

Caroline Praz^{1,2}, Steve Jagdeep¹, Manu Praz¹, Olivier Dériaz¹

¹ Institut de recherche en réadaptation-réinsertion, Clinique romande de réadaptation SUVAcare

² Institut des sciences du mouvement et du sport, ETH Zürich

Coût énergétique de la course en montée et en descente chez les coureurs entraînés pour la course de montagne

Résumé

La performance en course à pied est principalement influencée par la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), la fraction de la $\dot{V}O_{2max}$ pouvant être maintenue pendant une durée donnée et par le coût énergétique. Entre les coureurs d'élite, les plus grandes différences interindividuelles sont observées pour ce dernier paramètre. Celui-ci offrirait à certains d'entre eux un grand potentiel d'amélioration. Quantité de facteurs influencent le coût énergétique. Nous avons cherché à savoir si le type de terrain sur lequel un sportif s'entraîne a un effet sur le coût.

Nous avons comparé 2 groupes: un groupe de coureurs de montagne ($n = 10$) et un de coureurs de plat ($n = 10$). Des tests de course sur tapis roulant à plat, en montée et en légère descente avec calorimétrie indirecte, des mesures anthropométriques, ont permis l'analyse des différences physiologiques entre les groupes. Leur coût énergétique a été calculé en mesurant leur consommation d'oxygène.

Nous avons constaté que les coureurs de montagne étaient plus économiques à plat lorsque la vitesse était basse, mais que cette différence entre les groupes diminuait jusqu'à disparaître lorsque la vitesse augmentait. En pente, leur rendement contre la gravité était plus élevé mais, à nouveau, uniquement pour des vitesses lentes.

Il apparaît donc que l'entraînement en course de montagne confère des avantages énergétiques, par une amélioration du coût, et permet donc de courir plus vite pour la même dépense énergétique pour des courses lentes.

Abstract

Running performance is mainly influenced by the maximum oxygen consumption ($\dot{V}O_{2max}$), the $\dot{V}O_{2max}$ fraction that can be maintained during a given exercise duration and the energetic cost. Between elite runners, the greatest interindividual differences are observed for this last parameter. For some of these runners, it would be a great optimization potential. Many factors influence the energetic cost of running. We have tried to know if the training run profile has an influence on the cost.

We compared 2 groups of runners: a group of fell runners ($n = 10$) and a group of road or track runners ($n = 10$). Treadmill tests horizontal, uphill and slightly downhill with indirect calorimetry, anthropometric measurements, were performed to characterize the 2 groups. Energetic cost was determined with the measure of oxygen consumption.

When they ran horizontally, fell runners were more economical with low running speed but the difference between the 2 groups became narrower when they accelerated, and finally there was no difference any more at higher running speeds.

For down- and uphill running the efficiency against gravity of the fell runners was greater but again only for very low speed.

So it appears that a fell running training brings some energetic improvement that allows to run faster with the same energy expenditure for slow running speed.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 59 (1), 40–44, 2011

Introduction

Ces dernières années, la course à pied de montagne a connu un essor très important dans notre pays, avec des manifestations toujours plus nombreuses et de plus en plus de participants. Parallèlement, néanmoins, les connaissances scientifiques sur le sujet n'ont pas connu le même élan. C'est pour cette raison qu'il nous est apparu pertinent d'observer si la pratique de cette discipline entraîne des changements et des adaptations d'un point de vue physiologique. Dans notre étude, nous nous sommes particulièrement intéressés à un paramètre physiologique, le coût énergétique, et à une caractéristique de la course de montagne, la pente.

Mais, pour mieux comprendre les relations qui peuvent exister entre ces différents facteurs, il nous faut d'abord définir quelques notions liées à une approche scientifique de la course à pied. Physiologiquement, la performance en endurance et spécialement en course à pied est déterminée par 3 paramètres principaux. On dis-

tingue la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), la fraction de la $\dot{V}O_{2max}$ utilisée pour une durée donnée et le coût énergétique ou économie de course [6, 10]. La $\dot{V}O_{2max}$ représente la plus grande quantité d'oxygène qu'une personne est capable d'utiliser par minute lors d'un effort maximal. Un effort de l'intensité de la $\dot{V}O_{2max}$ peut être soutenu pendant 6 à 10 min [4]. La fraction de la $\dot{V}O_{2max}$ (en % $\dot{V}O_{2max}$) est le pourcentage de cette $\dot{V}O_{2max}$ qu'une personne est capable de maintenir durant un effort sous-maximal d'une certaine durée supérieure de 6 à 10 min. Cette notion est fortement liée à celle du seuil anaérobie. Finalement, le coût énergétique représente la quantité d'oxygène ou d'énergie consommée pour parcourir une certaine distance. Un coureur au style de course économique présentera un coût énergétique de la course bas. Le coût énergétique peut être comparé à la notion de rendement qui représente la fraction d'énergie consommée pour produire un travail mécanique [12]. Le rendement est spécialement intéressant en pente: on peut alors parler de rendement contre la gravité. Celui-ci

représente le quotient entre l'énergie mécanique produite pour agir contre la gravité et l'énergie totale consommée que l'on mesure par la consommation d'oxygène.

Le coût énergétique a , bien sûr, été calculé pour la marche et pour la course. Pour la marche, le coût énergétique dépend de la vitesse de marche et de la pente [11]. Par contre, pour la course, le coût énergétique dépend également de la pente mais reste constant quelle que soit la vitesse pour des vitesses entre 10 et 25 km \cdot h $^{-1}$ [11, 13, 14].

Lors d'un exercice, le coût énergétique dépend principalement de la dépense énergétique due au travail musculaire. Ce travail musculaire peut être divisé en travail excentrique (le muscle s'allonge) et en travail concentrique (le muscle se raccourcit). Au niveau énergétique, les 2 types de contractions ne sont pas équivalents puisque le travail concentrique demande entre 3 et 5 fois plus d'énergie que le même travail en excentrique [1, 17]. Le coût énergétique de la course dépend donc de la proportion de chaque type de contractions pour un effort donné [13].

L'importance relative des 2 types de travail change en fonction de la pente [14] pour des pentes entre -15 et $+15\%$. Plus la pente est positive, plus la part de concentrique augmente et celle d'excentrique diminue et inversement pour des pentes négatives. Pour des montées plus raides que $+15\%$, on a presque uniquement besoin d'accélérer le corps et presque pas de freiner; on peut donc négliger le travail excentrique et ne considérer que le travail concentrique. Le coût énergétique est alors très élevé [8]. Un autre facteur intervient également pour toutes les pentes ascendantes: il faut fournir une grande quantité de travail pour agir contre la gravité (gain en énergie potentielle), plus la montée est raide et plus la quantité de travail à fournir sera grande. C'est pour cette raison que, pour des pentes supérieures à $+15\%$, la quantité totale de travail et donc le coût énergétique augmentent avec la pente sans que la proportion de chaque type de travail ne soit modifiée. À plat, on doit autant accélérer que freiner, la quantité de travail en excentrique est donc la même que celle en concentrique. À la descente, le coût énergétique diminue jusque vers -15% de pente, pente à partir de laquelle le travail n'est plus qu'excentrique [8], pour augmenter par la suite pour des pentes négatives plus raides (fig. 1). Dans ce cas, malgré l'absence de travail concentrique, la dépense augmente puisque le travail de freinage devient plus important quand la descente devient plus raide. Le coût énergétique de la course à pied varie donc avec la pente car la proportion entre le travail concentrique, très coûteux en énergie, et le travail excentrique, peu coûteux en énergie, se modifie suivant la pente, car plus une pente est raide et plus la quantité totale de travail à fournir est importante.

Il est raisonnable de penser que les gens qui s'entraînent spécifiquement pour la course de montagne développent des stratégies particulières pour minimiser leurs dépenses énergétiques lorsqu'ils courent en pente. On peut en effet supposer que l'entraînement dans une discipline entraîne une amélioration du rendement dans cette discipline [2, 7, 11, 16], par exemple, on sait qu'un cycliste entraîné a un meilleur rendement qu'un cycliste débutant [9] et qu'un alpiniste entraîné est plus économique lors de l'ascension d'un sommet qu'une personne non entraînée [5].

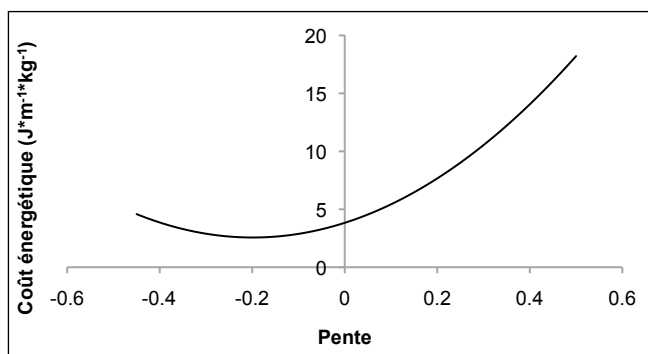


Figure 1: Coût énergétique de la course en fonction de la pente [15]. Coûts énergétiques calculés dans plusieurs travaux de Margaria et al. et Minetti et al. en fonction de la pente, pour des pentes allant de -50% à $+50\%$.

L'hypothèse de notre travail est donc que les coureurs de montagne seraient plus économiques et auraient un meilleur rendement que les coureurs de plat quand il s'agit de courir en pente. Leur coût énergétique serait donc inférieur à celui des coureurs de plat pour la course en montée et en descente.

Méthode

Sujets

20 sujets masculins (tab.1) ont été recrutés pour participer à cette étude. Ils devaient être en bonne santé et pratiquer la course à pied de manière régulière. De plus, des critères de performance ont été fixés sous forme de temps maximaux pour des courses données.

Parmi ces sujets, nous avons distingué 2 groupes de 10 personnes. Le groupe «coureurs de montagne» comprenait des coureurs entraînés pour et pratiquant des compétitions de course de montagne, alors que le groupe «coureurs à plat» comprenait des sujets entraînés pour la course à pied, mais pas pour la course de montagne. Dans ce second groupe, il était important que les coureurs ne pratiquent pas un entraînement régulier pour la course de montagne, c'est-à-dire qu'ils ne devaient pas courir sur un parcours du type «course de montagne» plus de 4 fois par année.

En ce qui concerne le type d'entraînements pratiqués par les coureurs de montagne, pendant la saison d'été, plus de la moitié de leurs entraînements ($2,9 \pm 1,6$ [moyenne \pm écart-type] sur un total de $4,9 \pm 1,5$) et de leur durée d'entraînement hebdomadaire ($3,5 \pm 1,8$ h sur un total de $5,6 \pm 1,9$ h) étaient pratiqués sur terrain montagneux, alors que les coureurs de plat réalisaient la totalité de leurs entraînements sur des parcours de type «plat».

Le protocole a été soumis et accepté par la Commission cantonale valaisanne d'éthique médicale (CCVEM).

Protocole d'investigation

Les sujets se sont rendus 2 fois au laboratoire de physiologie. La première fois, les sujets étaient priés de remplir 2 questionnaires qui permettaient de déterminer leur état de santé général, leur état de forme du jour et leur niveau d'entraînement pour la période en cours (et spécialement durant les 2 jours précédents) ainsi que leurs performances en compétition et leurs habitudes d'entraînement (total des entraînements en course à pied, entraînements de course à plat et entraînements de course en montagne).

	Coureurs de montagne (n = 10)	Coureurs de plat (n = 10)	p
Âge (années)	35 \pm 4	27 \pm 11	0,039*
Nombre de séances d'entraînement de course à pied par semaine	4,9 \pm 1,5	4,7 \pm 1,7	0,778
Durée totale des entraînements de course à pied par semaine (h)	5,6 \pm 1,9	7,1 \pm 3,8	0,276
Distance parcourue en courant par semaine (km)	60 \pm 29	56 \pm 24	0,724
Taille (m)	1,78 \pm 0,03	1,80 \pm 0,06	0,252
Poids (kg)	69 \pm 4	67 \pm 5	0,557
Pourcentage de graisse corporelle (%)	12,7 \pm 3,0	12,4 \pm 5,7	0,888

Table 1: Caractéristiques des sujets. On indique pour chaque groupe la moyenne et l'écart-type. Les valeurs de p donnent la significativité des différences entre les groupes. Une différence significative est indiquée par une *. Les 2 groupes sont donc très semblables en ce qui concerne leur volume d'entraînement et leurs mesures anthropométriques. Ils se distinguent néanmoins significativement par leur moyenne d'âge.

Les coureurs étaient ensuite soumis à un test de $\dot{V}O_{2max}$ en course à pied sur tapis roulant (Technogym, Runrace HC 1200, Cesena, Italie). Ils étaient équipés d'un système de calorimétrie indirecte (MetaMax, Cortex, Leipzig, Allemagne). Ce test de $\dot{V}O_{2max}$ était un test par paliers de 3 min avec une vitesse de départ à $7,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et un incrément de $1,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) par palier. Durant toute la durée du test, la pente restait nulle. Les données étaient relevées durant les 30 dernières secondes de chaque palier. Ce test étant un test maximal, les sujets devaient courir jusqu'à l'épuisement.

Le coût énergétique de la locomotion (C) a été déterminé de la façon suivante:

$$C = \dot{V}O_2 / (m \cdot v) \quad (\text{équation 1})$$

où $\dot{V}O_2$ est la consommation d'oxygène, m est la masse du sujet et v la vitesse de course.

Les valeurs de consommation d'oxygène présentées dans ce travail sont des valeurs brutes, comprenant la consommation au repos; cela dans le but d'être conforme à ce qui se fait habituellement dans les travaux de ce genre alors que pour les calculs de coût énergétique la consommation d'oxygène mesurée pendant les 3 min avant le début de la course a été soustraite à la consommation d'oxygène des paliers considérés afin de ne considérer que le coût de la locomotion. Pour nos analyses de coût, que ce soit pour les tests à plat ou en montée, nous avons dû exclure les paliers où les coureurs avaient dépassé leur seuil anaérobie. En dessus de ce seuil, la consommation d'oxygène n'est plus un aussi bon indicateur de la consommation d'énergie. Le seuil anaérobie a été fixé, pour chaque sujet, avec la concentration sanguine de lactate. La vitesse au seuil anaérobie étant définie par la plus haute vitesse à laquelle on peut courir durant 20 min sans avoir une augmentation de la concentration sanguine de lactate supérieure à $1 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ [3], nous avons considéré comme au-dessus du seuil tous les paliers où la concentration de lactate s'était élevée d' $1 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ ou plus par rapport au niveau de base.

Entre 48 h et 2 semaines après la première session de tests, il était demandé aux sujets de revenir au laboratoire pour la deuxième session. Cette seconde partie était consacrée spécifiquement à la course sur terrain en pente. Pour cela, 2 tests sur tapis roulant étaient réalisés. Entre les 2, une pause de 30 min était observée. Premièrement, on effectuait un test sous-maximal avec pente variable et vitesse constante à $7,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Contrairement au test sur tapis roulant du premier jour, on choisissait donc cette fois une vitesse qui restait fixe tout au long du test. Par contre, la pente du tapis variait au fil des paliers. La vitesse du tapis était de $7,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Chaque palier avait une durée de 5 min. On commençait par un palier à plat (pente de 0%), puis, on passait à un palier de descente à -4% et, ensuite, à des paliers de montée successivement à $+4$, $+8$, $+12$ et $+16\%$. Si on estimait que le seuil anaérobie était atteint lors du palier à $+12\%$, le test était interrompu à la fin de ce palier pour éviter que le test soit maximal. Comme pour le test de $\dot{V}O_{2max}$ à plat, les sujets étaient équipés d'un système de calorimétrie indirecte. Les valeurs étaient relevées sur les 30 dernières secondes de chaque palier.

En plus du coût énergétique, pour les 2 tests en montée, nous avons également calculé le rendement contre la gravité (η), c'est-à-dire la part de l'énergie consommée qui est utilisée pour l'élévation verticale du corps:

$$\eta = \frac{E_{pot}}{E} = \frac{m \cdot g \cdot h}{E} \quad (\text{équation 2})$$

où E_{pot} est le gain en énergie potentielle J, E l'énergie totale consommée, m la masse du sujet, g la constante de gravité qui est approximativement égale à $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ et h la distance verticale. En simplifiant par le poids du sujet (m) et par le temps (t) en s, on obtient l'équation suivante:

$$\eta = \frac{g \cdot v_{vert}}{P} \quad (\text{équation 3}),$$

avec P la puissance ($P = E \cdot m^{-1} \cdot t^{-1}$) et v_{vert} la vitesse verticale.

Après 30 min de repos, les sujets étaient à nouveau équipés des mêmes appareils que pour le test à $7,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ mais pour effectuer cette fois un test maximal avec pente variable et vitesse constante à $9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Ce test était très semblable à celui à $7,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. La vitesse était à nouveau constante et la pente variait tout au long des différents paliers d'une durée de 5 min chacun. À une vitesse de $9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, les sujets commençaient par un palier à plat (0%) et un palier de descente (-4%). Ensuite débutaient les paliers de montée avec un premier palier à $+4\%$ et un incrément de $+4\%$ à chaque palier. Au contraire du test à $7,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, ce test était un test maximal. Cela signifie que le dernier palier n'était pas fixé et que chaque sujet devait essayer d'atteindre la pente la plus importante possible et de tenir le plus de temps qu'il en était capable à cette pente.

Statistiques

Le logiciel Stata 11.0 (StataCorp LP, College Station, Texas, USA) a été choisi pour les calculs statistiques. Les 2 groupes ont été comparés au moyen d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur ou à mesures répétées (split-plot repeated measures designs) si nécessaire.

Ce dernier type de test permet d'analyser les effets du palier (mesures répétées) sur le coût énergétique, c'est-à-dire tester si le coût varie en fonction de la pente ou de la vitesse. En outre, il nous permet de voir s'il existe un effet du groupe, c'est-à-dire si le type d'entraînement pratiqué entraîne une différence de coût énergétique et, finalement, ces ANOVA nous ont permis d'étudier les interactions qui existent entre les paliers et les groupes, autrement dit, de tester si la différence de coût entre les 2 groupes varie entre les différents paliers. Les valeurs de p ont été calculées selon le modèle de Huynh-Feldt epsilon. Le seuil de significativité pour ces ANOVA a été fixé à 0,05.

Résultats

Lors de la course à plat, les coureurs de montagne ont un coût énergétique plus faible que les coureurs de plat mais seulement à des vitesses de course très basses (fig. 2, tab. 2). Cette différence est bien visible dans le graphe ci-dessous mais reste néanmoins non significative. Etant donné que l'écart entre les groupes change, il y a une interaction entre le groupe de coureurs et la vitesse (tab. 2); la différence entre les 2 groupes diminue lorsque la vitesse augmente de façon significative.

On constate sur la figure 2 que, chez les coureurs de montagne, le coût énergétique était indépendant de la vitesse de course. En

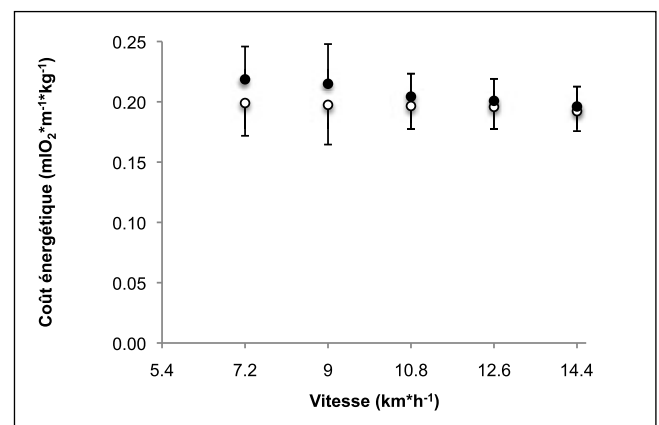


Figure 2: Coût énergétique pour les 4 paliers où tous les sujets testés étaient en dessous du seuil anaérobie lors du test de course à plat. Les points noirs représentent la moyenne (+ écarts-types) pour les coureurs de plat (n = 10) alors que les points blancs représentent celle des coureurs de montagne (n = 10) (- écarts-types). Le coût énergétique est plus bas chez les coureurs de montagne à des vitesses faibles.

revanche, celui des coureurs de plat a tendance à décroître avec des vitesses croissantes.

En ce qui concerne les tests en pente, on ne constate d'effet ni du groupe, ni de l'interaction entre le groupe et le palier sur le coût énergétique (tab. 2). Cela signifie donc que nous n'observons pas de différence significative entre les 2 groupes en ce qui concerne le coût énergétique et que cette différence ne varie pas en fonction du palier (fig. 3). On a considéré, pour les analyses statistiques sur ces 2 tests, uniquement les paliers où tous les coureurs étaient en dessous de leur seuil anaérobie, c'est-à-dire, les paliers à -4, 0, +4, et +8%.

Cependant, à 7,2 km·h⁻¹ (fig. 4a), le rendement contre la gravité est plus élevé chez les coureurs de montagne que chez les coureurs de plat (tab. 2). À 9 km·h⁻¹ (fig. 4b), par contre, on ne trouve pas de différence significative entre les groupes, ni d'interaction entre le palier et le groupe en ce qui concerne le rendement.

Le coût énergétique moyen des coureurs de montagne est de 13,5 ± 1,4 mlO₂·m⁻¹ alors que celui des coureurs de plat est de 13,9 ± 1,6 mlO₂·m⁻¹, ce qui correspond à des valeurs relatives respectivement de 0,20 ± 0,01 et de 0,21 ± 0,02 mlO₂·m⁻¹·kg⁻¹.

Discussion

Les principaux résultats obtenus montrent que le coût énergétique de la course à plat est plus bas pour les coureurs de montagne dans les paliers les plus lents. Le rendement contre la gravité est plus élevé chez les coureurs de montagne que chez les coureurs à plat quelle que soit la pente à nouveau pour une vitesse lente (7,2 km·h⁻¹).

Il est possible qu'en pente, le rendement contre la gravité soit un indicateur autant voir même plus important que le coût énergétique car, contrairement à ce dernier, il ne prend pas en compte la vitesse

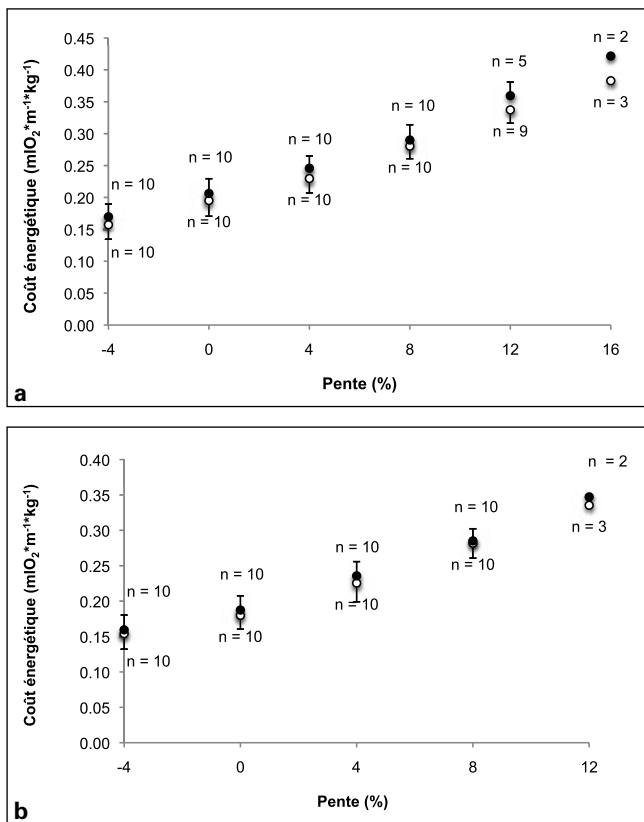


Figure 3: Coûts énergétiques à 7,2 (a) et 9 km·h⁻¹ (b) en noir pour les coureurs de plat et en blanc pour les coureurs de montagne accompagnés de leurs écarts-types. Pour les paliers en dessous du seuil anaérobie. Le nombre de sujets est indiqué pour chaque palier. Le coût énergétique n'est pas significativement différent entre les groupes de coureurs à aucune des 2 vitesses testées.

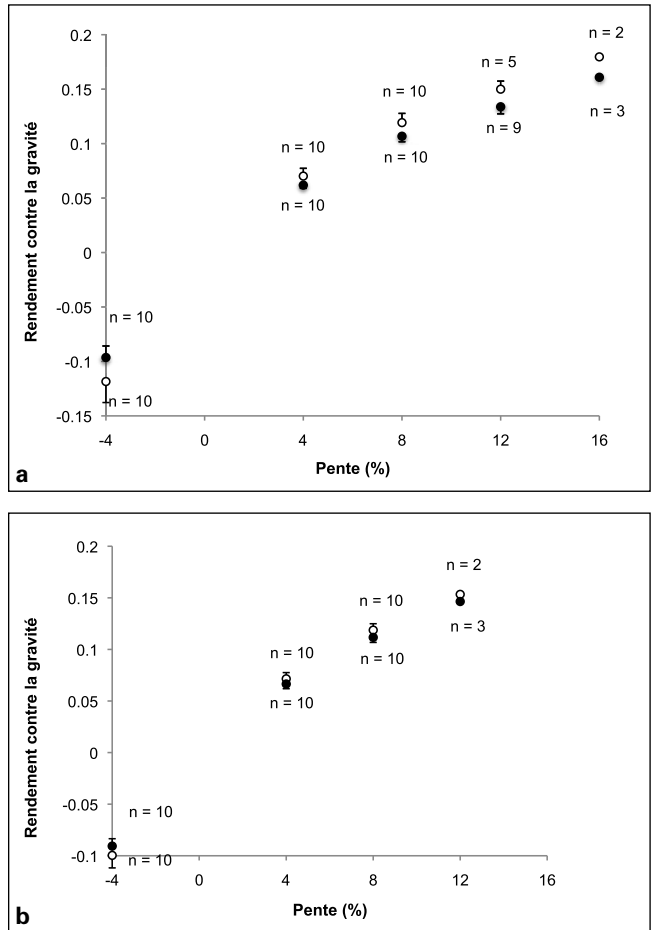


Figure 4: Rendement contre la gravité lors du test avec pente variable à 7,2 km·h⁻¹ (a) et à 9 km·h⁻¹ (b). Les points noirs représentent la moyenne des coureurs de plat et les points blancs celle des coureurs de montagne (avec les écarts-types représentés respectivement vers le haut et vers le bas).

Effet	Course sur tapis roulant				
	Coût énergétique			Rendement contre la gravité	
	Plat	Pente (7,2 km *h ⁻¹)	Pente (9 km *h ⁻¹)	Pente (7,2 km *h ⁻¹)	Pente (9 km *h ⁻¹)
Groupe ¹ (valeur de p)	0,269	0,205	0,994	0,015 *	0,626
Palier ² (valeur de p pour les valeurs répétées ⁴)	0,004 *	0,001 *	0,001 *	0,001 *	0,001 *
Interaction palier*groupe ³ (valeur de p pour les valeurs répétées)	0,027 *	0,785	0,675	0,211	0,637

¹ comparaison entre le groupe de coureurs de plat et celui de coureurs de montagne
² comparaison entre les différents paliers (c'est-à-dire entre les différentes vitesses dans les tests à plat et entre les différentes pentes pour les tests en montée)
³ palier * groupe, interaction entre les paliers et les groupes, autrement dit, est-ce que la différence entre les groupes change suivant les paliers (par exemple pour le course à plat, la différence entre les coureurs de plat et les coureurs de montagne est plus grande pour des vitesses faibles)

Table 2: Différences entre coureurs de plat et coureurs de montagne du coût énergétique de la course mesuré sur tapis roulant à plat et en pente et du rendement contre la gravité calculé pour les 2 tests en pente. Les * indiquent des différences significatives (p ≤ 0.05).

de déplacement «horizontale» mais la vitesse verticale et donc les changements d'énergie potentielle qui paraissent être des éléments essentiels et déterminants de la course en montée puisque la plus grande partie du travail mécanique en montée est effectuée pour agir contre la gravité. En outre, les écarts-types faibles calculés pour le rendement indiquent que cette variable change peu d'une personne à l'autre.

Des différences de coordination intra- et intermusculaire et la technique de course (amplitude des déplacements du centre de masse) pourraient causer les différences énergétiques. Les athlètes sont plus coordonnés pour les mouvements dont ils ont l'habitude. Pour se préparer à leur discipline, les coureurs de montagne ont plus l'habitude de courir lentement (notamment à cause du dénivelé et de la durée de l'effort). Ces rythmes de course lents leur sont alors peut-être plus familiers et leur métabolisme a donc eu plus l'occasion de développer des stratégies pour optimiser la coordination, le coût énergétique et le rendement à ces vitesses que celui des coureurs de plat. Les paliers plus rapides sont, eux, plus habituels pour des coureurs entraînés pour des efforts sur des parcours plus roulants, par exemple pour des courses sur piste ou sur route. Ces derniers auront donc eu plus l'occasion de développer des stratégies et leur coordination afin d'améliorer leur façon de courir à ces vitesses plus rapides, alors que, ne courant que très rarement à des rythmes lents, leur organisme n'arrive pas à optimiser leur style de course pour des vitesses lentes. Mais cela reste néanmoins à vérifier car nous n'avons pas effectué de mesures directes de ces facteurs. Il serait donc intéressant de vérifier nos explications par des mesures directes, notamment de la coordination, de la composition musculaire ou du travail interne.

Il nous faut également noter que plusieurs facteurs propres à la course de montagne n'ont pas été pris en considération dans notre étude. Pour des raisons techniques, par exemple, nous avons dû nous contenter, pour la descente, d'un seul palier de course à -4% . D'après un article de Minetti et al. [31] et d'après les témoignages des coureurs testés, c'est néanmoins plutôt dans les descentes que les coureurs de montagne deviennent plus performants grâce à leur entraînement. Il vaudrait donc la peine, dans un travail ultérieur, de répéter ces tests, mais, cette fois, pour des pentes négatives afin de vérifier si les coureurs de montagne développent des stratégies leur permettant d'être plus efficaces en descente. Une autre différence importante entre les tests en laboratoire et la course sur le terrain se situe dans le type de sol sur lequel les coureurs se déplacent. Un tapis roulant et son revêtement parfaitement lisse se rapproche bien plus du sol auquel sont habitués les coureurs de route ou de piste qu'à celui que connaissent les coureurs de montagne. En s'entraînant sur des sentiers de montagne, ces coureurs habituent probablement leur organisme à s'adapter à des sols irréguliers. Cette faculté d'adaptation qui serait spécialement développée chez les coureurs de montagne n'est pas du tout prise en compte dans notre protocole. Des tests sur le terrain permettraient d'analyser également ce point particulier, en plus de la pente.

Les 2 groupes se distinguent par leur âge. Les 10 coureurs de montagne sont, en effet, âgés en moyenne de 34 ± 4 ans alors que les coureurs de plat sont, eux, âgés de 27 ± 11 ans. Néanmoins, si nous considérons tous les sujets, indépendamment de leur groupe, nous ne trouvons pas de corrélation significative entre le coût, le rendement et l'âge. La différence d'âge entre les groupes ne devrait donc pas avoir trop d'influence sur nos résultats. Nous avons ainsi renoncé à corriger nos résultats statistiques en fonction de ce facteur. Avec cette correction, les résultats n'étaient, par ailleurs, pour ainsi dire, pas modifiés.

En conclusion, nous avons pu confirmer qu'il existe des différences sur le plan énergétique entre les coureurs entraînés pour la course de montagne et ceux entraînés pour la course à pied mais pas en montagne. Il est intéressant de constater que, sur un tapis roulant, les coureurs de montagne semblent avoir un meilleur rendement contre la gravité que les coureurs de plat pour des pentes entre -4 et $+12\%$ à des vitesses lentes seulement.

Il est difficile de savoir quelle incidence pratique il faudrait donner à ces résultats. Il apparaît que, pour certaines vitesses lentes de course à plat, en descente ou en montée, un entraînement de course

à pied en terrain montagneux serait bénéfique et permettrait de courir de façon plus économique. Les coureurs entraînés pour la course de montagne auraient donc la possibilité de courir plus vite que les coureurs de plat pour la même dépense énergétique lors de courses lentes. Un entraînement en course de montagne pourrait donc être indiqué pour des coureurs de très longues distances qui adoptent des rythmes de course bas.

Adresse de correspondance:

Dr Olivier Dériaz, Clinique romande de réadaptation, Avenue de Grand-Champsec 90, 1950 Sion, Tél. 027 603 20 70, E-Mail: Olivier.Deriaz@crr-suva.ch

Bibliographie

- Abbott B.C., Bigland B., and Ritchie J.M. The physiological cost of negative work. *J. Physiol.* 117: 380–390, 1952.
- Beneke R., Hutler M. The effect of training on running economy and performance in recreational athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37: 1794–1799, 2005.
- Billat V., Dalmy F., Antonini M.T., Chassain A.P. A method for determining the maximal steady state of blood lactate concentration from two levels of submaximal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 196–202, 1994.
- Billat V., Renoux J.C., Pinoteau J., Petit B., Koralsztein J.P. Times to exhaustion at 100% of velocity at VO_{2max} and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 271–273, 1994.
- Billat V.L., Dupré M., Karp J.R., Koralsztein J.P. Mountaineering experience decreases the net oxygen cost of climbing Mont Blanc (4,808 m). *Eur. J. Appl. Physiol.* 108: 1209–1216, 2009.
- di Prampero P.E., Atchou G., Bruckner J.C., Moia C. The energetics of endurance running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 55: 259–266, 1986.
- Dill D.B., Talbot J.H., Edwards H.T. Studies in muscular activity: VI. Response of several individuals to a fixed task. *J. Physiol.* 69: 267–305, 1930.
- Gottschall J.S., Kram R. Ground reaction forces during downhill and uphill running. *J. Biomech.* 38: 445–452, 2005.
- Hopker J., Passfield L., Coleman D., Jobson S., Edwards L., Carter H. The effects of training on gross efficiency in cycling: a review. *Int. J. Sports Med.* 30: 845–850, 2009.
- Jones A.M., Carter H. The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Med.* 29: 373–386, 2000.
- Margaria R., Cerretelli P., Aghemo P., Sassi G. Energy cost of running. *J. Appl. Physiol.* 18: 367–370, 1963.
- Mayhew J.L. Oxygen cost and energy expenditure of running in trained runners. *Br. J. Sports Med.* 11: 116–121, 1977.
- Minetti A.E., Ardigo L.P., Saibene F. Mechanical determinants of gradient walking energetics in man. *J. Physiol.* 472: 725–735, 1993.
- Minetti A.E., Ardigo L.P., Saibene F. Mechanical determinants of the minimum energy cost of gradient running in humans. *J. Exp. Biol.* 195: 211–225, 1994.
- Minetti A.E., Moia C., Roi G.S., Susta D., Ferretti G. Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *J. Appl. Physiol.* 93: 1039–1046, 2002.
- Morgan D.W., Bransford D.R., Costill D.L., Daniels J.T., Howley E.T., Krahenbuhl G.S. Variation in the aerobic demand of running among trained and untrained subjects. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27: 404–409, 1995.
- Pringle J.S., Carter H., Doust J.H., Jones A.M. Oxygen uptake kinetics during horizontal and uphill treadmill running in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 88: 163–169, 2002.