



HAL
open science

Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée : étude des paramètres d'influence

Christophe Hausswirth, Jeanick Brisswalter

► To cite this version:

Christophe Hausswirth, Jeanick Brisswalter. Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée : étude des paramètres d'influence. *Science & Sports*, 1999, 14 (2), pp.59 - 70. 10.1016/S0765-1597(99)80036-7. hal-01762681

HAL Id: hal-01762681

<https://insep.hal.science//hal-01762681>

Submitted on 10 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.

Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée : étude des paramètres d'influence

C. Hausswirth¹, J. Brisswalter²

¹ *Laboratoire de biomécanique et de physiologie, Institut National du Sport et de l'Éducation Physique, 11, avenue du Tremblay, 75012 Paris;*

² *Laboratoire d'analyse de la performance motrice humaine, équipe «Physiologie appliquée et facteurs de santé», université de Poitiers, 4, allée J.-Monnet, 86000 Poitiers, France*

Résumé

Objectif. - Il s'agissait d'établir une revue des questions inhérentes au problème de l'évaluation du coût énergétique de la course à pied de longue durée, afin d'identifier les différents paramètres influençant sa mesure et son interprétation.

Méthodologie et validité.- Le coût énergétique de la locomotion (marche, course, cyclisme...) est défini comme la quantité d'énergie dépensée par unité de distance parcourue. Calculée à partir de cette définition, la validité de celui-ci dépend de la méthode mise en oeuvre pour mesurer la dépense en énergie. Dans l'intervalle précis de sa détermination, c'est-à-dire entre 60 et 90 % de la consommation maximale d'oxygène (VO₂max), le coût énergétique représente une mesure valide du rapport entre la dépense énergétique et le travail produit par l'individu.

Résultats et discussion.- De nombreuses données suggèrent l'existence, chez des coureurs de longue distance, de variations du pouvoir de s'économiser en course, influençant l'ensemble des performances. Ajouté à ce facteur discriminant de la performance, un certain nombre de contraintes inhérentes à l'effort de longue durée est classiquement relevé. Parmi elles, les contraintes liées à la nature de l'environnement (dénivelé, vent, ambiance thermique, durée...) semblent exercer une influence non négligeable sur la valeur de la dépense en énergie. D'autres contraintes sont associées aux particularités propres à chaque individu (longueur des membres, expertise, entraînement...), et peuvent altérer le coût énergétique pendant l'effort, et venir ainsi modifier les performances. L'évaluation de l'efficacité de l'athlète à partir de la mesure du coût énergétique nécessite la connaissance préalable de l'ensemble des facteurs qui déterminent les variations de ce paramètre. Ces facteurs dépendent des caractéristiques de l'athlète ainsi que la spécificité de l'exercice pratiqué.

Coût énergétique / validité / rendement / course à pied / variabilité

Summary - Factors modifying running economy in long distance running.

Purpose.- *The aim of this study was to identify factors that may influence both measurement and interpretation of the energy cost related to long distance running.*

Current knowledge and key points.- *Many terms, such as "oxygen cost", "metabolic cost", "energy cost of running", "oxygen consumption" are considered to be equivalent to "running economy": it has been suggested that these expressions would define the oxygen uptake rate (VO₂) at steady state between 60-90% of VO₂max at a submaximal running speed. This would imply that lactate does not accumulate progressively. However, lactate concentrations can increase above rest values, thus providing extra-energy which is not usually taken into account.*

Future prospects and projects.- *Running economy would significantly contribute to the variations observed in running performances in runners of homogeneous level. It has been shown that running economy may differ in individuals who have identical athletic capabilities. However, it may not necessarily show a highly significant correlation with sports performance which is a multifactorial process. Higher values of other parameters may compensate low running economy values and vice versa. In addition, many factors, such as environmental conditions (wind resistance, circuit gradients,*

etc.) or subject's specificities (training status, fatigue...) are known or hypothesized to influence running economy: combination of these factors alters the energy cost of running during exercise and could modify the athlete's performance. Athlete's efficiency evaluated from running economy measurements requires prior knowledge of factors that may modify this parameter. These factors include both the athlete's characteristics and the specificity of the exercise performed.

Energy cost / validity / efficiency / prolonged running / variability

La performance réalisée lors d'un exercice de course à pied prolongée (entre 1 heure et 3 heures d'effort) est dépendante de la contribution d'un certain nombre de facteurs physiologiques participant activement à l'élaboration et à l'efficacité de ce mouvement.

Plusieurs tentatives ont été menées afin d'identifier et de décrire les différents paramètres influençant la performance sur des distances de course variées [7]. Bien qu'importante, la consommation maximale d'oxygène (VO₂max) ne constitue qu'un des facteurs associés au succès au cours d'une course de durée prolongée. Cela est illustré par la large variation de performance observée au sein d'un groupe dont les sujets possèdent des VO₂max très proches et inversement [26, 74]. Il apparaît donc que si une valeur élevée de VO₂max est certainement un paramètre physiologique statistiquement corrélé à un haut niveau de performance sur marathon, cet indice ne peut expliquer entièrement les disparités entre les différentes performances réalisées. D'autres facteurs sont classiquement évoqués pour expliquer ces différences. Ce sont essentiellement, d'une part la capacité à utiliser une large proportion de VO₂max sur des périodes prolongées [30], capacité souvent illustrée par la relation étroite existant entre la performance réalisée sur des courses de moyenne et longue durées et la vitesse au seuil d'accumulation d'acide lactique [32]. Et, d'autre part, lorsque les vitesses de déplacement sollicitent des intensités sous-maximales, la faculté que possède l'athlète de minimiser sa dépense en énergie pour une intensité d'effort donnée joue un rôle indéniable sur la performance [24, 50, 57]. Dans ce cadre, le concept de coût énergétique de la course à pied (Cr) est considéré comme un des paramètres explicatifs de la performance. En effet, plusieurs auteurs ont montré que cet indice peut servir à la prédiction des performances chez les athlètes ayant des performances similaires et/ou des athlètes très entraînés [26, 60].

Dans ce contexte, l'utilisation de cet indice est alors directement lié aux possibilités d'interprétation des variations du coût énergétique. Aussi, après avoir abordé les différentes définitions du coût énergétique ainsi que l'estimation pour chacune d'entre elle de la validité de mesure de cet indice en course à pied, nous identifierons les aspects descriptifs des différentes variations de coût énergétique. Enfin, dans la dernière partie de notre exposé, nous tâcherons de synthétiser l'ensemble des hypothèses actuelles qui permettent d'envisager une relation entre le coût énergétique et l'amélioration des performances dans les courses de moyenne et longue distance.

APPROCHE GÉNÉRIQUE DE LA NOTION DE «RENDEMENT»

Pour chaque mode de locomotion, l'efficacité du sujet peut être étudiée à partir de la notion de rendement de l'activité qui représente le rapport entre le travail mécanique produit et l'énergie métabolique consommée. Par sa définition, le rendement dépend de multiples facteurs, aussi bien physiologiques que mécaniques. Leur identification peut être abordée à partir de la représentation schématique de la transformation de l'énergie métabolique en énergie mécanique proposée par Van Ingen Schenau et Cavanagh [80] (*figure 1*). Le rendement apparaît comme étant lié à différents systèmes de transformation énergétique, son étude peut donc être envisagée aussi bien au niveau local, musculaire, qu'au niveau de l'organisme entier.

Le rendement musculaire

La quantification du rendement mécanique du muscle a été abordée expérimentalement sur le muscle isolé. Ce rendement musculaire représente le rapport entre le travail réalisé par le muscle sur une période donnée et l'énergie libre issue des réactions chimiques pendant cette même période. Il résulte aussi du rendement de la transformation des substrats énergétiques en énergie utilisable par le muscle (environ 60 %), et du rendement de la transformation de l'énergie libérée par l'hydrolyse de l'ATP en énergie mécanique nécessaire au glissement des filaments musculaires (environ 50 %). Au cours de la contraction musculaire de type concentrique, le rendement maximum (r_{max}) dépend d'une part de la vitesse (y) de raccourcissement du muscle ($r_{max} = 0,3 y_{max}$)

[87] et, d'autre part, de la possibilité pour le muscle de réutiliser l'énergie stockée préalablement dans ses structures [3].

Lorsqu'elle est appliquée aux activités de locomotion, la relation entre le rendement musculaire et la vitesse de contraction du muscle est plus complexe et semble alors dépendre principalement du recrutement des différentes fibres musculaires [69]. C'est ainsi que les vitesses de contractions associées à un rendement optimal varient en fonction de la proportion de fibres I (de type lentes) ou de fibres II (de type rapides) recrutées [68]. Par ailleurs, lors des activités de locomotion, le mouvement cyclique se traduit au niveau du muscle par la succession d'un étirement et d'un raccourcissement. L'optimisation de ce cycle « étirement-contraction » est classiquement cité comme un des principaux facteurs d'amélioration du rendement musculaire [3, 21, 22]. Pendant la phase d'étirement, l'énergie mécanique est stockée dans les composantes élastiques du muscle, puis, pendant la phase de contraction, cette énergie va être en partie restituée [3], la composante contractile du muscle ne fournit alors que l'équivalent de l'énergie perdue pendant la phase de stockage et de restitution. Néanmoins, in vivo, le comportement élastique du muscle semble être plus complexe que celui précédemment décrit pour le muscle isolé, et la difficulté d'optimiser ce processus dans une perspective d'amélioration de la performance est liée à l'impossibilité actuelle de déterminer la part réelle d'énergie restituée lors de la phase concentrique par les structures élastiques du muscle [20, 83].

Le rendement à l'échelon global de l'organisme

À l'échelon global de l'organisme, la mesure de cet indice repose alors sur deux modes d'approche différents qui considèrent soit le travail mécanique produit pour une énergie métabolique consommée, on parle alors de rendement mécanique [46], soit l'énergie consommée pour une vitesse de déplacement donnée, on parle alors de coût énergétique [30]. La définition et le mode de calcul d'une part de l'énergie métabolique et, d'autre part, du travail mécanique présentent de nombreuses variations qui sont à l'origine de difficultés dans l'interprétation des résultats expérimentaux. En effet, la mesure du rendement impose de mesurer le travail mécanique, alors que la mesure du coût énergétique dépend principalement de la validité de la mesure de la dépense énergétique.

Le rendement mécanique de la locomotion

À l'heure actuelle, la mesure du travail mécanique est encore liée à de nombreuses incertitudes. Dans les études de la locomotion humaine, les auteurs évoquent, dans l'interprétation des résultats, les limites liées à la modélisation qui permet de calculer le travail mécanique réalisé [2, 80, 83]. Différents modèles de calcul du travail mécanique ont été proposés. Ceux-ci sont répertoriés classiquement selon deux procédures [2, 46, 80, 83, 85] :

- le premier est fondé sur la mesure des variations des composantes d'énergie mécanique liées au déplacement du centre de masse du sujet. Les mesures sont réalisées sur plate-forme de force seule ou accompagnée d'analyses cinématiques à partir de la digitalisation d'images du déplacement;
- le second repose sur la mesure des variations d'énergie de chaque segment. Cette approche repose sur une hypothèse préalable de transfert d'énergie entre les segments. Le calcul est réalisé en considérant, soit qu'il existe un transfert énergétique complet entre les segments, soit qu'il n'existe aucun transfert entre les segments.

Les différences entre les résultats obtenus par ces deux approches sont importantes (supérieures à 10 %) et limitent, à l'heure actuelle, d'une part l'utilisation du calcul du travail mécanique pour objectiver les effets possibles de l'entraînement ou de la fatigue sur le rendement de la locomotion et, d'autre part, la possibilité d'établir un lien entre la variation de l'énergie mécanique et celle de l'énergie métabolique [6, 53].

Le coût énergétique de la locomotion

Dans ce cadre, la mesure du coût énergétique semble être, dans le contexte de sa validité, une mesure alternative pertinente pour envisager les effets de la variation du rendement du sujet sur la performance dans les différentes activités sportives de locomotion [17, 39].

Le coût énergétique de la locomotion (marche, course à pied, cyclisme...) est défini comme la quantité

d'énergie dépensée par unité de distance [30]. Selon cette définition, la validité du coût énergétique dépend de la méthode mise en oeuvre pour mesurer la dépense énergétique. Les premiers essais d'évaluation de la dépense énergétique de la course à pied ont été réalisés en laboratoire par Sargent en 1926 [70]. Ces travaux ont utilisé des mesures de consommation d'oxygène avant, pendant et après des paliers d'intensité submaximale à supra-maximale. Dans ces conditions expérimentales, les métabolismes aérobie et anaérobies sont sollicités, et l'estimation de la dépense énergétique se réalise à partir du calcul des équivalents énergétiques de l'oxygène (E_{O_2}) et du lactate ($E_{la} = 3 \text{ mL } O_2 \cdot \text{mmol} \cdot L^{-1}$ [29]). Néanmoins, pour ces efforts partiellement ou totalement anaérobies, la détermination de la dépense énergétique liée à la sollicitation des métabolismes anaérobies est difficile à réaliser, car elle nécessite de connaître la concentration d'ATP, de créatine phosphate, de glycogène musculaire, ainsi que la masse musculaire active.

Pour être valide, le calcul du coût énergétique repose ainsi sur des mesures obtenues dans des conditions métaboliques stables, sous-maximales, où la consommation d'oxygène (VO_2) est représentative de la dépense d'énergie par unité de temps. Dans ces conditions, plusieurs termes sont utilisés dans la littérature pour désigner VO_2 : demande sous-maximale, efficacité aérobie, coût en oxygène, coût métabolique et *running economy* ou économie de course pour un effort de course à pied. Lorsque la consommation d'oxygène est rapportée à la vitesse de déplacement, on parle de coût énergétique. Plusieurs méthodes de calcul du coût énergétique sont proposées dans la littérature, la différence entre ces modes de calcul tient principalement dans la soustraction ou non d'une valeur de dépense énergétique «de base» à la valeur de VO_2 afin de quantifier la dépense énergétique liée uniquement au travail externe fourni. Bien qu'aucune ne semble satisfaisante, différentes valeurs de bases sont répertoriées dans la littérature et modifient la terminologie et la signification du rapport travail/énergie [77]. Les indices suivants sont alors calculés:

— *net efficiency*: $VO_2 - VO_2$ mesurée au repos (efficacité nette);

— *delta efficiency*: $(VO_2 \text{ «palier } n\text{»}) - (VO_2 \text{ «palier } n^{-1}\text{»})$ (variation d'efficacité).

Néanmoins, le mode de calcul le plus classiquement utilisé est celui qui a été proposé par di Prampero en 1986 selon l'équation suivante:

$$Cr = (VO_2 - VO_2 \text{ repos}) \cdot \text{vitesse}^{-1}$$

où Cr est exprimé en $\text{mL } O_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, la vitesse en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, et VO_2 en $\text{mL } O_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Enfin, lors de ce calcul, la variabilité de la mesure de VO_2 de repos amène certains auteurs à utiliser la valeur de VO_2 repos théorique de $0,083 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, calculée par Medbf et al chez de jeunes adultes de sexe masculin à partir de la relation VO_2 -vitesse. D'une manière générale, l'ensemble de ces calculs repose sur la conception d'une linéarité parfaite de la relation VO_2 -vitesse. Celle-ci, observée pour une étendue de vitesses comprises entre 50 et 80 % de VO_{2max} , se traduit par une stabilité du coût énergétique indépendamment de l'augmentation de la vitesse [26].

Ainsi, dans les épreuves de longues durées, où la vitesse moyenne de déplacement correspond à cette gamme de vitesses sous-maximales, la mesure du coût énergétique peut être considérée comme un des déterminants de la performance [60]. À l'inverse, cet indice n'est pas, par sa signification physiologique, pertinent dans les épreuves de moyennes distances, où la performance dépend de la capacité du sujet à un travail maximal dans un temps minimal. Cette distinction est confirmée par l'observation pour les épreuves de longues distances uniquement de corrélations significatives entre VO_2 mesurée à des vitesses sous-maximales et la performance [23, 24, 50]. Dans ce cadre, l'utilisation du coût énergétique comme indice de l'efficacité dans une tâche impose de définir d'abord la méthode utilisée pour sa mesure et, ensuite, de déterminer les facteurs de variation qui peuvent limiter l'interprétation des résultats.

L'ÉVALUATION DU COÛT ÉNERGÉTIQUE DE LA COURSE À PIED

La mesure du coût énergétique nécessite de standardiser les conditions expérimentales [11, 14]. Celles-ci sont facilement contrôlées en laboratoire où le coût énergétique calculé indépendamment des effets liés à la résistance de l'air est dit non aérodynamique. Néanmoins, on peut actuellement mesurer le coût énergétique en situation grâce à l'apparition d'appareillages de mesure et d'enregistrement des paramètres gazeux par télémétrie. Dans ces conditions de terrain, si la validité de la mesure va dépendre, comme en laboratoire, de la précision de l'appareillage [38], l'impossibilité de contrôler les conditions externes de mesure (température, humidité, vent) nécessite une vigilance accrue des expérimentateurs aussi bien dans l'étalonnage de l'appareil que dans l'interprétation des valeurs

enregistrées.

Influence du mode de recueil des échanges gazeux

Quelques études se sont intéressées au mode de recueil des paramètres ventilatoires ; celles-ci ont pu montrer que le fait de porter un embout buccal ou un masque altérait les caractéristiques respiratoires obtenues en condition de repos [41]. Cependant, seule l'étude de Siler [73] s'est intéressée à la comparaison des deux modes de recueils d'échanges gazeux au cours d'un exercice. Cet auteur a conclu que le port de l'embout ou du masque n'affectait ni le style du coureur à des vitesses de course submaximales ni les mesures de consommation d'oxygène.

Critères d'évaluation du coût énergétique

Indépendamment du contrôle de la variabilité instrumentale, le principal critère d'évaluation du coût énergétique est l'atteinte d'un état d'équilibre de VO_2 . Celui-ci varie en fonction de l'intensité du travail, des muscles concernés, de l'existence d'un travail préalable et du niveau d'entraînement des sujets. La détermination de l'intensité de travail impose de contrôler la validité de la mesure et est liée à l'utilisation d'énergie uniquement d'origine aérobie. Celle-ci varie donc essentiellement en fonction du niveau d'entraînement et/ou de fatigue des sujets. Dans ce cadre, la stabilité de la lactatémie durant les paliers permet de vérifier le caractère aérobie de l'exercice [27].

Lorsque les conditions de mesure sont contrôlées, l'interprétation de la variation du coût énergétique n'est pas possible sans une connaissance précise de la stabilité à court terme de ces paramètres pour la population concernée et le mode de locomotion étudié. La majorité des études qui ont été réalisées en laboratoire envisagent isolément la stabilité du coût énergétique de la course à pied et celle des paramètres biomécaniques [29, 84, 86]; quelques études seulement étudient la variation conjointe de ces paramètres [12, 14, 58, 61]. Dans ces travaux, la variabilité à court terme du coût énergétique de la course à pied se situe entre 1,8 et 11 %. La dispersion de ces résultats semble être principalement liée à la diversité des méthodes mises en oeuvre, aussi bien en ce qui concerne le degré de spécialisation de la population en course à pied, que de la standardisation des protocoles. D'une manière générale, les auteurs indiquent que lorsque le protocole est standardisé, les valeurs moyennes de coût énergétique en course à pied peuvent être considérées comme stables, quel que soit le niveau de pratique. Néanmoins, si dans toutes ces études les valeurs moyennes ne varient pas significativement, il existe des variations individuelles importantes du coût énergétique indépendantes par ailleurs, de la variabilité des paramètres biomécaniques [14, 61]. Il semble ainsi que, si le coût énergétique de la course à pied est un paramètre reproductible, son évaluation doit être basée sur deux mesures successives pour permettre d'identifier 90 % de la variabilité individuelle [84].

ASPECTS DESCRIPTIFS DES MODIFICATIONS DU COÛT ÉNERGÉTIQUE DE LA COURSE À PIED

Un certain nombre de facteurs sont susceptibles de modifier (améliorer ou altérer) le coût énergétique de la course à pied. Ces facteurs dépendent aussi bien des contraintes environnementales (type de parcours, résistance de l'air...), que des caractéristiques anthropométriques propres au sujet (poids, masse grasse, longueur des membres...). Les paramètres de type extrinsèque (inclinaison de la pente, répartition de charges portées...) semblent également exercer une influence directe sur la dépense énergétique de l'activité pratiquée.

Incidence des paramètres de type extrinsèque

Effet de l'inclinaison de la pente et de la résistance de l'air sur le coût énergétique de la course

L'évaluation du coût énergétique en laboratoire, pour des vitesses de course proches de celles observées pour des efforts de moyenne et longue durées, pose le problème de l'inclinaison du tapis roulant sur lequel la course est réalisée. La pratique courante des centres d'évaluations est d'incliner le tapis de 1,5 à 3 % de pente pour corriger l'absence de résistance de l'air pendant l'épreuve. La validité de cette pratique est discutable. En effet, di Prampero [30] note que le pourcentage du coût énergétique consacré à lutter contre la résistance de l'air représente 7,8 % à 6 m.s⁻¹ (21,6 km.h⁻¹), plus que 4 % à 19,8 km.h⁻¹ et seulement 2 % à 16,7 km.h⁻¹. De plus, les résultats des travaux de Pugh [67] précisent que pour des vitesses de course inférieures à 15,6 km.h⁻¹, les valeurs de consommation d'oxygène enregistrées en laboratoire ou sur le terrain sont assez similaires. Par conséquent le positionnement du tapis à l'horizontal (*i.e.* 0 % de pente) est souvent employé pour la mesure de Cr , même si les travaux

de Mc Gruer et al [53] ont montré que les différentes inclinaisons du tapis roulant ne modifient que très faiblement la valeur indicative du coût énergétique du coureur.

Effet de la répartition de charges additionnelles sur le coût énergétique

La question de l'influence du port de charges et de leur répartition lors de la réalisation d'une activité physique a été largement étudiée pour des exercices de marche et de course. Dans ce cas, un des facteurs déterminants du coût énergétique de la marche et de la course semble être le placement de la charge portée [66]. Lorsqu'une charge externe est transportée, et donc éloignée du centre de gravité du sujet, l'efficacité du geste est altérée, ce qui accroît la demande en énergie pour l'accomplissement de la tâche. C'est le cas lorsque les charges sont portées sur les extrémités des membres [52]. L'utilisation de chaussures légères est donc souvent adoptée par les coureurs de moyenne et longue distance afin de pas ajouter une demande en énergie supplémentaire pendant l'effort. En effet, on a évalué à 0,7-0,9 % le surcoût énergétique pour des chaussures plus lourdes de 100 g [44]. Lorsque la charge additionnelle est proche du centre de gravité, le surcoût énergétique lié au port de charge est largement diminué. Scott et al [71] ont estimé à 0,1 % l'augmentation de la consommation en oxygène pour 100 g de charge supplémentaire placée au niveau du tronc. La plupart des études mettant en relation VO_2 et port de charge au cours d'un exercice de marche ou de course ont souvent recours à l'emploi de sacs à dos ou de harnais afin de diminuer les perturbations et les oscillations liées à l'addition de charge [52]. L'apparition de nouveaux appareils d'analyses d'échanges gazeux par télémétrie (type Cosmed K2, Cosmed K4), portés au moyen d'un harnais, ne devrait pas considérablement augmenter la dépense énergétique. Cependant, la mesure du coût du port de chaque système doit être prise en compte pour discuter les variations du coût énergétique.

Incidence des paramètres de type intrinsèque

Amélioration du coût énergétique de la course Classiquement, la mise en oeuvre d'un programme d'entraînement agit sur l'ensemble des processus physiologiques et biomécaniques mis en jeu par la course à pied. De nombreuses recherches longitudinales ont été conduites afin de mettre en évidence une optimisation du coût énergétique de la course à pied à la suite d'un programme d'entraînement. Néanmoins, les résultats sont contradictoires. En effet, une partie des études conduites chez l'adulte mettent en évidence une diminution des valeurs de coût énergétique [33, 72, 78, 79], alors que d'autres n'observent aucun effet d'un programme d'entraînement [1, 12, 82]. Cette inconsistance des résultats résulte principalement de différences méthodologiques [5]. Dans ces études, une grande diversité de méthodes est mise en oeuvre, aussi bien en ce qui concerne le programme d'entraînement, que le niveau de performance des sujets.

Lorsque ce programme d'entraînement est clairement identifiée, quelques études montrent cependant qu'une amélioration du coût énergétique de la course à pied est possible par l'utilisation d'un volume important de travail à une intensité strictement contrôlée [14, 23, 72]. Ces résultats peuvent être analysés à deux niveaux :

- la diminution du coût énergétique est liée à l'amélioration des processus bioénergétiques et biomécaniques sous-jacents ;
- la diminution du coût énergétique est associée à une réorganisation du mouvement. Cette approche est classiquement illustrée par l'étude des relations entre la variation des caractéristiques de la foulée (fréquence et longueur) et le coût énergétique.

Cette dernière hypothèse théorique n'a pas été parfaitement confirmée expérimentalement, et les mécanismes expliquant la relation entre fréquence/longueur des foulées et coût énergétique restent mal connus [53].

En effet, d'une part la possibilité de diminuer le coût énergétique par l'apprentissage d'un nouveau patron locomoteur n'a jamais été réellement observée [56] et, d'autre part, de nombreuses études ont pu montrer que le sujet adopte spontanément la fréquence et la longueur de foulée la plus économique (toute modification imposée de la fréquence de part et d'autre de la fréquence libre est liée à une demande énergétique plus importante, selon une courbe en U) (*figure 2*) [44].

En course à pied, le sujet est libre d'adapter spontanément les caractéristiques de sa foulée, la relation entre le coût énergétique et l'organisation du mouvement peut être alors abordée à partir du concept selon lequel la locomotion humaine est un système soumis à des principes physiques d'auto-optimisation, en particulier la tendance à optimiser la dépense énergétique par rapport aux contraintes

de la tâche [47, 62, 75]. Dans cette perspective, des études récentes ont montré que les sujets adoptent naturellement une fréquence de foulée qui minimise à la fois le coût énergétique et l'instabilité du patron locomoteur [15, 16, 25, 44]. En marche et en course, cette fréquence énergétiquement optimale (correspondant à un coût énergétique minimal) peut être prédite à partir des caractéristiques anthropométriques des sujets par le calcul de la fréquence de résonance (FDHO) d'un oscillateur qui représente le membre inférieur [3, 43]. Dans ce contexte, l'amélioration du coût énergétique pourrait être associée à l'émergence d'une nouvelle forme de mouvement, structure dynamique individualisée, qui se construit en fonction de l'ensemble des contraintes de la tâche et qui tend vers une plus grande efficacité du mouvement [9].

ALTÉRATIONS DU COÛT ÉNERGÉTIQUE DE LA COURSE À PIED: RELATION AVEC LA PERFORMANCE

Évolution du coût énergétique au cours d'un effort de type «monotone» (i.e., course à pied prolongée): incidence sur la performance

Les efforts de moyenne et longue distances correspondent à des vitesses de déplacement sous-maximales où la dépense énergétique peut être identifiée à partir de la consommation d'oxygène. La capacité que possède le coureur à dépenser moins d'énergie pour une vitesse de déplacement identique constitue de ce fait un paramètre pertinent de détermination de la performance. Cependant, lorsque l'exercice se prolonge, l'apparition d'un état de fatigue pourrait être à l'origine d'une altération du rendement énergétique liée aux effecteurs périphériques pouvant modifier la valeur du coût énergétique (Cr). L'ensemble des études sur l'apparition de la fatigue au cours d'un effort exhaustif ne sont pas toutes unanimes quant à leurs conséquences sur la valeur du coût énergétique de la course. Bailey et Pate [5] rappellent que l'installation d'un état de fatigue pourrait être concomitante d'une dérive du coût énergétique liée à une augmentation de la demande en énergie. Lorsque les muscles actifs subissent une déplétion glycolytique importante, l'augmentation de l'oxydation des acides gras libres pourrait augmenter la consommation en oxygène de l'athlète. Comparant les valeurs du coût énergétique d'une course de 45 minutes («course contrôle») réalisée à 75 % de VO₂max avec les 45 dernières minutes d'un effort de course à pied de 2 heures 15 («marathon»), Hausswirth et al [37] ont pu montrer que le coût énergétique obtenu en fin de marathon était plus élevé de 15 % par rapport aux valeurs enregistrées lors de la course contrôle (*figure 3*). Cette augmentation de Cr a été attribuée d'une part à la diminution de 14,6 % de la volémie occasionnée par le marathon et, d'autre part, à l'augmentation importante des acides gras libres plasmatiques et du glycérol circulant, survenant en phase terminale du marathon et témoignant d'une participation plus importante de l'oxydation des acides gras à la fourniture de l'énergie. Les résultats de Brueckner et al [18] montrent une augmentation de 5 % du coût énergétique après un marathon à vitesse de course constante; les auteurs expliquent cette faible variation du coût énergétique par le fait que la coordination neuromusculaire mise en jeu en course à pied est si ancrée phylogénétiquement que seules des conditions pathologiques pourraient venir l'altérer [65]. D'autres auteurs ont pu mettre en évidence des augmentations plus importantes de coût énergétique après la réalisation d'un exercice prolongé. Caractérisant les efforts de longue durée, Xu et Montgomery [88] ont montré que la réalisation d'une course de 90 minutes à 80 % de VO₂max avait pour effet principal d'augmenter VO₂; de plus, ces valeurs étaient significativement plus élevées que celles obtenues après 90 minutes de course à 65 % de VO₂max. Cependant, cette intensité élevait également le coût énergétique post-exercice. Dans une étude récente réalisée chez une population sportive (VO₂max = 56,6 mL O₂.min⁻¹.kg⁻¹), Sproule [76] montre que des courses de 40 et 60 minutes réalisées à 70 et 80 % de VO₂max augmentaient le coût énergétique: cette augmentation est majorée par la durée et l'intensité d'exercice. Cette dérive de consommation d'oxygène est partiellement expliquée par l'augmentation de la température corporelle («effet Q10»), qui joue un rôle indirect sur l'accroissement du débit ventilatoire et donc de la consommation d'oxygène enregistrée au cours de l'effort. Cependant, l'auteur a pu montrer également que l'augmentation ou la stabilité de Cr au cours de l'exercice prolongé était observée indifféremment chez les coureurs les plus «économiques» ou non. L'augmentation de coût énergétique n'est toutefois pas enregistrée de façon systématique dans toutes les études. Morgan et al [57] n'ont enregistré aucune variation de paramètres physiologiques après une série de courses à pied de 30 minutes effectuée sur tapis roulant (90 % de VO₂) 1, 2 et 4 jours après un effort maximal. L'ensemble de ces investigations indique que peu d'altérations liées à la fatigue sont relevées lorsque les exercices proposés sont de durée inférieure à 30 minutes. Les résultats de cette étude sont en concordance avec les résultats de Williams et al [84], qui n'observent aucune variation significative de VO₂ dans deux populations d'hommes et de femmes effectuant une série de courses maximales de 30 minutes sur tapis roulant et sur piste.

L'ensemble des résultats met en exergue le fait qu'aucun effet de la durée n'est enregistré sur la valeur du coût énergétique pour des courses ne dépassant pas 30 minutes. Au-delà de ce temps d'effort (entre 40 minutes et 2 heures 15), Cr augmente en fonction de la durée mais également en fonction de

l'intensité d'exercice. Cependant, l'ensemble des facteurs affectant $\dot{V}O_2$ lors de courses à intensité modérée et à vitesse constante n'est pas encore totalement identifié [60]. L'enregistrement de faibles dérives de seulement $\dot{V}O_2$ lors de courses à pied de moyenne et longue durées pour un même coureur est associé à une capacité de performance plus importante pour ce type d'effort [60]. Toutefois, cette variation du coût énergétique semble évoluer de façon différente en fonction, non seulement de la durée et de l'intensité d'effort, mais également de la spécificité de l'exercice réalisé (course prolongée, triathlon, duathlon...). En effet, en course à pied, $\dot{V}O_2$ évolue différemment lorsque l'exercice n'est plus qualifié de « monotone » mais de « multivarié », combinant différentes modalités d'exercice.

Évolution du coût énergétique au cours d'un effort de type « multivarié » (i.e., triathlon) : incidence sur la performance

Composantes de la performance lors de la réalisation d'un triathlon

Avec l'apparition de sports d'endurance comme les épreuves de triathlon (natation, cyclisme, course à pied), qualifiés aujourd'hui encore de sports récents, le coureur est confronté à de nouvelles sensations lorsqu'il aborde la dernière épreuve de course à pied. L'intérêt grandissant pour caractériser ces disciplines pose le problème de l'évaluation précise des contraintes bioénergétiques et biomécaniques engendrées par les différentes compétitions, ainsi que les effets des différentes modalités d'entraînement. Un certain nombre d'études s'est intéressé à la caractérisation des altérations physiologiques survenant au cours et après la réalisation de ce type d'exercice [51, 63]. Ces observations, et la perception subjective de l'effort différente du triathlète lors de la réalisation de la course à pied, ont conduit de nombreux auteurs à s'interroger sur l'origine des modifications survenant lors de cette dernière épreuve, ainsi que de leurs éventuelles conséquences sur la performance [8, 35].

Les facteurs déterminants de la performance en triathlon semblent être, selon certains auteurs [51], proches de ceux qui prévalent dans les disciplines de longue durée; selon d'autres [64], ces facteurs sont essentiellement spécifiques de ce type d'épreuve. Les facteurs tels que la capacité de thermolyse [63] et/ou la faculté qu'a le triathlète à dépenser moins d'énergie pendant l'épreuve [28, 51] sont autant de facteurs identifiés comme responsables de la performance en triathlon. Cependant, s'il est bien établi que la fraction d'utilisation de $\dot{V}O_{2max}$ pendant un effort de course à pied prolongée constitue un des facteurs déterminant de la performance [32], il semble que cela soit aussi le cas en triathlon. Les résultats des travaux de Dengel et al [28] confirment que le coût énergétique a une influence primordiale dans la réalisation d'une performance en triathlon. Toutefois, les valeurs des paramètres bioénergétiques et/ou biomécaniques enregistrées en course à pied dépendent des conditions de réalisation des deux épreuves précédentes. Les premiers résultats proposés par Boone et Kreider [8] ont constitué une base essentielle de l'évaluation de la variation de Cr de la course à pied à la suite d'une épreuve de cyclisme. Dans cette étude, les auteurs ont pu mettre en évidence les effets d'un exercice de pédalage de 3 minutes effectué à 80 % de la fréquence cardiaque maximale, sur les paramètres physiologiques enregistrés lors d'un effort de 5 minutes de course sur tapis roulant à 9,6 km.h⁻¹. Ces auteurs montrent que Cr était plus élevé lorsque celui-ci était effectué après un effort de cyclisme, en comparaison à un effort de course seule de durée identique. Cependant, il n'y avait aucun triathlète dans la population étudiée mais uniquement des étudiants physiquement actifs. Afin de compléter cette première étude, Kreider et al [49] démontrèrent qu'à la fin d'un triathlon réalisé entièrement en laboratoire (800 m natation, 40 km cyclisme et 10 km course à pied), la consommation d'oxygène, le débit ventilatoire, la fréquence cardiaque et la différence artérioveineuse en oxygène étaient supérieurs lors du 10 km du triathlon comparé à l'épreuve de 10 km réalisée de façon isolée. Ces auteurs en conclurent que les modifications cardiovasculaires et pulmonaires étaient liées à un besoin accru de dispersion de la chaleur pendant l'épreuve de 10 km du triathlon. Manifestement, l'ensemble des résultats obtenus dans ces deux études constitue une base de données importante pour des conditions de laboratoire. Cependant, les valeurs enregistrées lors d'une course effectuée sur tapis roulant posent le problème de la représentation de la réalité de la pratique sportive. En partant de ce constat, Guézennec et al [35] ont comparé, dans des conditions de terrain, les paramètres ventilatoires obtenus en course à pied d'un triathlon « olympique » (1,5 km natation, 40 km cyclisme et 10 km course à pied) et lors d'une épreuve de 10 km de course contrôle sur piste à la même vitesse. Ils confirmèrent, par cette expérience, l'augmentation du coût énergétique de la course à pied du triathlon par rapport à la course contrôle de 10 km (respectivement 224 mL O₂.kg⁻¹.km⁻¹ et 204 mL O₂.kg⁻¹.km⁻¹). Ces auteurs conclurent en la diminution de l'efficacité en course du triathlète et évoquèrent le rôle joué par les perturbations biomécaniques, comme la longueur et la fréquence de la foulée. Dans un contexte expérimental similaire, Hausswirth et al [37] ont comparé 45 minutes de course à pied sur piste effectuées au cours d'un triathlon, à une course isolée de 45 minutes réalisée à vitesse identique. Les auteurs ont pu confirmer l'augmentation de Cr de la course à pied du triathlon en comparaison avec la course isolée (respectivement 224 mL O₂.kg⁻¹.km⁻¹ et 207 mL O₂.kg⁻¹.km⁻¹). Afin d'expliquer cette élévation de Cr lors du triathlon, les auteurs ont évoqué une hypovolémie et une perte de poids plus importante à l'issue

du triathlon, la variation de ces paramètres semble liée à la durée de l'épreuve mais également à la spécificité de l'activité, celle-ci combinant différents changements de posture du corps. L'origine de ces modifications bioénergétiques pourrait être biomécanique, liée aux altérations de la longueur des foulées. Dans cette même étude, les auteurs ont montré que la phase initiale de la course à pied du triathlon était associée à des longueurs de foulée plus faibles, le triathlète adoptant une fréquence plus importante. Cette adaptation du coureur aux contraintes de la tâche intervient immédiatement après la réalisation de l'épreuve cycliste, celle-ci pouvant induire des modifications posturales par le passage d'une position assise à une position debout. Toutefois, en phase terminale du triathlon, les triathlètes adoptent une longueur de foulée dont les valeurs sont très proches de celles relevées lors de l'épreuve de course à pied isolée [37, 39]. De plus, les triathlètes adoptent en début de course à pied du triathlon une position plus inclinée vers l'avant, ainsi qu'une flexion du genou plus importante en phase aérienne comparée à la course contrôle. Ces paramètres pourraient partiellement expliquer les plus grandes valeurs de Cr relevées en triathlon.

Les activités qualifiées de « combinées » ou de « multivariées » comme le triathlon semblent posséder leur propre spécificité essentiellement dans l'altération des paramètres du mouvement qu'induisent les changements posturaux pendant les épreuves.

Comparaison du coût énergétique de différentes courses à pied: triathlon et courses de moyenne et longue durée

Les épreuves de triathlon « olympique » et les épreuves de marathon possèdent la caractéristique commune de solliciter l'organisme sur des durées d'effort relativement proches (entre 2 heures et 2 heures 15). Certains auteurs ont été amenés à se poser de nouvelles questions sur les caractéristiques bioénergétiques et biomécaniques du triathlon. Afin de comparer ces deux épreuves au sein d'une même population de triathlètes, trois études ont évalué les variations du coût énergétique de la course à pied d'un triathlon et celui enregistré en phase terminale d'une course à pied de durée prolongée [37, 39, 40].

Les résultats de ces études indiquent qu'une course à pied d'une durée de 2 heures 15 provoque une diminution sensible de l'efficacité du coureur comparativement à la course à pied effectuée lors d'un triathlon de même durée. Cette baisse de rendement est mise en évidence par l'augmentation du Cr enregistrée au cours des dernières 45 minutes de course (*figure 3*). Ces différences ont été essentiellement attribuées à l'augmentation de l'utilisation des acides gras pendant la course à pied prolongée [37].

Une autre hypothèse pourrait être liée à une altération des paramètres du mouvement tels que la longueur des foulées et/ou les différentes angulations du corps et des segments du corps. Si la longueur moyenne de foulée des triathlètes au cours d'un triathlon est sensiblement identique en phase terminale d'épreuve comparée à celle adoptée lors de la course contrôle [39], celle-ci est réduite immédiatement après l'épreuve de cyclisme comparée à cette même course contrôle. Toutefois, cette valeur est peu différente de celle relevée lors de la course de 2 heures 15, cette épreuve induisant une réduction progressive de la longueur de la foulée jusqu'à l'arrêt de l'exercice. L'épreuve cycliste du triathlon induit également des modifications posturales telles que l'adoption d'une position plus inclinée vers l'avant en comparaison avec la course à pied de 2 heures 15. Les plus grandes valeurs de Cr enregistrées au cours de la course de 2 heures 15 sont associées à une extension du genou plus importante à la pose du talon au sol, ainsi qu'à une flexion du genou plus grande en phase aérienne comparée à la course à pied du triathlon. L'augmentation de Cr peuvent être également être expliquée par des altérations de la fonction musculaire, certaines épreuves induisant une plus grande fatigue musculaire. Tout comme l'épreuve de marathon, les épreuves de triathlon engendrent des lésions musculaires objectivées par l'augmentation des concentrations plasmatiques d'enzymes sarcoplasmiques et de myoglobine [34, 42]. Cependant, il est admis que les épreuves d'endurance en course à pied sont plus traumatisantes que la combinaison des trois disciplines du triathlon [34, 81]. Cela est vérifié lorsqu'on compare les effets d'un triathlon à ceux d'un marathon de durée identique sur des paramètres métaboliques (lactico-déshydrogénase, créatine kinase) [48] et/ou électromyographiques (muscle vastus lateralis) [40].

CONCLUSION

La difficulté d'évaluer précisément la notion de rendement mécanique en course à pied confère à la mesure et à l'interprétation du coût énergétique un intérêt majeur sur le terrain. De plus, la complémentarité des études citées mettant en relation des processus bioénergétiques, biomécaniques et psychologiques nous oriente vers une approche plurifactorielle des mécanismes à l'origine des

variations du coût énergétique. Cette valeur de coût énergétique est dépendante non seulement des paramètres propres à chaque individu (poids, longueur des membres inférieurs, capacité de thermolyse...), mais également de la nature de l'activité pratiquée (marathon, triathlon, duathlon...).

RÉFÉRENCES

- 1 Acevedo EO, Goldfarb AH. Increased training intensity: effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. *Med Sci Sport Exerc* 1989 ; 21 : 563-8.
- 2 Aleshinski SY. An energy sources and fractions approach to the mechanical energy expenditure problem. 1. Basic concepts, description of the model, analysis of a one link system movement. *J Biomechanics* 1986 ; 19 : 287-93.
- 3 Alexander RMN. Energy saving mechanism in walking and running. *J Exp Biol* 1991 ; 160: 55-69.
- 4 Alexander RMN. Simple model of walking and jumping. *Hum Mov Sci* 1992 ; 11 : 3-9.
- 5 Bailey S, Pate R. Feasibility of improving running economy. *Sports Med* 1991 ; 12 : 228-36.
- 6 Belli A, Avela J, Komi PV. Mechanical energy assesment with different methods during running. *Int J Sports Med* 1993 ; 14 : 252-6.
- 7 Boileau RA, Mayhew JL, Riner WF. Physiological characteristics of elite middle and long distance runners. *Can J Appl Sports Sci* 1982 ; 7 : 167-72.
- 8 Boone T, Kreider RB. Bicycle exercise before running: effect on performance. *Ann Sports Med* 1986 ; 3 : 25-9.
- 9 Brisswalter J. Étude des modalités d'adaptation énergétique optimales dans les activités de locomotion. [Habilitation à Diriger les Recherches]. Poitiers : université de Poitiers ; 1996.
- 10 Brisswalter J, Legros P. Comparaison du coût énergétique dans une population de coureurs de moyennes et de longues distances. *Science & Sports* 1992 ; 7 : 43-50.
- 11 Brisswalter J, Legros P. Daily stability in energy cost of running, respiratory parameters and stride rate among well trained middle distance runners. *Int J Sports Med* 1994 ; 15 : 238-41.
- 12 Brisswalter J., Legros P. Variability in energy cost of running during one training season in high level runners. *J Sports Med Phys Fitness* 1994 ; 34 : 135-40.
- 13 Brisswalter J, Legros P, Durey A. Stabilité intra-individuelle des paramètres cinématiques et du coût énergétique de la course à pied chez des athlètes spécialistes de moyennes distances. *Science & Sports* 1994 ; 9 : 145-53.
- 14 Brisswalter J, Legros P, Durey A. Variabilité du coût énergétique de la course à pied : effet de la spécificité de la vitesse d'entraînement sur l'évolution des paramètres physiologiques et cinématiques de la course à pied. *Science & Motricité* 1995 ; 25 : 3-11.
- 15 Brisswalter J, Legros P, Durand M. Running economy, preferred stride rate correlated to body dimensions in ente middle distance runners. *J Sports Med Phys Fitness* 1996 ; 36 :1-9.
- 16 Brisswalter J, Mottet D. Energy cost and stride duration at preferred transition gait speed between walking and running. *Can J Appl Physiol* 1996 ; 21 : 471-80.
- 17 Brisswalter J, Fougeron B, Legros P. Variability in energy cost and walking gait during a

racewalking in competitive race walkers. *Med Sci Sports Exerc* 1998 ; 30 : 1451-5.

18 Brueckner JC, Atchou G, Capelli C, Duvallet A, Jousselein E, Rieu M. The energy cost of running increases with the distance covered. *Eur J Appl Physiol* 1991 ; 62 : 385-9.

19 Butts NK, Henry BA, McLean D. Correlations between VO₂max and performance times of recreational triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 1991 ; 31 : 339-44.

20 Cavanagh PR, Kram R. Stride length in distance running: velocity, body dimensions, and added mass effects. *Med Sci Sports Exerc* 1989 ; 21 : 467-79.

21 Cavanagh PR, Kram R. The efficiency of human movement. A statement of the problem. *Med Sci Sports Exerc* 1985a ; 17 : 304-8.

22 Cavanagh PR, Kram R. Mechanical and muscular factors affecting the efficiency of human movement. *Med Sci Sports Exerc* 1985b ; 17 : 326-31.

23 Conley D, Krahenbuhl G, Burkett LN, Millar AL. Physiological changes accompanying training. *Phys Sports Med* 1984 ; 12 : 1036.

24 Conley D, Krahenbuhl G. Running economy and distance running performance in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1980 ; 12 : 357-60.

25 Dallau G., Belli A, Bourdin M, Lacour JR. The spring mass model and the energy cost of treadmill running. *Eur J Appl Physiol* 1998 ; 77 : 257-63.

26 Daniels J. A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 1985 ; 17 : 332-8.

27 Daniels J, Scardina N, Hayes J, Foley P. Variations in VO₂ submax during treadmill running. *Med Sci Sports* 1984 ; 16 : 108-12.

28 Dengel DR, Flynn MG, Costill DL, Kirwan JP. Determinants of success during triathlon competition. *Res Quart Exerc Sport* 1989 ; 60 : 234-8.

29 Di Prampero PE. Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochim Pharmacol* 1981 ; 89 : 144-222.

30 Di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 1986 ; 7 : 55-72.

31 Epstein Y, Stroschein LA, Pandolf KB. Predicting metabolic cost of running with and without backpack loads. *Eur J Appl Physiol* 1987 ; 56 : 495-500.

32 Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billing JE, Costill DL. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports* 1979 ; 11 : 338-44.

33 Fernahall B, Kohrt W. The effect of training specificity on maximal and submaximal physiological responses to treadmill and cycle ergometry. *J Sports Med Phys Fitness* 1990 ; 30 : 268-75.

34 Guézennec CY, Giaoui M, Voignier JP, Legrand H, Fournier E. Évolution des taux plasmatiques de LDH, CPK et myoglobine à l'issue d'une course de 100 km et d'un triathlon. *Science & Sports* 1986 ; 1 : 255-63.

35. Guézennec CY, Vallier JM, Bigard AX, Durey A. Increase in energy cost of running at the end of a

triathlon. *Eur J Appl Physiol* 1996 ; 73 : 440-5.

36 Hagberg J, Nagle F, Carlson J. Transient oxygen uptake at the onset of exercise. *J Appl Physiol* 1980 ; 52 : 571-4.

37 Hausswirth C, Bigard AX, Berthelot M, Thomaïdis M, Guézennec CY. Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 1996 ; 17 : 572-9.

38 Hausswirth C, Bigard AX, Le Chevalier JM. The Cosmed K4 telemetry system as an accurate device for oxygen uptake measurements during exercise. *Int J Sports Med* 1997a ; 18 : 449-53.

39 Hausswirth C, Bigard AX, Guézennec CY. Relationship between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 1997b ; 18 : 330-9.

40 Hausswirth C. Étude des altérations du coût énergétique de la course à pied au cours du triathlon et du marathon. [Thèse], Paris : université de Paris-Sud ; 1996.

41 Hirsch JA, Bishop B. Human breathing patterns on mouthpiece or face mask during air, CO₂, or low O₂. *J Appl Physiol* 1982 ; 53 : 1281-90.

42 Holly R, Barnard R, Rosenthal M, Applegate E, Pritikin N. Triathletes characterization and response to prolonged strenuous competition. *Med Sci Sports Exerc* 1986 ; 18 : 123-7.

43 Holt KG, Hamill J, Andres RO. The force driven harmonic oscillator as a model for human locomotion. *Hum Mov Sci* 1990 ; 9 : 556-8.

44 Holt KG, Hamill J, Andres RO. Predicting the minimal energy costs of human walking. *Med Sci Sports Exerc* 1991 ; 23 : 491-8.

45 Jones BH, Toner MM, Daniels WL, Knapik JJ. The energy cost and heart rate response of trained and untrained subjects walking and running in shoes and boots. *Ergonomics* 1984 ; 27 : 895-902.

46 Kaneko M. Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. *J Biomechanics* 1990 ; 23 : 57-63.

47 Kelso JAS, Holt KG, Rubin P, Kigler PN. Pattern of human interlimb coordination emerge from the properties of nonlinear limit cycle oscillatory processes: theory and data. *J Mot Behav* 1981 ; 13 : 226-61.

48 Köhler V, Neumann G. Sportmedizinische Untersuchungen bei kombinierten Ausdauerbelastung. *Med Sport* 1987 ; 27 : 140-3.

49 Kreider RB, Cundiff DE, Hammet JB, Cortes CW, William KW. Effects of cycling on running performance in triathletes. *Ann Sports Med* 1988 ; 4 : 220-5.

50 Lacour JR, Padilla S, Barthelemy JC, Dormois D. The energetics of middle distance running. *Eur J Appl Physiol* 1990 ; 60 : 38-43.

51 Laurenson NM, Fulcher KY, Korkia P. Physiological characteristics of elite and club level female triathletes during running. *Int J Sports Med* 1993 ; 14 : 455-9.

52 Legg Si, Mahanty A. Energy cost of backpacking in heavy boots. *Ergonomics* 1985 ; 29 : 433-8.

53 Martin PE, Heise GD, Morgan DW. Interrelationships between mechanical power, energy transfert,

and walking and running economy. *Med Sci Sports Exerc* 1993 ; 25 : 508-15.

54 McGruer G, Montgomery DE, McGill D. Inclined treadmill running economy and uphill running performance. *Can J Appl Sport Sci* 1988 ; 13 : 67-8.

55 Medbf JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. Anaerobic capacity determined by accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* 1988 ; 64 : 50-60.

56 Messier SP, Cirillo KJ. Effects of a verbal and visual feed-back system on running technique, perceived exertion and running economy in female novice runners. *J. Sports Sci.* 1989 ; 7 : 113-26.

57 Morgan DW, Martin PE, Baldini F, Krahenbuhl G. Effects of a prolonged maximal run on running mechanics. *Med Sci Sports Exerc* 1990 ; 22 : 834-40.

58 Morgan DW, Baldini F, Martin PE. Day to day stability in running economy and step length among well trained male runners. *Int J Sports Med* 1987 ; 8 : 242.

59 Morgan DW, Martin P, Craib M, Caruso C, Clifton R, Hopewell R. Effect of step length optimization on the aerobic demand of running. *J Appl Physio.* 1994 ; 77 : 245-51.

60 Morgan DW, Martin P, Krahenbuhl G. Factors affecting running economy. *Sports Med.* 1989 ; 7 : 310-30.

61 Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS, Baldini FD. Variability in running economy and mechanics among trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 1991 ; 23 : 378-83.

62 Nelson W. Physical principles for economies of skilled movements. *Biol Cybern* 1983 ; 46 : 135-47.

63 O'Toole ML, Douglas PS, Hiller WDB. Applied physiology of a triathlon. *Sports Med* 1989 ; 8 : 201-25.

64 O'Toole ML, Hiller WDB, Crosby LO, Douglas PS. The ultraendurance triathlete: a physiological profile. *Med Sci Sports Exerc* 1987 ; 19 : 45-50.

65 Olgiati R, Jaquest J, di Prampero PE. Energy cost of walking and exertional dyspnea in multiple sclerosis. *Am Rev Respir Dis* 1986 ; 134: 1005-10.

66 Pandolf KB, Givoni B, Goldman RF. Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *J Appl Physiol* 1977 ; 43 : 577-81.

67 Pugh LGCE. Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *J Physiol* 1970 ; 207 : 823-35.

68 Sargeant AJ, Beelen A. Human muscular fatigue in dynamic exercise. In: Sargeant AJ, Kernell D, eds. *Neuromuscular fatigue*. Amsterdam: Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences; 1993. p 81-92.

69 Sargeant AJ. Human Power output-Determinants of maximum performance. In: Marconnet P, Saltin B, Poortmaans J, eds. *Human muscular function during dynamic exercise*. *Med Sport Sci* 1996 ; 41 : 10-20.

70 Sargent R. The relation between oxygen requirement and speed running. *Proc R Soc London* 1926 ; 100: 10-22.

- 71 Scott G, Ahmed AA, Robert J, Moffart PD. Physiological effects of walking and running with hand held weight. *J Sports Med Phys Fitness* 1989 ; 29 : 384-7.
- 72 Scrimgeour AG, Noakes TD, Adams B, Myburgh K. The influence of weekly training distance on fractional utilization of maximal aerobic capacity in marathon and ultramarathon. *Eur J Appl Physiol* 1986 ; 55 : 202-9.
- 73 Siler WL. Is running style and economy affected by wearing respiratory apparatus? *Med Sci Sports Exerc* 1993 ; 25 : 260-4.
- 74 Sjödin B, Svedenhag J. Applied physiology of marathon running. *Sports Med* 1985 ; 2 : 83-99.
- 75 Sparrow WA. The efficiency of skilled performance. *J Mot Behav* 1983 ; 15 : 237-61.
- 76 Sproule J. Running economy deteriorates following 60 min of exercise at 80 % $\dot{V}O_2$ max. *Eur J Appl Physiol* 1998 ; 77 : 366-71.
- 77 Stainsby WN, Gladden LB, Barclay JK, Wilson BA. Exercise efficiency: validity of base line substractions. *J Appl Physiol* 1980 ; 48 : 518-22.
- 78 Svedenhag J, Sjödin B. Maximal and submaximal oxygen uptake and blood lactate in elite male middle and long distance runners. *Int J Sports Med* 1984 ; 5 : 255-61.
- 79 Svedenhag J, Sjödin B. Physiological characteristics of elite male runners in and off season. *Can J Appl Sport Sci* 1985 ; 10 : 127-33.
- 80 Van Ingen Schenau G, Cavanagh PR. Power equations in endurance sports. *J Biomech* 1990 ; 23 : 865-81.
- 81 Van Rensburg JP, Kielblock AJ, Van der Linde A. Physiological and biochemical changes during a triathlon competition. *Int J Sports Med* 1986 ; 1 : 30-5.
- 82 Wilcox A, Bulbulian R. Changes in running economy relative to $\dot{V}O_2$ max during a cross-country season. *J Sports Med Phys Fitness* 1984 ; 24 : 321-6.
- 83 Williams KR, Cavanagh PR. A model for the calculation of mechanical power during distance running. *J Biomech* 1983 ; 16 : 115-28.
- 84 Williams TJ, Krahenbuhl G, Morgan DW. Daily variability in running economy of moderately trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 1991 ; 23 : 944-8.
- 85 Winter DA. A new definition of mechanical work done in human movement. *J Appl Physiol* 1979 ; 46 : 79-83.
- 86 Winter DA. Kinematic and kinetic patterns in human gait: variability and compensating effects. *Hum Mov Sci* 1984 ; 3 : 51-76.
- 87 Woledge RC, Curtin NA, Homsher E. Energetic aspects of muscle contraction. London: Academic Press; 1985.
- 88 Xu F, Montgomery DL. Effect of prolonged exercise at 65 % and 80 % of $\dot{V}O_2$ max on running economy. *Int J Sports Med* 1995 ; 16 : 309-15.

FIGURES

Figure 1. Représentation schématique de la transformation de l'énergie métabolique en énergie mécanique nécessaire au déplacement [80]. Les valeurs E1, E2, E3, E4 et E5 représentent des étapes de perte d'énergie dans ce processus de transformation. E1 : l'énergie est dissipée sous forme de chaleur ; E2: l'énergie nécessaire au fonctionnement des organes qui ne sont pas directement sollicités dans le mouvement; E3: l'énergie musculaire dissipée sous forme de chaleur dans les processus de friction à l'intérieur de l'organisme; E4: l'énergie utilisée pour lutter contre la gravité ; E5: l'énergie dissipée dans les phénomènes de friction lors du déplacement.

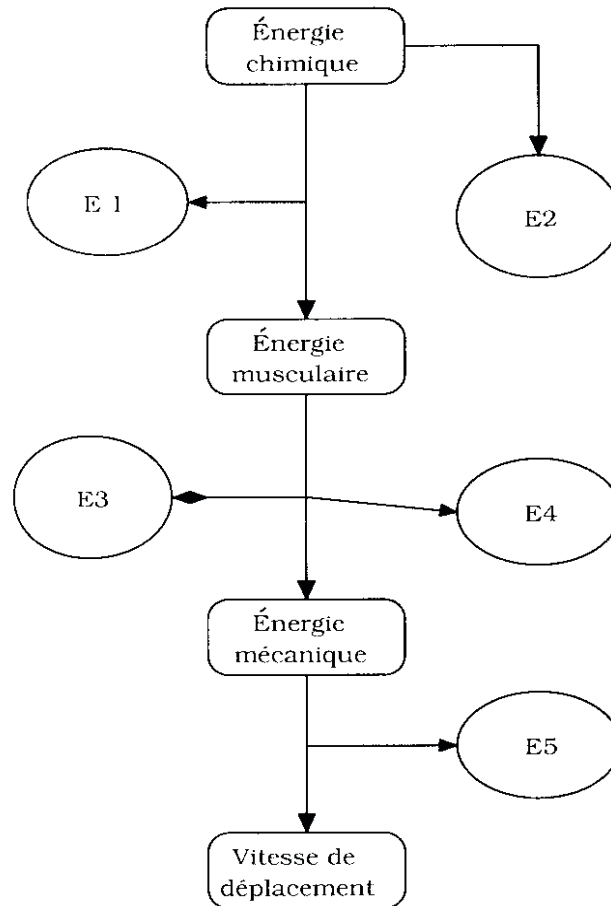


Figure 2. Variation de la consommation d'oxygène en fonction de la fréquence des foulées [44]. FLC représente la fréquence librement choisie par le sujet, les fréquences imposées représentent une variation de + 5, 10 et 15 % de FLC.

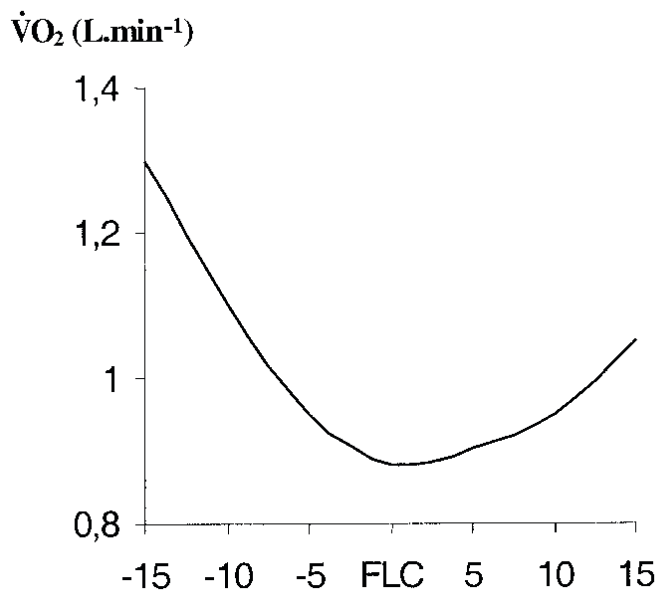


Figure 3. Variation du coût énergétique (Cr) pendant les 45 minutes de «course contrôlée» lors d'un triathlon et au cours de la phase terminale d'un marathon [39]. Du début jusqu'à la fin de l'exercice (de 2 à 42 minutes), les valeurs de coût énergétique obtenues lors du marathon et du triathlon sont significativement supérieures à celles obtenues lors de la course contrôlée ($p < 0,01$). De plus, chaque valeur obtenue lors du marathon est significativement plus élevée à celles enregistrées lors du triathlon ($p < 0,01$). □ Marathon; ---o--- triathlon; ---O--- course contrôlée.

