 Marseille Cedex 9, France; ⁴Laboratoire de Physiologie et des Explorations Fonctionnelles, Faculté de Médecine de Sfax, Tunisie; ⁵Laboratoire de Biochimie, Hôpital Habib Bourguiba, Sfax, Tunisie.

significative ($p < 0,001$) de la masse corporelle (MC) et une augmentation significative ($p < 0,001$) de la fréquence cardiaque, la température tympanique, et la lactatémie ([La]). A l'arrêt de la course, nous avons observé uniquement chez les femmes une amélioration significative ($p < 0,05$) de la puissance musculaire développée lors du SJ (+9%). En revanche, une élévation significative de cette puissance a été observée tant chez les hommes (+10%, $p < 0,05$) que chez les femmes (+8%, $p < 0,01$) lors du CMJ. La déshydratation modérée (-2 à -2,3% de MC) et l'élévation de la température centrale ($\approx 39,2 \pm 0,1$ °C) induites par une course de 40 minutes sont associées à une amélioration de la puissance musculaire. Cependant, nos résultats ne révèlent aucune différence significative dans les réponses thermique, cardiaque, et musculaire entre les deux sexes à la fin de l'effort.

The aim of this study was to compare male and female thermal, cardiac, and muscular responses induced by a prolonged run undertaken in a hot environment. Twelve volunteers participated in this study. The first group consisted of 6 men and the second one consisted of 6 women. After determination of their $\dot{V}O_2$ max and maximal aerobic velocity (MAV), each athlete completed a 40-min run at 65% MAV in a hot and dry environment (temperature 31–33 °C, relative humidity 30%). Immediately before and after the run, each subject performed two different vertical jumps, i.e., a squat jump (SJ) and a counter-movement jump (CMJ) on a force platform. Force, velocity, power, and jump height were measured during each jump. The completion of the run was associated with a significant loss ($p < 0.001$) of body mass (BM) and significant increases ($p < 0.001$) in heart rate, tympanic temperature, and lactate concentration ([La]). Muscle power was significantly improved (+9%, $p < 0.05$) during the SJ only in the women. A significant enhancement of this parameter was also demonstrated during the CMJ in both groups (men: +10%, $p < 0.05$; women: +8%, $p < 0.01$). Surprisingly, a comparison of thermal, cardiac, and muscular responses did not reveal any significant differences between the sexes. Moderate dehydration (-2.0 to -2.3% of BM) and a rise in core temperature (above 39.2 °C) induced by the 40-min run led to an improvement of muscular strength in both men and women. However, the results of this study did not reveal any significant between-sex differences in thermal, cardiac, and muscular responses after exercising in the heat.

Introduction

Il existe entre l'homme et la femme d'importantes différences morphologiques et fonctionnelles (Shephard, 2000a) qui sont à l'origine de différences adaptatives observées lors d'exercices prolongés (Rivera Brown, 1990). La teneur en graisse plus élevée des femmes est clairement un désavantage dans la pratique des sports où le corps est mû contre la gravité; c'est clairement le cas dans les épreuves de course à pieds. La masse adipeuse relative plus importante chez la femme la désavantage également pour l'élimination de la chaleur métabolique. La thermolyse des femmes, à priori moins bonne que celle des hommes, réduit encore leur chance de réaliser les meilleures performances quand l'exercice est réalisé en contrainte thermique extérieure élevée (Rivera Brown, 1990; Shephard, 2000a) et/ou en phase lutéale du cycle menstruel. Cette phase est associée à une élévation substantielle (0,3 à 0,6 °C) de la température corporelle au repos (Hessemer et Brük, 1985; Pivarnick et al., 1992; Shephard, 2000b) réduisant, là aussi, la capacité de stockage thermique pendant l'exercice physique en ambiance chaude. Dans ce sens, pour une même intensité relative d'effort et en l'absence d'acclimatement à la chaleur,

Bar-Or (1998) et Frye et al. (1982) rapportent chez la femme un déclenchement sudoral retardé, des températures centrales et cutanées, et une fréquence cardiaque plus élevée.

L'impact de ces différences observées au cours de l'exercice prolongé sur la fonction musculaire reste controversé (Ahlman et Karvonen, 1961; Viitasalo et al., 1987) et paradoxalement peu étudié surtout chez des femmes. Ainsi, considérant les risques de déshydratation et d'hyperthermie encourus par les athlètes de fond, à l'entraînement comme en compétition, il semble nécessaire de considérer en détail cette question.

L'atteinte d'une température centrale très élevée a été récemment décrite comme le facteur principal de l'apparition de la fatigue (González-Alonso et al., 1999) et donc comme l'un des facteurs limitant de la performance. Selon Nybo et Nielsen (2001) et Nielsen et Nybo (2003), cette fatigue est associée à une baisse de l'activation volontaire des muscles. Une telle baisse peut directement réduire la capacité du muscle à engendrer de la force et à maintenir un niveau de puissance donnée (Ftaiti et al., 2001b; Lepers et al., 2000). Selon Nielsen et Nybo (2003), cette altération est attribuée à une baisse de l'amplitude de la commande motrice produite par le système nerveux central. Dans ce sens, une baisse de 18 à 20% de l'électroencéphalogramme (EEG) a pu être observée chez des sujets épuisés en ambiance chaude témoignant de l'apparition d'une fatigue centrale en corollaire de l'apparition d'une fatigue périphérique (Nielsen et Nybo, 2003; Nybo et al., 2002).

Ces diverses études ont été réalisées sur des populations masculines et dans des conditions de laboratoire. L'évaluation de la fonction neuromusculaire comprenait une comparaison pré/post effort de la force et de l'activation maximale isométrique (Ftaiti et al., 2001b; Lepers et al., 2000; Nybo et Nielsen, 2001) et isocinétique (Ftaiti et al., 2001b; Lepers et al., 2000; Sahlin et Seger, 1995), des muscles extenseurs et fléchisseurs du genou, réalisé sur un dynamomètre isocinétique. De telles conditions d'exercice puis d'évaluation de la contrainte neuromusculaire ne reflètent que partiellement les contraintes auxquelles sont confrontés les coureurs de fond en situation de compétition. De plus, le niveau de contraintes ressenties par les athlètes féminines est à ce jour mal évalué.

Dans ce contexte, l'objectif de la présente étude était de comparer les réponses thermiques et cardiaques chez des sujets de sexes différents lors d'une course prolongée réalisée en ambiance thermique chaude, d'une part, et de déterminer leurs effets sur la production de force et de puissance musculaire, d'autre part.

Au regard des données de la littérature, nous avançons les hypothèses suivantes:

1. L'exercice prolongé réalisé en ambiance chaude induirait une élévation plus prononcée de la température corporelle et de la fréquence cardiaque chez les femmes.
2. L'hyperthermie et la déshydratation induites par l'exercice réduiraient la capacité de production de la force et de la puissance musculaire plus particulièrement chez les femmes.

Evolution des expérimentations

Une première séance d'exercice destinée à sélectionner les sujets sur la base de leurs capacités aérobies a été réalisée. Une semaine après cette épreuve, nous avons procédé pour chaque sujet sélectionné à l'évaluation des valeurs de références pour la force, la vitesse et la puissance, lors de la réalisation de deux sauts verticaux le Squat-Jump (SJ) et le Counter-Movement-Jump (CMJ). Cette session permettait la familiarisation avec les techniques de sauts et le matériel d'évaluation (plateforme de force), d'une part, et de vérifier la reproductibilité des tests et la fiabilité des résultats lors des sessions d'évaluation subséquentes, d'autre part. Trois jours plus tard, les sujets ont réalisé une course prolongée à une intensité de 65% de leur vitesse maximale aérobie (VMA). Immédiatement avant et après la course, une réévaluation de la fonction musculaire a été réalisée de la même façon que lors de la session de référence.

SUJETS

Douze sujets adultes pratiquant régulièrement la course à pieds ont été répartis en deux groupes. Le premier groupe comprend 6 sujets hommes (tableau 1) dont la moyenne d'âge, de poids, et de taille sont, respectivement, de 24 ± 2 ans, 76 ± 9 kg, et 177 ± 4 cm. Le deuxième groupe est formé de 6 femmes (tableau 2). Leurs valeurs moyennes d'âge, de poids, et de taille sont, respectivement, de 23 ± 2 ans, 58 ± 4 kg, et 167 ± 7 cm. Tous les sujets ont été pleinement informés de la nature, du but, et de la durée de la recherche, et ils disposaient de l'entière liberté d'interrompre à tout moment leur participation à toutes les phases de l'épreuve. La sélection des sujets a été réalisée sur la base des résultats obtenus lors d'une épreuve de terrain progressive et maximale (VAMEVAL) permettant l'évaluation de la vitesse maximale aérobie (VMA). Un examen médical a également été effectué immédiatement avant et après l'épreuve de course.

Tableau 1 Caractéristiques anthropométriques et aptitude physique aérobie des hommes

Hommes	Age (ans)	Taille (cm)	Poids (kg)	% Masse grasse	VMA (km·h ⁻¹)	65%VMA (km·h ⁻¹)
H ₁	25	170	64,5	11,5	18,8	12,2
H ₂	25	177	75,6	19,8	18,3	11,9
H ₃	22	181	72	13,2	17,8	11,6
H ₄	22	177	70,9	16,5	18,3	11,9
H ₅	27	176	83	17,1	18	11,7
H ₆	22	182	88,2	15	17,8	11,6
Moyenne	24	177	76	15,5	18,1	11,8
± Ecart type	±2	±4	±9	±3	±0,4	±0,3

Tableau 2 Caractéristiques anthropométriques et aptitude physique aérobie des femmes

Femmes	Age (ans)	Taille (cm)	Poids (kg)	% Masse grasse	VMA (km·h ⁻¹)	65%VMA (km·h ⁻¹)
F ₁	23	159	50,5	21	14,5	9,4
F ₂	24	177	57,3	22	15,8	9,5
F ₃	22	169	60,9	21	14,8	9,6
F ₄	26	160	57,1	29	15	9,7
F ₅	22	169	59,0	30	14,8	9,6
F ₆	23	165	62,1	24	14,6	9,5
Moyenne	23	167	58	25	14,9	9,6
± Ecart type	±2	±7	±4	±4	±0,5	±0,1

PROTOCOLE

Mesure de la vitesse maximale aérobie: épreuve VAMEVAL. Cette épreuve estime la vitesse maximale aérobie (VMA) atteinte au $\dot{V}O_2$ max. L'épreuve commence par un échauffement à faible vitesse (6 km·h⁻¹). Ensuite, la vitesse augmente de 0,5 km·h⁻¹ toutes les minutes. Les vitesses de course sont réglées au moyen d'une bande sonore (cassette VAMEVAL pré-enregistrée) émettant des sons à intervalles réguliers. A chaque "bip," le sujet doit ajuster lui-même sa vitesse en se retrouvant exactement au niveau d'une des bornes repères placées tous les 20 m sur une piste de 400 m de longueur. Lorsqu'il ne parvient plus à courir assez vite pour terminer le palier en cours, le sujet doit s'arrêter, mémoriser le rang du dernier palier annoncé ainsi que la durée courue dans ce palier. La durée de ce test depuis l'échauffement jusqu'à l'épuisement du sujet était de 24 ± 1 min chez les hommes et de 23 ± 1 min chez les femmes. La température ambiante et le degrés d'humidité enregistrés lors de la réalisation de ce test étaient respectivement de 29 °C et de 39%.

Evaluation de la fonction musculaire. Cette évaluation a été réalisée indirectement au moyen d'une plate-forme de force de type Kistler 9281C en effectuant deux types de saut: le SJ et le CMJ. Lors du SJ, le sujet se place sur la plate forme de force, jambes légèrement écartées, talons collés sur le plateau de celle-ci, l'articulation des genoux fléchi à 90°, le bassin en rétroversion, les mains au niveau de la hanche, le buste dégagé et le dos creux. Le sujet effectue sans prise d'élan, une poussée maximale vers le haut. Le CMJ a été réalisé dans les mêmes conditions que le SJ. Cependant, au moment de l'exécution, le sujet est autorisé à faire une flexion préalable des genoux.

Chaque sujet a réalisé 3 sauts successifs; le saut présentant la meilleure performance, exprimée en terme de déplacement du centre de gravité, a été retenu et analysé. La plate-forme de force permet l'enregistrement des données à une fréquence d'acquisition de l'ordre de 500 Hz. Elle assure la mesure dynamique et statique des trois composantes orthogonales: Fx, Fy, et Fz de toute force s'exerçant

sur sa plaque de protection, quelle que soit la direction de cette force. Au moyen d'un dispositif d'analyse Bioware, le déplacement, la vitesse et l'accélération du centre de gravité du corps, le travail, et les coefficients de friction ont été mesurés.

Protocole de la session de course. Cette session comprenait une course de 40 min à 65% de la VMA, réalisée autour d'une piste d'athlétisme d'une longueur de 400 m. La vitesse de course était en moyenne de $12 \pm 0,4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et de $9,4 \pm 0,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivement, chez les hommes et les femmes. La course était précédée par deux paliers d'échauffement de 5 min chacun, réalisés respectivement à 50 et 55% de la VMA de chaque sujet. La session comprenait également une évaluation réalisée juste avant et après la course (différence pré/post course) des paramètres musculaires. Les paramètres physiologiques mesurés au repos et immédiatement après la fin de la course comprenaient la fréquence cardiaque (FC), la température tympanique (Tty), la lactatémie ([La]), les concentrations plasmatiques en sodium (Na^+) et potassium (K^+), l'hématocrite (Ht), et la concentration sanguine en hémoglobine ([Hb]). La température tympanique était également mesurée à la fin de l'évaluation de la fonction musculaire réalisée immédiatement après la course. Afin d'évaluer les pertes de masse corporelle (PMC) induite par l'exercice, les sujets étaient séchés et pesés immédiatement avant et après la course sur la même plate forme de force.

La température ambiante mesurée par un thermomètre à mercure et le degré d'humidité de l'air mesuré par un hygromètre de type (Haar-Hygrometer) étaient, respectivement, de $32 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ et de $30 \pm 5\%$. La fréquence cardiaque était mesurée au moyen d'un sport-tester de type Polar NV placé sur le thorax des sujets. Pour l'estimation de la température centrale, une sonde tympanique (Thermocouple de type T; conception: Unité 103 INSERM, Montpellier, France) était placée par l'expérimentateur dans le conduit auditif de l'oreille droite (Ftaiti et al., 2001a; 2001b; Rasch et Cabanac, 1993; Rasch et al., 1991). Une douleur brève indiquait un contact entre la sonde et le tympan (Rasch et Cabanac, 1993). La constante de temps et le temps de stabilisation de la sonde étaient, respectivement, de 0,15 s et de 2 à 3 s. Un bouchon de mousse placé dans le conduit auditif rendait celui-ci imperméable au passage de l'air, limitant de ce fait les échanges thermiques avec l'environnement. L'étalonnage de la sonde était réalisé au préalable en la plaçant dans un bain-marie dont la température modulée entre 33 et 41 $^\circ\text{C}$ était enregistrée avec un thermomètre à mercure de précision.

Les prélèvements sanguins veineux (10 ml) étaient effectués 10 minutes avant l'épreuve et juste à l'arrêt de la course. Ces prélèvements étaient réalisés à l'aide d'une seringue à gazométrie héparine (Terumo[®]) au niveau de la veine céphalique de l'avant bras droit. Les variations de l'ionogramme plasmatique et des paramètres hématologiques étaient déterminées automatiquement (YSI 1500 Sport). Enfin, les pertes de masse corporelle induites par la course ont été mesurées à l'aide de la plate-forme.

TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES

Les paramètres mesurés sont exprimés sous la forme de moyenne \pm écart type. Les effets de la déshydratation et de l'élévation de la température corporelle sur les fonctions musculaire et cardiaque, et sur les variations hydroélectrolytiques en

fonction du sexe, ont été déterminés par un test non paramétrique de Mann Whitney pour échantillon non apparié. Les variations sont considérées comme significatives lorsque p est inférieur à 0,05.

Résultats

Les tableaux 1 et 2 présentent les caractéristiques des sujets. En comparaison avec les hommes, les femmes sont plus petites ($p < 0,05$), plus légères ($p < 0,01$), et se caractérisent par une vitesse maximale aérobie plus faible ($p < 0,01$). Les femmes se caractérisent également par un pourcentage de masse grasse significativement plus élevé que chez les hommes ($p < 0,01$).

VARIATIONS

Variations de la température tympanique et de la fréquence cardiaque. Les Tty moyennes enregistrées immédiatement avant la course étaient particulièrement élevées chez les hommes ($37,8 \pm 0,2$ °C) et chez les femmes ($37,7 \pm 0,2$ °C). Au cours de la course, la production métabolique de chaleur et son accumulation progressive s'est traduite par une augmentation significative ($p < 0,001$) des Tty pour atteindre, respectivement, chez les hommes et chez les femmes $39,1 \pm 0,1$ °C et $39,3 \pm 0,5$ °C. Les températures tympaniques enregistrées à la fin de la réalisation du SJ et du CMJ étaient, respectivement, de $39,3 \pm 0,2$ °C et de $39,4 \pm 0,5$ °C chez les hommes et chez les femmes.

La course s'est traduite également par une élévation significative ($p < 0,001$) de la FC pour atteindre des valeurs maximales de 188 ± 7 bpm chez les hommes et de 197 ± 6 bpm chez les femmes.

Variation des paramètres hydro-électrolytiques et hématologiques. Les PMC liées à la déshydratation au cours de la course sont de 1,6 kg pour les hommes et de 1,2 kg pour les femmes. Ces pertes correspondent, respectivement, chez les hommes et les femmes à des variations relatives de 2,1% et de 2,0%.

L'étude des variations des paramètres électrolytiques enregistrés avant et après la course montre une augmentation significative ($p < 0,05$) uniquement de la natrémie après l'effort aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Les valeurs pré/post course étaient, respectivement, de 139 ± 1 mmol·L⁻¹ et de $141,3 \pm 3$ chez les hommes et de 139 ± 1 mmol·L⁻¹ et de $140,2 \pm 1$ chez les femmes.

L'hématocrite a significativement augmenté après l'effort dans les deux groupes. Les valeurs de repos et de fin de course étaient, respectivement, de $46 \pm 3\%$ et de $49 \pm 1\%$ ($p < 0,05$) chez les hommes et de $40 \pm 3\%$ et de $42 \pm 3\%$ ($p < 0,01$) chez les femmes (tableau 3).

L'étude des variations du taux d'hémoglobine dans le sang montre également une augmentation significative des valeurs. Ce taux passe de $14,9 \pm 1$ g·dL⁻¹ avant la course à 16 ± 1 g·dL⁻¹ ($p < 0,01$) après celle-ci chez les hommes, et de 13 ± 1 g·dL⁻¹ à 14 ± 1 g·dL⁻¹ ($p < 0,01$) chez les femmes (tableau 3).

Variation de la lactatémie. Au repos, les hommes et les femmes présentaient des lactatémies, respectives, de $2 \pm 0,5$ mmol·L⁻¹ et de $1,8 \pm 0,4$ mmol·L⁻¹. Après l'effort, ces taux ont significativement augmenté ($p < 0,001$) pour atteindre $7,5 \pm 2$ mmol·L⁻¹ chez les hommes et $8,5 \pm 2$ mmol·L⁻¹ chez les femmes (tableau 4).

Tableau 3 Paramètres hématologiques et électrolytiques enregistrés immédiatement avant (pré) et après (post) la course de 40 min à 65% de VMA

	Ht (%)		Hg (g·dL ⁻¹)		Na ⁺ (mmol·L ⁻¹)		K ⁺ (mmol·L ⁻¹)	
	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme
	*	**			**	*		
Conditions et Moyenne ± Ecart type								
Pré	46 ±3	40 ±3,3	14,9 ±1	13 ±1	139 ±1	139 ±1	5 ±0,3	5 ±0,6
Post	49 ±1	42 ±3	16 ±1	14 ±1	141,3 ±3	140,2 ±1	4,7 ±0,4	4,2 ±0,5

Variations significatives pré/post course: *à $p < 0,05$; **à $p < 0,01$.

Tableau 4 Paramètres physiologiques enregistrés immédiatement avant (pré) et après (post) la course

	Tty (°C)		Poids (kg)		FC (bpm)		[La] (mmol·L ⁻¹)	
	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme
	***	***	***	***	***	***	***	***
Conditions et Moyenne ± Ecart type								
Pré	37,8 ±0,2	37,7 ±0,2	76,5 ±9	57,68 ±5	87 ±8	91 ±7	1,9 ±0,5	1,78 ±0,4
Post	39,1 ±0,1	39,3 ±0,5	74,7 ±9	56,5 ±5	188 ±7	197 ±6	7,5 ±2	8,54 ±2

***Variations significatives pré/post course à $p < 0,001$.

Les analyses statistiques des variations pré/post course démontrent qu'il n'y a pas de différences statistiques entre les hommes et les femmes pour la fréquence cardiaque, la température tympanique, les pertes de masse corporelle, la lactatémie, l'hématocrite, l'hémoglobine, et les concentrations en électrolytes mesurées.

Variations des paramètres musculaires. Afin d'évaluer les effets de la déshydratation et de l'élévation de la température corporelle sur la fonction musculaire, une évaluation pré/post course de la force, de la vitesse, du déplacement du centre de gravité, et de la puissance moyenne relative de chaque sujet a été effectuée lors de deux sauts verticaux (i.e., SJ et CMJ). Tous les résultats obtenus ont été exprimés en pourcentage de leurs valeurs de référence préalablement enregistrées lors d'une session réalisée 3 jours avant la session de course. Aucune différence significative n'a été observée entre les paramètres musculaires mesurés lors de cette session de référence et ceux mesurés immédiatement avant la course.

Tableau 5 Valeurs moyennes des paramètres musculaires enregistrés lors du SJ au cours des différentes sessions d'évaluation

	Force (N)		Vitesse (m·s ⁻¹)		Hauteur (cm)		Puissance (Watt·kg ⁻¹)	
	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme
Référence	1599	1157	2,68	2,39	43,13	34,62	48,11	40,29
	±168	±84,40	±0,1	±0,1	±3	±2	±4	±2
Pré	1607	1089	2,75	2,44	45,22	36,4	51,47	41,67
	±231,39	±158,01	±0,16	±0,11	±5	±4	±5,37	±3
Post	1690	1176	2,78	2,53	46,17	39	55,04	45,25
	±250,44	±202	±0,18	±0,1	±5	±2	±7	±4
Variations pré/post course (%)								
	+5,2	+8,31	+1,1	+3,7	+2,1	+7,2	+7	+9

*Amélioration significative pré/post course à $p < 0,05$.

Lors du squat-jump. A la fin de la course, nous avons observé une relative stabilité de la force musculaire et de la vitesse d'exécution chez les deux sexes. L'étude comparative des variations pré/post course ne montre aucune différence significative entre les groupes (i.e., sexes, tableau 5). En revanche, l'étude comparative des valeurs de la puissance musculaire relative observées chez les deux groupes après la course montre une amélioration significative de la performance (+9%, $p < 0,05$) chez les femmes. Cette amélioration s'est traduite par une légère élévation (+7%), non significative, de la hauteur de déplacement du centre de gravité (passant de $36,4 \pm 4$ cm à 39 ± 2 cm; tableau 5).

Lors du counter-movement-jump. A la fin de la course, nous avons enregistré une stabilité du niveau de production de la force et de la vitesse d'exécution du CMJ aussi bien chez les hommes que chez les femmes (tableau 6). Cependant, la comparaison pré/post course des valeurs moyennes de puissance relative développée lors de la réalisation du CMJ montre une amélioration significative de la puissance de 10% ($p < 0,05$) et de 8% ($p < 0,01$), respectivement, chez les hommes et les femmes (tableau 6). La hauteur moyenne des sauts réalisés immédiatement avant et après la course montre une relative stabilité de la performance (+2 à +5%) après l'effort dans les deux sexes

Discussion

La puissance aérobie et la force musculaire d'une femme représentative de son sexe sont plus faibles que celles d'un homme représentatif du sien. Ceci résulte d'influences éducatives socioculturelles, mais aussi de facteurs biologiques tels que la différence de stature, de composition corporelle, et d'imprégnation hormonale

Tableau 6 Valeurs moyennes des paramètres musculaires enregistrés lors du CMJ au cours des différentes sessions d'évaluation

	Force (N)		Vitesse (m·s ⁻¹)		Hauteur (cm)		Puissance (Watt·kg ⁻¹)	
	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme *	Femme **
Référence	1691	1249	2,78	2,43	45,63	36,28	48,65	39,93
	±439,37	±158	±0,1	±0,1	±3,01	±2,45	±3,20	±2
Pré	1607	1239	2,76	2,47	45,98	37,62	48,55	41,36
	±343,03	±80	±0,14	±0,1	±5	±2,25	±4	±1
Post	1652	1215	2,81	2,55	47,12	39,53	53,20	44,72
	±185	±155	±0,18	±0,04	±4	±1,48	±7	±2
Variations pré/post course (%)								
	-3	-2	+2	+3,2	+2,5	+5,1	+10	+8,1

Amélioration significative pré/post course: *à $p < 0,05$; **à $p < 0,01$.

(Shepard, 2000a). De plus, la femme est plus susceptible aux variations des conditions environnementales de température et d'humidité pendant l'exercice physique prolongé. Ainsi, l'objectif de la présente étude était de comparer les réponses thermiques et cardiaques induites par une course prolongée réalisée en ambiance thermique chaude chez des sujets de sexe différent, puis de déterminer leur impact sur la fonction musculaire. Pour atteindre cet objectif, la force et la puissance des membres inférieurs ont été mesurées lors de la réalisation de deux types de saut verticaux immédiatement avant et après une course prolongée réalisée en ambiance chaude.

La session de référence de détermination des paramètres musculaires, réalisée 3 jours avant le début de l'épreuve de course, était destinée à réduire les effets de l'apprentissage (Ahlman et Karvonen, 1961) lors des tests pré/post course. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les paramètres musculaires mesurés lors de cette session et ceux mesurés immédiatement avant la course. Ainsi, toutes variations pré/post course des performances musculaires observées chez les deux sexes ne peuvent être attribuées qu'aux réponses physiologiques liées à la réalisation de la course.

Le résultat le plus marquant de la présente étude est l'absence de différences significatives entre les variations pré/post course enregistrées chez les deux sexes et ce, quelque soit le paramètre physiologique étudié. D'un point de vue musculaire, la course s'est traduite par une élévation significative de la puissance musculaire chez les femmes lors du SJ (+9%, $p < 0,05$) et chez les hommes (+10%, $p < 0,05$) et les femmes (+8%, $p < 0,01$) lors du CMJ. En revanche, les 10 min d'échauffement et les 40 min de course imposés aux sujets, les ont amenés à développer une tachycardie, une hyperthermie d'effort, et une déshydratation modérée.

Dans le présent protocole, les températures musculaires n'ont pas été mesurées directement. Cependant, les variations de températures tympanique (Tty) enregistrées avant et après la course peuvent refléter celles des températures centrale et musculaire (González-Alonso et al., 1999; Rasch et Cabanac, 1993; Rasch et al., 1991). Dans ce sens, Fuller et al. (1998) rapportent chez des rats épuisés par un exercice réalisé en ambiance chaude, des températures cérébrales et intra-abdominales proches de 40 °C. Chez des sujets entraînés accomplissant un exercice physique prolongé en ambiance chaude, González-Alonso et al. (1999) soulignent qu'à l'épuisement, les températures centrales et musculaires sont peu différentes et proches de 40 °C.

Les valeurs particulièrement élevées de la Tty observées avant le début de la course peuvent être attribuées au stress psychologique remarqué chez les sujets. De plus, tous les sujets se présentaient une heure avant le début du protocole et s'exposaient, de ce fait, à la température environnementale particulièrement stressante. Néanmoins, ce phénomène a été observé aussi bien chez les hommes que chez les femmes limitant ainsi son impact sur les résultats de fin de course. A la fin de la course et pendant la mesure des paramètres musculaires, les hommes et les femmes présentaient des températures tympaniques moyennes particulièrement élevées comprises entre 39,1 et 39,4. En référence aux données de la littérature (Rome, 1990; Segal et al., 1986) montrant une élévation parabolique de la puissance musculaire avec l'élévation de la température musculaire, il semble que les températures centrale et musculaire atteintes lors du présent protocole soient à l'origine des gains de puissance observés lors de la réalisation du SJ par les femmes et du CMJ par les hommes et les femmes. Cette amélioration de la puissance musculaire est attribuée aux améliorations combinées du niveau de la force musculaire développée (+2 à +8%) et de la vitesse d'exécution des sauts (+1 à +4%).

Nos résultats sont en conformité avec ceux de Falk et al. (1998), selon lesquels, l'élévation de la température musculaire, associée à l'élévation du métabolisme et de la vitesse de conduction des potentiels d'action, favorise l'amélioration de la puissance musculaire. Par ailleurs, nos résultats sont en contradiction avec ceux de Ftaiti et al. (2001b), Nybo et Nielsen (2001), et Nielsen et Nybo (2003) soulignant l'incapacité de l'organisme à engendrer de la force musculaire et à maintenir un débit de puissance musculaire constant avec l'atteinte d'une température centrale critique proche de 40 °C. Selon Nielsen et Nybo (2003), cette altération est liée à une baisse de l'amplitude de la commande motrice produite par le système nerveux central. Ainsi, à une température cérébrale de 40 °C, une altération progressive de l'électroencéphalogramme (EEG) a pu être observée témoignant de l'apparition d'une fatigue centrale (Nielsen et Nybo, 2003; Nybo et al., 2002). Selon ces mêmes auteurs, une réduction du flux sanguin cérébrale de 18 à 20%, liée à une augmentation concomitante de l'hyperventilation favorisant la baisse de la pression artérielle en CO₂, a pu être observée. L'évacuation de la chaleur de la région cervicale normalement assurée par le sang atteignant le cerveau se trouve ainsi altérée.

Dans cette étude, toutes les femmes ont été testées au milieu de la phase folliculaire (PF) du cycle menstruel entre le 4^{ème} et le 8^{ème} jours après les menstruations. L'influence des différentes phases du cycle menstruel sur les réponses physiologiques à l'exercice et sur la performance est vigoureusement discutée

(Dibrezzo et al., 1991; Lebrun et al., 1995; Nicklas et al., 1989). La phase lutéale (PL) du cycle menstruel est associée au repos à une élévation de la température centrale (T_c), qu'elle soit rectale, oesophagienne, ou tympanique.

De même la température cutanée moyenne présente selon Hessemer et Brük (1985), des valeurs plus élevées en PL. Bien que ce décalage soit associé à des élévations similaires des températures seuil de déclenchement pour la sudation et la vasodilatation (Stephenson et Kolka, 1985), les variations des températures corporelles lors de l'exposition à la chaleur restent d'amplitude identique et seuls les niveaux de repos sont modifiés (Candas et al., 1982). L'augmentation de la température centrale au cours du cycle menstruel s'observe également à l'exercice sous-maximal et se traduit par des valeurs d'environ $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ supérieures en PL par rapport à la PF (Hessemer et Brük, 1985; Pivarnik et al., 1992). Selon Horvath et Drinkwater (1982), l'élévation de la T_c pendant cette phase semble avoir peu d'effets sur les réponses physiologiques à l'exercice sous-maximal, même lorsqu'il est réalisé en ambiance chaude. D'un point de vue musculaire, la force peut même être légèrement améliorée pendant la phase menstruelle (Shepard, 2000b).

Les valeurs maximales de température tympanique et de fréquence cardiaque enregistrées à la fin de la course sont, respectivement, de $39,1 \pm 0,3\text{ }^\circ\text{C}$ et de 188 ± 7 bpm chez les hommes, et de $39,3 \pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$ et de 197 ± 6 bpm chez les femmes. L'étude comparative de ces réponses ne révèle cependant aucune différence significative entre les deux groupes. Cette observation est en contradiction avec celles rapportées par Frye et al. (1982) et Burse (1979) qui montrent qu'au cours d'un exercice d'une même intensité relative, les femmes présentent une fréquence cardiaque et des températures centrales et cutanées plus élevées que celles des hommes. Selon Shepard (2000a), les différences fondamentales entre les morphotypes des deux sexes ont un impact considérable sur la performance physique.

En effet, la femme se caractérise par un taux de graisse plus important que chez l'homme. Ceci s'avère délétère dans la plupart des activités physiques, à l'exception de la natation de fond (une situation où la graisse additionnelle du corps augmente la flottabilité et protège l'individu contre un refroidissant rapide) ou lors d'exercice physique prolongé (Wilmore et al., 1977). Par ailleurs, les femmes sont en moyenne 10 cm plus petites que les hommes; cette différence peut réduire de 20% la force maximale musculaire de la femme par comparaison à celle de l'homme (Shepard, 2000a). Dans le présent protocole et en dépit du pourcentage de graisse significativement plus élevé chez les femmes que chez les hommes ($25 \pm 4\%$ vs. $15,5 \pm 3\%$, $p < 0,01$), nous n'avons pas trouvé de différences significatives dans les réponses pré/post course entre les deux sexes pour la FC, la T_{ty} , les PMC, la lactatémie, la force, et la puissance musculaire.

Cependant, les valeurs relativement élevées de la fréquence cardiaque, observées dans les deux groupes et particulièrement chez les femmes (197 ± 6 bpm), témoignent d'une contrainte cardiovasculaire importante et d'une réduction de la réserve cardiaque et, par la même, de la capacité d'endurance à la course si l'effort était maintenu. Dans ce sens, une élévation significative ($p < 0,001$) de la lactatémie, observée aussi bien chez les hommes ($7,5 \pm 2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) que chez les femmes ($8,5 \pm 2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), témoigne d'une augmentation de son taux de production par la glycolyse anaérobie.

Les pertes de masse corporelle enregistrées chez les deux groupes restent relativement modérées et proches de 2%. De telles pertes sont légèrement en dessous de celles rapportées dans la littérature (Coyle, 2004; Nevill, 1996; Noakes, 2003) comme facteur pouvant altérer la performance de longue durée. Par ailleurs, l'étude comparative de ces pertes ne révèle aucune différence significative entre les groupes. Ceci est en contradiction avec les travaux de Bar-Or (1998) démontrant l'apparition d'un débit sudoral plus important en réponse à un effort prolongé sous-maximal chez les hommes par rapport aux femmes et ce, malgré une densité plus importante des glandes sudoripares chez ces dernières. Ainsi, au cours de l'effort prolongé réalisé à une intensité sous-maximale, le débit de sudation par glande sudoripare peut être de 50 à 60% plus important chez l'homme par rapport à celui d'une femme (Bar-Or, 1998).

CONCLUSION

Les résultats de la présente étude révèlent l'absence de différence intersexuelle pour les réponses thermique, cardiaque, et musculaire induites par une course prolongée réalisée en ambiance chaude. Par ailleurs, nos résultats démontrent la remarquable préservation de l'efficacité du fonctionnement musculaire lors d'états de déshydratation modérée ($\approx -2\%$ MC) associée à une importante élévation de la température centrale induit par un exercice physique prolongé. L'amélioration de la puissance musculaire relative des membres inférieurs lors de la réalisation du SJ par les femmes et du CMJ par les femmes et les hommes est attribuée aux effets bénéfiques de l'élévation de la température corporelle et aux pertes modérées de la masse corporelle.

Les températures centrales atteintes lors de ce présent protocole restent cependant en dessous de celles souvent décrites comme facteurs limitant la poursuite de l'exercice prolongée et pouvant altérer la fonction neuromusculaire. Ainsi, nous envisageons de vérifier ultérieurement l'impact de contraintes thermiques environnementales plus importantes typiques des compétitions sportives estivales tel que les jeux olympiques d'Athènes-2004 (i.e., le marathon féminin s'est disputé dans un environnement de 38 °C) sur les réponses thermique, hydro-électrolytique, cardiaque, et neuromusculaire.

Références

- Ahlman, K., et Karvonen, M.J. (1961). Weight reduction by sweating in wrestlers, and its effect on physical fitness. **J. Sports Med. Phys. Fitness** 1: 58-62.
- Bar-Or, O. (1998). Effect of age and gender on sweating pattern during exercise. **Int. J. Sports Med.** 19: S106- S107.
- Burse, R.L. (1979). Sex differences in human thermoregulatory response to heat and cold stress. **Hum. Factors** 21: 687-699.
- Candas, V., Libert, J.P., Sagot, J.C., et Vogt, J.J. (1982). Thermo physiological responses to humid heat: Sex differences. **J. Physiol (Paris)** 78: 240-242.
- Coyle, E.F. (2004). Fluid and fuel intake during exercise. **J. Sports Sci.** 22: 39-55.
- Dibrezzo, R., Fort, I.L., et Brown, B. (1991). Dynamic strength and work variations during three stages of the menstrual cycle. **J. Orthop. Sports Phys. Ther.** 10: 113-116.

- Falk, B., Radom-Isaac, S., Hoffman, J.R., Wang, Y., Yarom, Y., Magazanik, A., et Weinstein, Y. (1998). The effect of heat exposure on performance of and recovery from high-intensity, intermittent exercise. **Int. J. Sports Med.** 19: 1-6.
- Frye, A.J., Kamon, E., et Webb, M. (1982). Responses of menstrual women, amenorrheal women, and men to exercise in a hot, dry environment. **Eur. J. Appl. Physiol.** 48: 279-288.
- Ftaiti, F., Dufлот, J.C., Nicol, C., et Grélot, L. (2001a). Tympanic temperature and heart rate changes in fire-fighters during treadmill runs performed with different fireproof jackets. **Ergonomics** 44: 502-512.
- Ftaiti, F., Grélot, L., Coudreuse, J.M., et Nicol, C. (2001b). Combined effect of heat stress, dehydration and exercise on neuromuscular function in humans. **Eur. J. Appl. Physiol.** 284: 87-94.
- Fuller, A., Carter, R.N., et Mitchell, D. (1998). Brain and abdominal temperatures at fatigue in rats exercising in the heat. **J. Appl. Physiol.** 84: 877-883.
- González-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S.L., Jensen, F.B., Hyldig, T., et Nielsen, B. (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. **J. Appl. Physiol.** 86: 1032-1039.
- Hessemer, V., et Brük, K. (1985). Influence of menstrual cycle on thermoregulatory, metabolic, and heart rate responses to exercise at night. **J. Appl. Physiol.** 59: 1911-1917.
- Horvath, S.M., et Drinkwater, B.L. (1982). Thermoregulation and the menstrual cycle. **Aviat. Space Environ. Med.** 53: 790-794.
- Lebrun, C.M., McKenzie D.C., Prior, J.C., et Taunton, J.E. (1995). Effects of menstrual cycle phase on athletic performance. **Med. Sci. Sports Exerc.** 27: 437-444.
- Lepers, R., Hausswirth, C., Maffiuletti, N., Brisswalter, J., et Van Hoecke, J. (2000). Evidence of neuromuscular fatigue after prolonged cycling exercise. **Med. Sci. Sports Exerc.** 32: 1880-1886.
- Nevill, M. (1996). Team sports problems and solutions. **Sport Science Update** 2(1): 5-6.
- Nicklas, B.J., Hackney, A.C., et Sharp, R.L. (1989). The menstrual cycle and exercise: Performance, muscle glycogen, and substrate responses. **Int. J. Sports Med.** 10: 264-269.
- Nielson, B., et Nybo, L. (2003). Cerebral changes during exercise in the heat. **Sports Med.** 33: 1-11.
- Noakes, T.D. (2003). Fluid replacement during marathon running. **Clin. J. Sport Med.** 13: 309-318.
- Nybo, L., Moller, K., Volianitis, S., Nielsen, B., et Secher, N.H. (2002). Effects of hyperthermia on cerebral blood flow and metabolism during prolonged exercise in humans. **J. Appl. Physiol.** 93: 58-64.
- Nybo, L., et Nielsen, B. (2001). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. **J. Appl. Physiol.** 91: 1055-1060.
- Pivarnik, J.M., Marichal, C.J., Spillman, T., et Morrow, J.R. (1992). Menstrual cycle phase affects temperature regulation during endurance exercise. **J. Appl. Physiol.** 72: 543-548.
- Rasch, W., et Cabanac, M. (1993). Selective brain cooling is affected by wearing headgear during exercise. **J. Appl. Physiol.** 74: 1229-1233.
- Rasch, W., Samson, P., Cote, J., et Cabanac, M. (1991). Heat loss from the human head during exercise. **J. Appl. Physiol.** 71: 590-595.

- Rivera Brown, A.M. (1990). Female physiology during exercise. **P.R. Health Sci. J.** 9: 79-84.
- Rome, L.C. (1990). Influence of temperature on muscle recruitment and muscle function in vivo. **Am. J. Physiol.** 259: R210-R222.
- Sahlin, K., et Seger, Y. (1995). Effects of prolonged exercise on the contractile properties of human quadriceps muscle. **Eur. J. Appl. Physiol.** 71: 180-186.
- Segal, S.S., Faulkner, J.A., et White, T.P. (1986). Skeletal muscle fatigue in vitro is temperature dependent. **J. Appl. Physiol.** 61: 660-665.
- Shephard, R.J. (2000a). Exercise and training in women: Influence of gender on exercise and training responses. **Can. J. Appl. Physiol.** 25:19-34.
- Shephard, R.J. (2000b). Exercise and training in women: Influence of menstrual cycle and pregnancy on exercise responses. **Can. J. Appl. Physiol.** 25: 35-54.
- Stephenson, L.A., et Kolka, M.A. (1985). Menstrual cycle phase and time of day alter reference signal controlling arm blood flow and sweating. **Am. J. Physiol.** 249: R186-R191.
- Viitasalo, J.T., Kyröläinen, H., Bosco, C., et Alen, M. (1987). Effects of rapid weight reduction on force production and vertical jumping height. **Int. J. Sports Med.** 8: 281-285.
- Wilmore, J.H., Brown, C.H., et Davis, J.A. (1977). Body physique and composition of the female distance runner. **Ann. NY Acad. Sci.** 301: 764-776.

Received April 14, 2004; accepted in final form, November 9, 2004.