

Mémoire de Maîtrise en médecine **No 1846**

L'économie de mouvement en course à pied :  
comparaison entre mesures objectives et  
évaluations subjectives par l'entraîneur spécialisé

**Etudiant**

Sébastien Bacher

**Tuteur**

Dr Gérald Gremion  
DAL, CHUV

**Co-tuteur**

Dr Boris Gojanovic  
Swiss Olympic Medical Center, Macolin

**Expert**

Prof Grégoire Millet  
Département de physiologie, UNIL  
Institut des sciences du sport, UNIL

Lausanne, décembre 2014

## RÉSUMÉ

L'économie de mouvement en course à pied est un paramètre essentiel pour la performance et de nouvelles méthodes d'entraînement essaient aujourd'hui de le cibler. La mesure de cette économie de course se fait habituellement en laboratoire par la consommation d'oxygène nécessaire au déplacement à une vitesse donnée sous-maximale. La question de cette étude est de voir dans quelle mesure l'œil averti d'un entraîneur en course à pied peut estimer l'économie de course, en comparaison à une mesure objective de la consommation d'oxygène.

Au total, 22 coureurs de niveaux différents et 9 entraîneurs ont pris part à cette étude. Elle s'est dans un premier temps déroulée avec les coureurs sur le site du Stade de Coubertin à Vidy (VD). Cette étape a permis les enregistrements vidéo et la mesure de leur économie de course respective ainsi que l'établissement des notes d'économies de référence. Dans un second temps, les évaluations par les entraîneurs ont été faites en ligne sur la base des vidéos.

Les résultats ont été traités de telle manière à obtenir des coefficients (corrélation intraclasse et kappa de Cohen) estimant la concordance des évaluations de chaque entraîneur avec les notes de référence. La concordance au sein du groupe d'entraîneurs a aussi été évaluée.

L'étude présente en conclusion des résultats étonnants, remettant en question la capacité des entraîneurs à évaluer l'économie de course de coureurs issus d'un groupe de performances hétérogènes par rapport à des mesures objectives. En revanche, l'étude présente des résultats indiquant une bonne concordance des entraîneurs entre eux.

Version anglaise du titre de l'étude : « *Running economy : comparison of objective data and subjective evaluations of running coaches* ».

*Mots clefs* : course à pied, économie de course, running economy, concordance, médecine du sport



RÉSUMÉ .....	2
INTRODUCTION.....	4
PERFORMANCE EN COURSE D'ENDURANCE.....	4
VO <sub>2</sub> MAX .....	5
COÛT ÉNERGÉTIQUE .....	6
ECONOMIE DE COURSE ( <i>RUNNING ECONOMY</i> ) .....	6
OBJECTIF DE L'ÉTUDE.....	10
MÉTHODOLOGIE .....	11
SUJETS .....	11
COUREURS .....	11
ENTRAINEURS .....	12
PROTOCOLE D'INVESTIGATION.....	12
COUREURS .....	12
ENTRAINEURS .....	13
CALCULS.....	14
STATISTIQUES .....	15
RÉSULTATS.....	17
DISCUSSION.....	24
RÉFÉRENCES .....	26

# INTRODUCTION

De nos jours, la course à pied est pratiquée par de nombreuses personnes désirent faire du sport de manière régulière, soucieuses de se maintenir en forme, ou encore simplement par plaisir. Mais au-delà de l'activité récréative se profile un sport très compétitif où la performance, comme dans tout autre sport de compétition, est le maître mot. Dans le domaine de la course d'endurance, les performances entre les athlètes sont déterminées par leurs temps respectifs sur diverses distances. Or ces temps sont influencés par une multitude de facteurs propres à l'athlète (physiologiques, mentaux) ou indépendants de celui-ci (environnementaux). La médecine du sport s'intéresse à une bonne part de ces facteurs, particulièrement ceux touchant la physiologie. En effet, plusieurs paramètres, comme par exemple la consommation d'oxygène ( $VO_2$ ), entrent en jeu dans la performance de l'athlète. Comprendre puis influencer ces paramètres par l'entraînement permet d'améliorer les performances et ainsi les résultats.

Les dépenses énergétiques dans le cas d'effort physique et particulièrement de la course d'endurance peuvent être quantifiées par une méthode de calorimétrie dite indirecte consistant à mesurer la consommation d'oxygène, elle-même corrélée théoriquement à une dépense énergétique. En effet, on ne se base non pas sur la consommation de carburant (lipides, glucides), mais sur la consommation de comburant (oxygène) pour déterminer de façon empirique la consommation énergétique due à un exercice en régime aérobie. Dans le cadre de comparaisons de performances entre athlètes ou d'une hypothétique marge de progression, on s'intéressera entre autres à la consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ ).

## PERFORMANCE EN COURSE D'ENDURANCE

La performance en course d'endurance est dépendante de plusieurs paramètres tels que la  $VO_{2max}$ , la capacité à tenir une fraction élevée de  $VO_{2max}$  sur une longue distance ainsi que l'économie de course (1-8). Il est aussi fait mention dans la littérature d'un rapport étroit entre capacité à tenir une fraction élevée de la  $VO_{2max}$  ainsi qu'au taux de lactates dans le sang (1,6). Deux seuils sont décrits sur les courbes lactatémie vs vitesse ou encore lactatémie vs puissance développée à charge croissante (3,9). On détermine trois parties de cette courbe : la première, quasiment horizontale, étant un turnover des lactates, soulignant l'apparition et la disparition des ions lactates. Intervient ensuite le premier seuil lactique ( $SL_1$ ), seuil d'accumulation des lactates ou encore *lactate threshold*. Statistiquement  $SL_1$  apparaît à une concentration d'environ 2mM (env. 40-60% de la  $VO_{2max}$ ). La seconde partie est une pente en général légèrement croissante qui décrirait une zone métabolique mixte aérobie avec une composante anaérobie. Lorsque l'intensité de l'effort augmente encore, vient alors le second seuil lactique ( $SL_2$ ), le seuil d'accumulation des lactates ou *lactate turnpoint* apparaissant statistiquement à environ 4mM (env. 80% de la  $VO_{2max}$ ). Ce dernier seuil est une bonne approximation de l'état lactique stationnaire maximal (*maximal lactate steady state*) ; au delà, les lactates s'accumulent de manière exponentielle et incontrôlée dans le sang (composante anaérobie prépondérante à ce stade), le sportif ne pourra rapidement plus continuer son exercice et sera forcé de s'arrêter. À savoir que l'explication physiologique de ces trois parties de courbe n'est pas unanimement acceptée. Un entraînement à  $SL_1$  est indiqué pour la récupération ou encore dans

la médecine de réadaptation chez les malades (cardiaques et respiratoires) alors qu'on préférera être à SL<sub>2</sub> dans le cadre d'un entraînement du sujet sportif.

En plus des paramètres sanguins, on peut aussi s'intéresser aux paramètres de la respiration. En effet, deux seuils ventilatoires apparaissent au fur et à mesure que l'on augmente l'intensité de l'effort (10). Le premier seuil ventilatoire VT<sub>1</sub> (ou *ventilatory threshold*) serait dû au tamponnement des ions H<sup>+</sup> par les bicarbonates lors d'un exercice, entraînant une augmentation du CO<sub>2</sub> et ainsi une première stimulation ventilatoire. Il est caractérisé par le point où le rapport VE/VO<sub>2</sub> augmente de manière non-linéaire (visible sur des données graphiques, VE : *pulmonary ventilation*), alors que le rapport VE/VCO<sub>2</sub> reste constant. Le second seuil ventilatoire VT<sub>2</sub> (ou *threshold of decompensated metabolic acidosis*) apparaît lorsque le pouvoir tampon des bicarbonates devient incapable d'éliminer la production de H<sup>+</sup>, créant une acidose stimulant davantage la ventilation. Cette fois-ci, les deux rapports VE/VO<sub>2</sub> et VE/VCO<sub>2</sub> augmentent de manière non-linéaire. À noter que VT<sub>1</sub> et SL<sub>1</sub> seraient concomitants, ainsi que VT<sub>2</sub> et SL<sub>2</sub>. Cependant, ces seuils ventilatoires et lactiques, bien que concomitants, n'auraient pas de lien évident de cause à effet et ne seraient donc pas directement liés du point de vue de la physiologie (9,11).

## VO<sub>2</sub>MAX

Le volume d'oxygène consommé (VO<sub>2</sub>) par unité de masse et de temps (mlO<sub>2</sub>·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>) est une mesure renseignant sur la consommation d'oxygène d'un individu. Expérimentalement, on le mesure et le transcrit sur un graphe en fonction de la vitesse du sujet (ou de la puissance développée en watt si mesuré sur ergomètre). Une valeur importante de ce type de mesure est la valeur maximale atteinte, la VO<sub>2</sub>max. En effet, la VO<sub>2</sub>max renseigne sur la capacité d'un individu (soumis à un effort) à consommer un volume maximal d'oxygène. Cette consommation sera dépendante des échanges gazeux au niveau pulmonaire, de la capacité d'extraction de l'oxygène au niveau musculaire, des performances du système cardio-vasculaire ainsi que du métabolisme propre à chacun. C'est un paramètre de base, utilisé depuis plusieurs décennies (11,12), important dans la quantification de la performance. Pour donner un exemple numérique, un athlète de sexe masculin ayant une VO<sub>2</sub>max plus faible que 70 mlO<sub>2</sub>·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup> pourra difficilement atteindre un niveau international de compétition (8).

De nombreux protocoles expérimentaux ont été mis au point et permettent de déterminer la VO<sub>2</sub>max avec plus ou moins de fiabilité (12). Chez un coureur, dans la plupart des cas, il s'agit de faire passer un test standardisé sur tapis roulant, dont la vitesse évolue (ou/et la pente) par paliers croissants jusqu'à épuisement du sujet et de relever la consommation d'oxygène en temps réel grâce à un masque porté par le sportif ainsi que tout un dispositif d'analyse des gaz O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>. La valeur finale de VO<sub>2</sub>max est alors déterminée lors de l'infléchissement de la courbe de VO<sub>2</sub> (ou encore après un plateau de 30 secondes). Il est à noter qu'à ce régime, le corps travaille à régime principalement aérobie, mais qu'une petite partie du travail est déjà due à une composante anaérobie (7) difficilement évaluable. Certaines personnes n'atteignent pas ce plateau et interviennent alors d'autres critères pour attester d'un effort maximal (11,13) tels qu'accroissement de la fréquence cardiaque jusqu'au maximum théorique en fonction de l'âge ou encore un quotient respiratoire (VCO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>) égal ou supérieur à 1.15.

La VO<sub>2</sub>max peut être influencée par l'entraînement, en particulier par des entraînements dits fractionnés ou aérobiques à haute intensité (90-95% de la fréquence cardiaque maximale). L'augmentation de la VO<sub>2</sub>max sera alors surtout influencée par l'augmentation du volume d'éjection systolique (14).

De plus, il est à noter que les coureurs de haut niveau, en plus d'avoir une VO<sub>2</sub>max élevée, ont la capacité de tenir une fraction élevée de cette VO<sub>2</sub>max. Encore, un coureur A avec une plus faible VO<sub>2</sub>max qu'un coureur B, mais pouvant courir une longue distance à une fraction plus élevée de sa VO<sub>2</sub>max réalisera alors possiblement une meilleure performance.

Enfin, dans un pool hétérogène de coureurs, c'est-à-dire à VO<sub>2</sub>max différentes, il est possible de prédire correctement les performances des athlètes en fonction de leur VO<sub>2</sub>max respective. En revanche, dans un pool homogène de coureurs de haut niveau, c'est-à-dire à VO<sub>2</sub>max proches, il n'est plus possible de classer les athlètes aussi précisément selon leur VO<sub>2</sub>max (2,15). La notion d'économie de course (décrite plus loin) devient alors un élément intéressant pouvant prédire les performances dans un groupe homogène de coureurs de haut niveau (16,17).

## COÛT ÉNERGÉTIQUE

Le coût énergétique (CE) caractérise stricto sensu la consommation d'énergie (métabolisme aérobie et anaérobie) lors de la production d'un travail (ici courir à une certaine vitesse sous-maximale dans un certain environnement), similairement à la consommation d'essence au 100km pour une automobile. Il se traduit dans l'absolu comme la consommation énergétique en fonction de la masse et de la distance parcourue (mlO<sub>2</sub>·kg<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>) et peut être apparenté à une mesure de l'efficacité de la course. Plus communément, et puisqu'on ne peut évaluer quantitativement la dépense d'énergie que de manière indirecte, on ne mesurera pas l'énergie (joule) à proprement parler, mais par calorimétrie indirecte en mesurant le volume d'oxygène consommé par unité de temps (ce même volume permettant par la suite d'approximer empiriquement la quantité d'énergie consommée suivant entre autres la métabolisation des substrats et le quotient respiratoire associé (2)). On l'obtient en divisant le volume d'oxygène consommé par la masse du coureur et sa vitesse de déplacement (18) :

$$CE [mlO_2 \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}] = \frac{VO_2 [mlO_2 \cdot min^{-1}]}{masse [kg] \cdot vitesse [km \cdot min^{-1}]}$$

[Équation 1]

## ECONOMIE DE COURSE (*RUNNING ECONOMY*)

L'économie de course ou *running economy* est une notion subtile. Elle peut se définir comme l'habileté d'un individu à se déplacer de façon efficace sur le plan énergétique (8). Pratiquement, il s'agit plus précisément de la consommation d'O<sub>2</sub> à régime stationnaire (steady-state) pour une vitesse de course donnée (19). Elle caractérise la consommation d'O<sub>2</sub> (et par extrapolation la consommation d'énergie) lors d'efforts de type endurance et par conséquent est synonyme au coût énergétique à régime aérobie. Elle se calcule selon l'équation 1.

Prenons l'exemple de deux coureurs C et D de masse et de  $VO_{2max}$  identiques. On les soumet à un protocole de test standardisé à une vitesse sous-maximale pendant un certain temps, de façon à ce qu'ils parviennent à une consommation d' $O_2$  stationnaire ou  $VO_{2ss}$  (steady-state). À l'aide d'un dispositif d'analyse des gaz de respiration, on relève leur consommation d' $O_2$  respective (même dispositif que pour mesurer la  $VO_{2max}$ ). En comparant leur résultat, on affirmera que le coureur avec la  $VO_{2ss}$  la plus basse sera le coureur le plus « économe ». En effet, il lui aura fallu consommer moins d'oxygène, et donc par extrapolation moins d'énergie, pour effectuer un même travail.

Diverses procédures sont décrites dans la littérature. On propose ainsi de tester l'économie de course aux vitesses habituelles d'entraînement et de relever le  $VO_{2ss}$  au minimum dès 3 minutes de course (20,21). Ces vitesses peuvent donc varier suivant la population testée, allant de 10-12 à 18  $km \cdot h^{-1}$ . Il est aussi proposé de faire courir les sujets à des intensités définies en pourcentage de leur  $VO_{2max}$ , puis en augmentant les pourcentages par palier jusqu'à 95% de la  $VO_{2max}$  (16).

Il semble que lors de la course, la consommation d'oxygène, qu'elle soit sous-maximale ou maximale, ne s'accroît pas proportionnellement à la masse corporelle, mais plutôt à la masse élevée à la puissance 0,75 (22,23). De plus, pour palier au fait que les vitesses auxquelles sont réalisés ces tests peuvent être différentes selon les groupes, il a été proposé d'exprimer l'économie de course en  $mlO_2 \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$  voire même (24) en  $mlO_2 \cdot kg^{-0.75} \cdot km^{-1}$  plutôt qu'en  $mlO_2 \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ . On constate ici que d'après les unités, coût énergétique et économie de course sont donc similaires. Certaines études (2) laissent à penser qu'il serait plus judicieux de comparer l'économie de course exprimée en  $kcal \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$  plutôt qu'en  $mlO_2 \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$ . En effet, chaque coureur a un seuil de lactatémie différent et l'utilisation de l'oxygène sera directement dépendante des composantes métaboliques aérobie et anaérobie en présence (comme expliqué plus haut). Encore, à vitesse égale, les hommes ont une meilleure économie de course que les femmes mais il apparaît que lorsque exprimée en  $mlO_2 \cdot kg^{-0.75} \cdot km^{-1}$ , il n'y a pas de différence de genre (hommes vs. femmes) pour autant que l'effort soit d'égale intensité, c'est-à-dire au même pourcentage de  $VO_{2max}$  (16).

Il est à noter que d'après la littérature, dans les gammes de vitesses comprises entre 60 et 90% de la  $VO_{2max}$  (représentatif pour les distances de plus de 10'000m) des résultats disparates quant à la variation du coût énergétique ont été rapportés. Certains tendraient à dire que l'économie de course ( $mlO_2 \cdot kg^{-0.75} \cdot km^{-1}$ ) pour un même individu ne varie pas dans ces gammes de vitesses (1,24). D'autres l'inverse (16). Les études ne sont donc pas tout à fait unanimes sur ce point.

D'autres encore (2,4) suggèrent qu'il est plus intéressant de faire courir le sujet à une fraction de sa vitesse maximale au seuil d'accumulation des lactates (sLT : *speed at lactate turnpoint, maximal lactate steady state* ou vitesse au second seuil). On choisit toujours des vitesses en dessous de sLT car au dessus, la composante anaérobie devenant très forte, le  $VO_{2ss}$  ne pourrait être assurée et la mesure de l'apport d'oxygène ne pourrait plus compter pour la quasi totalité de l'énergie requise (4). Les fractions de sLT habituellement utilisées sont 75, 85 et 95%.

Il faut garder à l'esprit qu'il existe des incertitudes lors des mesures de  $VO_2$ , mesures effectuées par exemple pour valider un nouveau protocole d'entraînement sur plusieurs semaines. En effet, il existe une zone d'ombre où de faibles variations enregistrées dans les tests de  $VO_2$  effectués avant et après entraînement pourraient être simplement dues à du bruit dans les mesures (concept de *smallest worthwhile change*). Ainsi, une étude (25) s'est intéressée à savoir à partir de quel moment on peut affirmer si une intervention influence de manière significative l'économie de course ou non

(ici d'après l'étude citée, il est fait mention, chez les sportifs l'élite, qu'à partir de 2.4% d'augmentation d'économie de course le protocole d'entraînement a une réelle influence). Il semble que la variabilité intra-individuelle (ou aussi au sein d'un pool homogène de coureurs entraînés) soit assez fiable (26), c'est-à-dire que la reproductibilité des mesures est bonne.

En moyenne, les coureurs de longues distances dits entraînés ont une meilleure économie de course que les coureurs non-entraînés, mais cela n'est pas toujours vérifié (23). Il y aurait même jusqu'à 30-40% de variation inter-individuelle de l'économie de course à une vitesse donnée (27). En effet, l'économie de course n'est pas uniquement et forcément une fonction de l'état d'entraînement ou de performance. À titre d'exemple, chez le sportif entraîné, l'économie de course se situe entre 160 et 240 mlO<sub>2</sub>·kg<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup> (28).

Au niveau de l'individu, les caractéristiques anatomiques et physiologiques peuvent grandement influencer l'économie de course. La notion de coût mécanique fait référence à l'énergie mécanique externe dépensée par le sportif en se mobilisant. Cette notion ne prend pas en compte l'énergie thermique ou toute autre forme d'énergie produite par le sportif qui n'est pas mécanique. Il est par conséquent systématiquement plus faible que le coût énergétique. Le coût mécanique est un paramètre difficilement calculable mais certaines techniques de calculs se basant par exemple sur le déplacement vertical du centre de gravité et la cinématique des segments des membres inférieurs essaient de s'en approcher, sans résultats réellement probants (21,29).

Les écarts au niveau de l'économie de course entre les coureurs seraient en relation avec de nombreux facteurs (19,24,30,31) modifiables ou non et avec un degré d'interdépendance plus ou moins marqué. Ces facteurs peuvent être métaboliques, neuromusculaires ou encore sont des éléments associés au coût mécanique (certains sont décrits plus loin). Le poids des chaussures, la biomécanique ou l'anthropométrie (p. ex. : circonférence des mollets, longueurs des jambes, répartition du poids) ou encore la technique de course (p. ex. : longueur de foulée, attaque du pied au sol ou déplacement vertical du centre de gravité) sont tout autant de facteurs mécaniques. C'est d'ailleurs la technique de course qui sera principalement évaluée par les entraîneurs dans cette étude.

La meilleure économie de course attribuable aux coureurs de longues distances serait due à un déplacement vertical du centre de gravité plus faible selon certaines études, certainement dû à des adaptations neuromusculaires (23) au fil des entraînements. Ceci fait intervenir la notion de force de réaction au sol. Il en ressort que les coureurs moins économiques montrent de plus grandes impulsions verticales nettes, indiquant une perte d'énergie due au mouvement vertical (24). Ces forces de réaction au sol sont donc importantes et peuvent être mesurées grâce à diverses sortes d'accéléromètres portatifs lors de la course. Encore, grâce aux mesures d'accélérométrie portable à haute résolution au niveau de la crête iliaque (au plus proche du centre de gravité de l'athlète) et d'après la littérature (32), il existerait une relation entre les accélérations dans les trois plans x, y et z et la VO<sub>2</sub>, une forte validité intra-individuelle et une grande fiabilité sur plusieurs tests. Cette relation entre accélérations et VO<sub>2</sub> serait dictée par une régression de type linéaire mais ne serait vraiment fiable que dans un pool homogène de coureurs déjà bien entraînés.

Dans la dynamique de course, pendant la phase excentrique (muscle s'allongeant) lorsqu'on pose le pied sur le sol, une certaine quantité d'énergie est stockée sous forme d'énergie élastique (de type potentielle) par les diverses structures musculo-tendineuses de la jambe (ces structures



fonctionnant alors de manière similaire à un ressort). Cette énergie élastique sera restituée lors de la suite du mouvement, permettant globalement de consommer moins d'énergie. L'entraînement maximisant ce phénomène est de type force-explosivité ou plyométrique (6,23,33). Il s'agit de générer de la force en exagérant les cycles extension-contraction du muscle avec des exercices à base de séries de sauts et de bonds en enchaînements rapides. Ce type d'entraînement permet en outre des adaptations neuronales spécifiques telles qu'augmentation de l'activation des unités motrices avec moins d'hypertrophie musculaire typiquement rencontrée lors d'entraînement à lourdes charges. En plus d'avoir un effet sur la contractilité du muscle, il permet en outre d'accroître la rigidité du système musculo-tendineux, autorisant ainsi le corps à stocker et utiliser l'énergie élastique de manière plus efficace. Ces adaptations améliorent à terme l'économie de course et les performances, en générant des puissances plus importantes sans proportionnellement augmenter le coût énergétique et donc l'économie de course (33). Néanmoins, l'entraînement plyométrique n'a pas d'effet notable sur la VO<sub>2</sub>max ou les seuils lactiques (34).

Le temps de contact au sol pourrait aussi influencer l'économie de course, plus particulièrement le rapport entre la force exercée sur le sol et le temps de contact (35). Cela dépendrait encore de plusieurs paramètres, entre autres du type d'attaque du pied au sol (36), soit de quelle partie du pied le coureur pose en premier (*forefoot*, *midfoot* ou *heel striker*)

On peut ajouter que d'après la littérature, la fréquence des foulées peut être corrélée à l'économie de course. En effet, à une vitesse donnée et en laissant le coureur choisir sa longueur de foulée, cela déterminera la fréquence. Le coureur trouverait donc intuitivement une fréquence proche de sa fréquence optimale. Une foulée trop grande (et par conséquent une fréquence faible) provoquera des forces de réaction au sol beaucoup plus grandes alors qu'une foulée trop faible (et donc une fréquence élevée) augmentera le travail interne. Dans les deux cas, le coût énergétique sera plus important.

Un phénomène de résonance peut encore être décrit. En effet, comme il a été vu plus haut, le système musculo-tendineux permet le stockage d'une certaine quantité d'énergie potentiel élastique et peut être modélisé par un oscillateur harmonique avec une certaine fréquence propre de vibration (ou de mouvement). Lorsqu'un tel système est exposé à une force périodique d'une fréquence telle qu'elle s'approche de la fréquence propre de ce système, celui-ci entre alors en résonance. Cette résonance permet alors de limiter la magnitude de la force requise pour maintenir l'amplitude de mouvement du système et la restitution de l'énergie par le système est ainsi optimale. En d'autres termes, la fréquence de résonance est la fréquence permettant de maintenir un mouvement à une amplitude donnée avec une dépense énergétique minimale. Certaines études suggèrent que cette fréquence de résonance maximiserait l'économie de course (37).

Les relations exactes entre coût mécanique et coût énergétique ne sont pas connues mais semblent être néanmoins faibles (17,38). Les caractéristiques d'un coureur économe seraient dues à un grand nombre de variables, parmi lesquelles certaines ont été décrites dans ce chapitre, interagissant de manière très complexe entre elles avec différents degrés d'interdépendance.

Enfin, l'économie de course peut être améliorée (8,24). Ceci passerait par certains types d'entraînement précis, entre autres exemples l'entraînement en altitude, le fractionné à haute intensité, l'entraînement en environnement chaud ou encore l'entraînement de type plyométrique

(lequel est décrit ci-dessus). D'un point de vue biomécanique, il faut garder à l'esprit que l'amélioration de l'économie dépendra des caractéristiques anatomiques et physiologiques propres à l'athlète (17) et que pour le moment il est très difficile de décrire de solides invariants inter-individuels dans la technique de course permettant de déterminer l'économie de course (ou coût énergétique) dans une population de coureurs.

En résumé et comme l'atteste la littérature (entre autres 7,8,15,16,20), l'économie de course est une notion importante pour le coureur d'endurance et elle peut prédire dans bon nombre de cas les performances d'un athlète. Il s'agira donc de la comprendre, de la mesurer et de pouvoir l'influencer par un entraînement adéquat.

## OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Comme il est mentionné plus haut, l'économie de course est un paramètre important que l'entraîneur devrait être capable d'évaluer assez précisément. Il n'est cependant pas très commode de devoir passer chaque fois par un laboratoire de médecine du sport pour pouvoir la déterminer. L'objectif de l'étude est de voir dans quelle mesure l'œil averti d'experts pourraient évaluer qualitativement l'économie de course d'un pool de coureurs et ainsi proposer par la suite des entraînements adéquats à certains athlètes. Il sera donc demandé à des experts, sur la base de vidéos de coureurs de tous niveaux sélectionnés pour l'étude et dont l'économie de course a préalablement été mesurée, de procéder à une évaluation des coureurs selon leur économicité parmi 5 propositions.

Le classement des mesures objectives sera finalement comparé avec les classements des évaluations complétées par les entraîneurs. Des calculs de concordance de ces classements permettront de mieux objectiver la capacité des experts à évaluer visuellement l'économie de course.

# MÉTHODOLOGIE

## SUJETS

### COUREURS

Au total, 22 sujets (5 féminins et 17 masculins) entre 18 et 49 ans ont été recrutés via le cercle de connaissances des investigateurs ou encore par « bouche-à-oreille » pour participer à cette étude. Ces volontaires ont été retenus sur la base de critères d'inclusion et d'exclusion. Les critères d'inclusion comprenaient l'âge entre 18 et 50 ans et une pratique de la course régulière. Le nombre d'années d'expérience en course à pied s'étendait de 4 à 20 ans et le volume d'entraînement sur une semaine de 11 à 80 km. Le tableau 1 présente les principales caractéristiques du pool, le tableau 2 présente leurs performances respectives sur des distances standard.

Une blessure ou maladie ayant empêché l'entraînement dans les 3 mois avant la participation à l'étude, une pathologie cardiovasculaire nécessitant un traitement médical régulier, un questionnaire d'aptitude inadéquat, ou encore un asthme d'effort nécessitant une médication constituaient autant de critères d'exclusion à l'étude.

De plus, nous avons recruté des sujets de telles façons à avoir un large éventail de performance au sein du pool de coureurs, allant des joggeurs récréatifs à des espoirs nationaux de triathlon. L'estimation des performances des coureurs était établie sur la base de leur entraînement ainsi que sur leurs meilleurs résultats, le plus souvent sur semi-marathon (tableau 2). Ces informations étaient confirmées par un questionnaire lors des tests au stade.

Il est encore à noter que le protocole a été soumis et validé par la Commission cantonale (VD) d'éthique de la recherche sur l'être humain (protocole CER-VD 337/13).

	Mean ± SD	Min	Max
Âge [années]	<b>34,0 ± 10,2</b> H : 34,4 ± 10,3 F : 32,8 ± 10,9	<b>18</b> H : 18 F : 18	<b>49</b> H : 49 F : 45
Taille [cm]	<b>175,9 ± 8,9</b> H : 179,2 ± 6,0 F : 164,4 ± 7,5	<b>155</b> H : 170 F : 155	<b>192</b> H : 192 F : 173
Poids [kg]	<b>65,2 ± 12,2</b> H : 70,0 ± 8,5 F : 49,0 ± 7,6	<b>37</b> H : 60 F : 37	<b>96</b> H : 96 F : 55
IMC (BMI) [kg/m <sup>2</sup> ]	<b>20,9 ± 2,6</b> H : 21,8 ± 2,2 F : 18,0 ± 1,6	<b>15,4</b> H : 19,1 F : 15,4	<b>27,4</b> H : 27,4 F : 19,8
Expérience en course [années]	<b>7,3 ± 4,3</b> H : 6,5 ± 3,4 F : 9,8 ± 6,1	<b>2</b> H : 2 F : 5	<b>20</b> H : 15 F : 20
Volume entraînement [km/semaine] (moyenne été+hiver)	<b>41,5 ± 16,7</b> H : 42,6 ± 17,1 F : 37,8 ± 15,3	<b>10</b> H : 10 F : 26,5	<b>65</b> H : 65 F : 65

Tableau 1 – Caractéristiques des 22 participants, hommes et femmes confondus (moyenne ± écart type)

n° coureur	âge	10km	semi-marathon (& 20km)	marathon
1	29	36'02"	1:27'00"	-
2	47	-	& 1:30'00"	-
*3	30	37'38"	1:29'30"	-
4	41	38'35"	1:27'00"	-
5	33	-	-	2:59'00"
*6	45	41'00"	& 1:27'00"	-
7	32	45'00"	-	-
8	38	41'00"	-	3:13'00"
9	49	40'30"	1:30'00"	3:16'00"
10	45	40'50"	1:33'00"	3:40'00"
11	45		1:39'00"	3:45'00"
*12	41		1:49'00"	3:57'00"
*13	31	39'59"	1:31'00"	-
14	29	37'00"	-	-
15	38	-	-	-
16	26	-	1:18'00"	2:49'00"
17	27	-	1:22'00"	-
18	47	37'30"	1:21'00"	2:56'00"
19	18	35'50"	-	-
*20	18	40'00"	-	-
21	22	32'30"	-	-
22	18	33'20"	-	-

Tableau 2 - Performances des coureurs de l'étude sur 10km, semi-marathon (& 20km ) ou marathon ; \* femmes

## ENTRAINEURS

Le recrutement des entraîneurs s'est fait sur le même principe de « bouche-à-oreille » que pour les coureurs. La priorité a d'abord été donnée aux entraîneurs dits expérimentés. Au total, 9 entraîneurs ont pu être recrutés. Ces entraîneurs sont actifs dans l'athlétisme (10km, semi- ou marathon) ou le triathlon. Ils entraînent pour la majorité des athlètes de haut niveau (cadres suisses). Leur expérience est variable allant de 2 ans à environ 30 ans, ainsi que des diplômes allant de *J+S 1 (base)* à *entraîneur élite Swiss Olympic* ou encore *expert J+S* (athlétisme ou triathlon). Avant de devenir entraîneur, la plupart ont eu un niveau de cadre national dans leur sport respectif, avec pour certains des résultats en championnats suisses, européens voire même mondiaux.

## PROTOCOLE D'INVESTIGATION

### COUREURS

Après que les sujets reçurent les documents d'information décrivant l'étude par email, il leur a été demandé de venir une seule fois sur la piste d'athlétisme de 400m du Stade-de-Coubertin à Vidy<sup>1</sup>. Les tests duraient en moyenne 45 minutes par participant. Après avoir donné les explications, répondu aux quelques questions, signé le formulaire de consentement et rempli un questionnaire

<sup>1</sup> Deux participants ont pris part aux mesures sur la piste d'athlétisme de 300m du stade Copet III à Vevey (altitude identique à Vidy)

d'aptitude à l'activité physique<sup>2</sup> (recommandé par l'American College of Sport Medicine), chaque coureur devait remplir un premier questionnaire, avant la prise de mesures, leur demandant de préciser entre autres leurs caractéristiques physiques ainsi que des questions sur leurs habitudes d'entraînement et leur palmarès.

Ensuite débutait un échauffement d'au minimum 2 tours et au maximum 3 tours de terrain, puis l'installation de l'appareil de mesure par calorimétrie indirecte (Metamax 3B, Cortex, Leipzig, Allemagne). Une procédure de calibration était effectuée avant chaque demi-journée de test sur site. Après installation de l'appareil, il était demandé au coureur de courir sur 3 tours de terrain dans un premier temps à 10 km·h<sup>-1</sup>, puis pause de 2'30", puis de nouveau 3 tours de terrain à 12 km·h<sup>-1</sup>. La vitesse était donnée par des cônes que le coureur devait passer au rythme des sifflements à intervalles réguliers, correspondant à la vitesse voulue. Lors de ces deux phases de course, une caméra fixe (Handycam, Sony) postée en fin de ligne droite filmait les coureurs au 1<sup>er</sup> tour de profil, au 2<sup>ème</sup> tour de ¾ face, puis en les suivant sur une distance de course d'environ 50 mètres au 3<sup>ème</sup> tour. Un tour supplémentaire était demandé si l'une des prises de vue n'était pas correcte.

En fin de séance, un second questionnaire leur était soumis, leur demandant un feedback en rapport au test qu'il venait d'effectuer.

Les vitesses de 10 et 12 km·h<sup>-1</sup> ont été choisies car elles font partie des vitesses utilisées de manière standard pour mesurer l'économie de course. Nous n'avons pas choisi de vitesse supérieure car le pool de coureur comportait aussi bien des coureurs occasionnels que des coureurs très entraînés. Nous nous sommes donc assuré que chacun puisse courir sans problème à ces vitesses. Ce faisant, il n'a pas été jugé utile de procéder à un ECG sur chaque participant. Par la suite, les séquences de course à 12 km·h<sup>-1</sup> ont été retenues pour les vidéos, car cette allure était jugée plus « naturelle » par la presque totalité des coureurs. Enfin, nous n'avons pas procédé à des mesures de la VO<sub>2</sub>max car par définition il aurait fallu demander de faire courir les gens jusqu'à épuisement et ce genre de test aurait demandé davantage de précautions (ECG, consultation) du point de vue de la sécurité et de l'éthique.

## ENTRAINEURS

Dans un second temps, les vidéos ont été compilées (3 plans, 30 secondes au total par coureur, sans bande sonore, qualité standard 640x480 pixels ; figure 1) et uploadées sur un site d'hébergement de vidéos en ligne (vimeo.com). À noter que les vidéos étaient protégées par mot de passe et qu'il était expressément demandé aux personnes disposant des mots de passe de ne pas les divulguer. De plus un questionnaire en ligne a été créé à l'intention des entraîneurs avec des questions portant sur leur profil, les entrées pour l'évaluation des 22 vidéos, ainsi qu'un espace pour des remarques dans lequel les entraîneurs pouvaient librement s'exprimer sur les critères évalués. L'évaluation se faisait donc en ligne (surveymonkey.com). Chaque vidéo était évaluée suivant une échelle de type Likert à 5 entrées avec une structure ordinale : économie faible, moyenne, bonne, très bonne ou excellente.

---

<sup>2</sup> <http://www.csep.ca/cmfiles/publications/parq/Q-AAP.pdf>



Figure 1 - Capture d'écran de l'une des 22 prises de vue.

## CALCULS

Après extraction des données de l'appareil Metamax 3B et sauvegarde sous format de tableur, il a fallu établir les économies de course respectives des sujets à 10 et 12 km·h<sup>-1</sup> en analysant graphiquement les données. Sur 3 tours, chaque coureur a donc couru 7'12" et 6'00" à respectivement 10 et 12 km·h<sup>-1</sup>. Les données VO<sub>2</sub> par rapport au temps montraient clairement un début de plateau après les 3 premières minutes de course. Pour chaque coureur nous avons donc déterminé la VO<sub>2</sub> moyenne sur les mesures des 60 dernières secondes de course à 10 et 12 km·h<sup>-1</sup>. Ensuite, il était alors possible de déterminer l'économie de course mesurée suivant l'équation 1. Une fois l'économie de course établie pour chaque participant, il a fallu les classer dans l'une des 5 catégories (économie faible, moyenne, bonne, très bonne ou excellente) puis leur attribuer une note objective, respectivement de 1 à 5.

On propose d'attribuer à chaque catégorie les valeurs et notes illustrées dans le tableau 3 :

Catégories (économie de course)	Valeurs [mlO <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup> ]	Notes
Excellente	< 180	5
Très bonne	180 – 200	4
Bonne	200-220	3
Moyenne	220-240	2
Faible	> 240	1

Tableau 3 - Catégories d'économie de course, valeurs et notes correspondantes.

Dans un second temps, les évaluations subjectives des entraîneurs ont été relevées, il y a donc autant d'évaluations subjectives par coureur que d'entraîneurs.

## STATISTIQUES

L'objectif de l'étude est la comparaison et l'évaluation de la concordance des évaluations des entraîneurs par rapport aux notes de référence. Nous avons utilisé une méthode permettant d'avoir une mesure de l'accord entre un observateur et une référence ainsi qu'entre les observateurs eux-mêmes selon un codage qualitatif en catégorie dont la structure est ordinale (les différentes descriptions de l'économie de course, de faible à excellente, soit de 1 à 5). La méthode évalue la concordance inter-juge entre 2 classements ainsi qu'entre >2 classements.

Techniquement, on peut décomposer les désaccords entre observateurs en deux types : les désaccords systématiques (biais) et les désaccords aléatoires. Nous avons privilégié une approche permettant de sanctionner ces deux types de désaccords. On pourrait se satisfaire d'une fonction de corrélation linéaire ou autre  $r$  de Pearson, mais il faut garder à l'esprit que de telles corrélations ne prennent pas en compte l'éventuel biais qu'il pourrait y avoir chez certains entraîneurs. En effet, comme les coureurs ont été notés selon un classement de 1 à 5, il peut y avoir des classements trop sévères (par exemple 1 point systématiquement au dessous) ou au contraire trop optimiste (1 point systématiquement au dessus). Un exemple serait un système avec respectivement le *rater 1* en abscisse par rapport au *rater 2* en ordonnée : avec un biais systématique mais des points alignés, on obtiendrait une droite affine ne passant pas par l'origine et un résultat de  $r = 1$ , soit une corrélation linéaire faussement parfaite.

Pour palier à cela, il a été décidé d'après la littérature (39) d'utiliser le *quadratic weighted Kappa coefficient (qwKc)*. Cette approche permet par exemple de comparer deux échelles Likert avec des valeurs catégorielles (discrètes) dont la structure est ordinale comme dans notre cas (échelle discrète de 1 à 5). Cette méthode est équivalente au calcul d'un coefficient de corrélation intraclasse (40–42), ou *Intraclass Correlation Coefficient (ICC)*, qui sera utilisé pour comparer 2 classements ou plus entre eux. L'ICC tendant à être similaire au qwKc, ils pourront donc être comparés. À noter qu'il existe trois modèles d'ICC<sup>3</sup> implémentés par 3 équations différentes : le choix s'est porté sur le premier modèle. L'ICC permet la comparaison de valeurs continues (et pas seulement discrètes). Encore une fois, ces méthodes présentent l'avantage de pénaliser le biais. La théorie sous-jacente à ces méthodes de calculs sort du cadre de ce travail et ne fera pas l'objet d'investigations plus approfondies.

La concordance (ou accord) entre chaque entraîneur et le classement de référence a donc été évaluée au moyen de la méthode du qwKc. De manière identique, ces concordances ont aussi été évaluées par l'ICC pour comparer les résultats avec le qwKc. De plus, pour avoir une meilleure vision d'ensemble, l'ICC a aussi été utilisé dans la comparaison du classement des moyennes pour chacune des notes données aux coureurs avec le classement de référence. Ceci pour voir dans quelle mesure le groupe (d'entraîneurs) est proche du classement de référence. L'ICC a encore été utilisé pour déterminer le niveau de corrélation au sein du pool d'entraîneurs, afin de voir dans quelle mesure il y a concordance entre eux.

En principe, ces coefficients qwKc et ICC prennent des valeurs positives entre 0 et 1, la valeur 1 étant une concordance parfaite et 0 une indépendance des évaluations (et donc aucune concordance).

---

<sup>3</sup> Pour information, les trois modèles d'ICC, respectivement ICC(1,1), ICC(2,1), ICC(3,1).

« On peut interpréter la valeur de l'ICC soit comme une corrélation entre des mesures répétées, soit comme un pourcentage de variance due à la vraie variabilité (celle qui n'est pas due aux désaccords entre raters) »<sup>4</sup>. En d'autres termes, pour un ICC de 0,6 : 60% de la variance est due à la vraie variabilité et 40% de la variance est due aux « désaccords entre raters » (systématiques et aléatoires). Techniquement, il est même possible (bien qu'habituellement rare) d'avoir des valeurs négatives, qui sont alors plus difficiles à interpréter littéralement, si ce n'est que la concordance est pour le moins médiocre.

Landis et Koch (44) ont proposé en 1977 un classement de l'accord en fonction de la valeur du coefficient Kappa, classement évidemment subjectif n'étant pas universellement admis (tableau 4). Cette interprétation peut être étendue à l'ICC.

$\kappa$	Interpretation
< 0	Poor agreement
0.01 – 0.20	Slight agreement
0.21 – 0.40	Fair agreement
0.41 – 0.60	Moderate agreement
0.61 – 0.80	Substantial agreement
0.81 – 1.00	Almost perfect agreement

Tableau 4 - Cette interprétation des résultats n'est pas universellement admise et doit donc être prise avec précaution (44).

Enfin, les calculs ont été faits au moyen du logiciel de statistiques *R* en libre accès, le script de la routine de calcul a aimablement été mis à disposition par le Prof Valentin Rousson.

---

<sup>4</sup> Traduit de l'anglais (43)



## RÉSULTATS

La figure 2 présente en guise d'exemple le traitement des données du coureur n°8, dont le niveau de compétition le situe aux environs de la médiane du groupe. Ce coureur figure cependant en 3<sup>ème</sup> position dans le classement des économies de course.

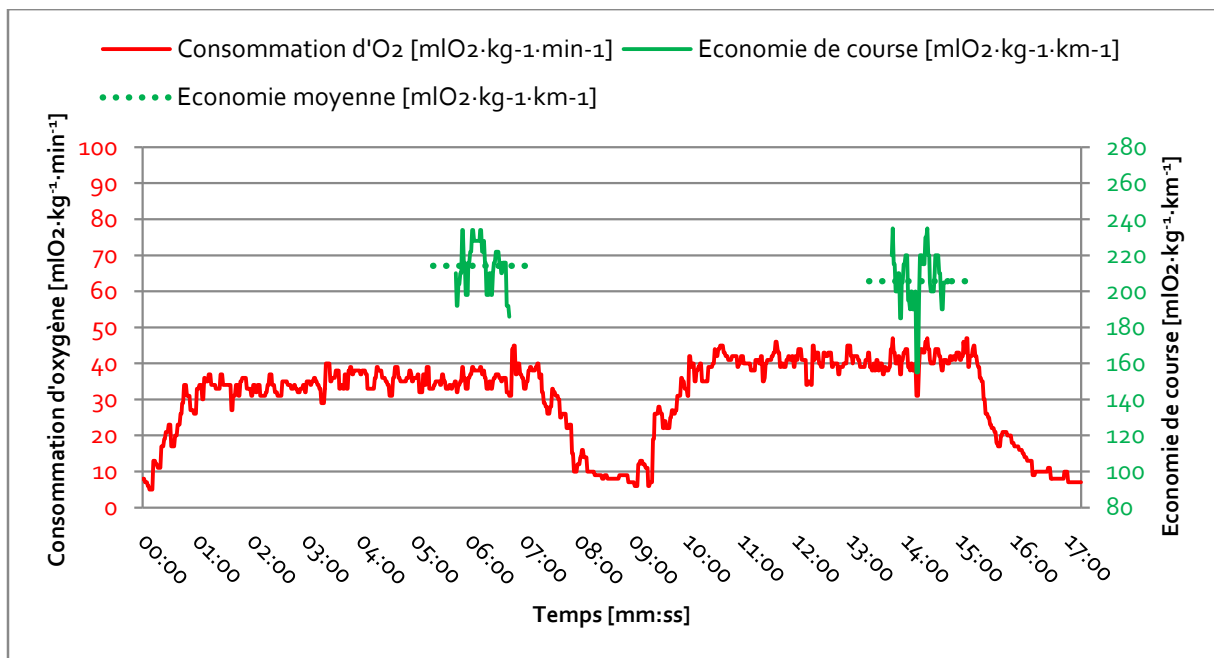


Figure 2 - Les données brutes de consommation d'oxygène issues de l'appareil de mesure sont représentées en rouge. L'économie de course déduite des données brutes est représentée en vert, selon l'équation 1. Les deux plateaux correspondent aux deux vitesses testées, respectivement 10 et 12  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  séparé par un temps de pause d'environ 02'30''. Les économies de course sont chaque fois estimées en fin de course à chaque vitesse respective.

Pour chaque participant, les données brutes ont été mises sous forme graphique. La forme des courbes est semblable pour tous les participants comme on peut logiquement s'y attendre. Dans un premier temps, la pente positive de la courbe correspond aux 300 à 400 premiers mètres de course à 10  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  puis vient assez rapidement un plateau de consommation d'oxygène. Ce plateau est maintenu pendant le reste de la course. Ensuite le coureur étant invité à faire une pause, on voit donc la pente de la courbe devenir négative, pour atteindre une consommation de base. Après la pause, le coureur se remettant à courir à 12  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , la courbe gagne alors un second plateau, logiquement plus haut que le premier. Après les 3 tours de terrain à 12  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , le coureur retrouve une consommation d'oxygène de base. Pour chacune des deux vitesses, une moyenne des mesures d'économie des dernières 60 secondes a été calculée, permettant ainsi la détermination d'une valeur d'économie de course à 10 et 12  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  pour chaque coureur. Théoriquement, les économies de course devraient être très proches aux deux vitesses de test. Néanmoins, les résultats montrent une différence non-négligeable entre les deux vitesses. Bien que les calculs aient été faits directement sur les données brutes, sans lissage, on note le plus souvent une p-value < 0.05, suggérant que les moyennes des économies de course à 10 et 12  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  sont distinctes. Chez quasi tous les participants, l'économie de course mesurée était meilleure à 12  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  plutôt qu'à 10  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ . La

valeur de l'économie de course à  $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a donc été retenue pour établir le classement de référence. Voici encore aux figures 3 et 4, les coureurs n°7 et 18, respectivement premier et dernier du classement de référence à  $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

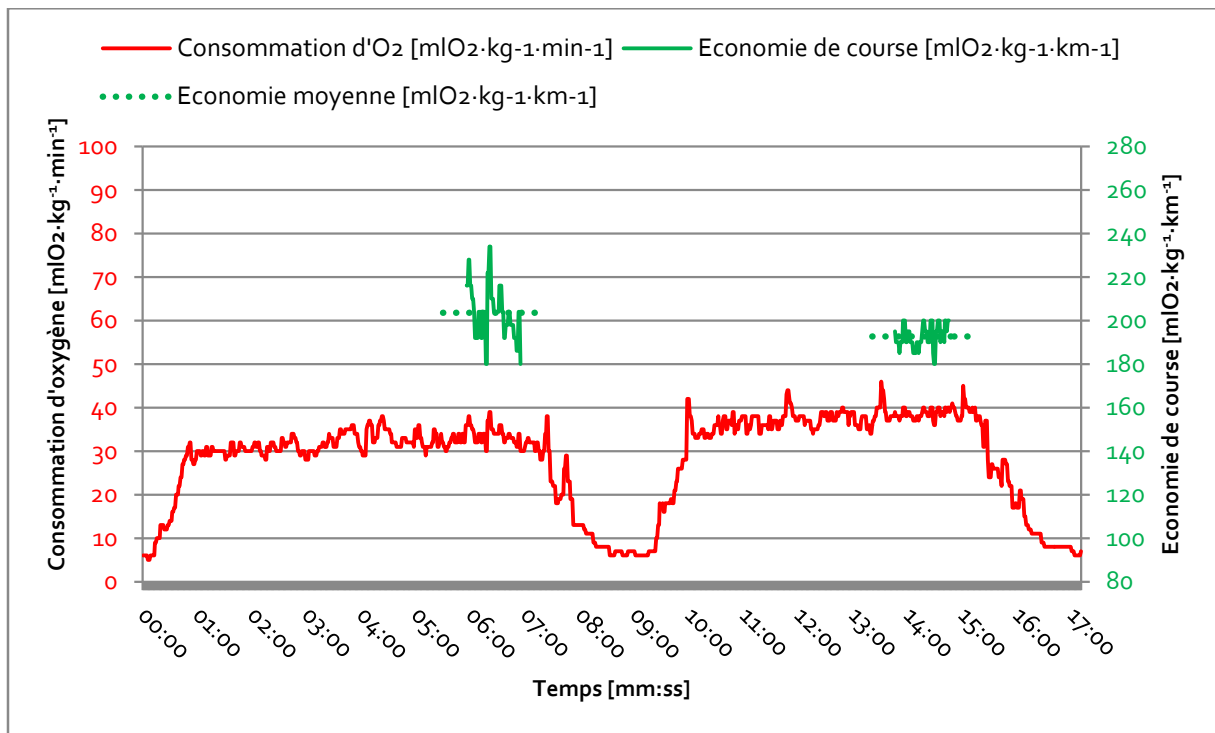


Figure 3 - Données du premier coureur du classement, dont le niveau se trouve dans le bas du tableau

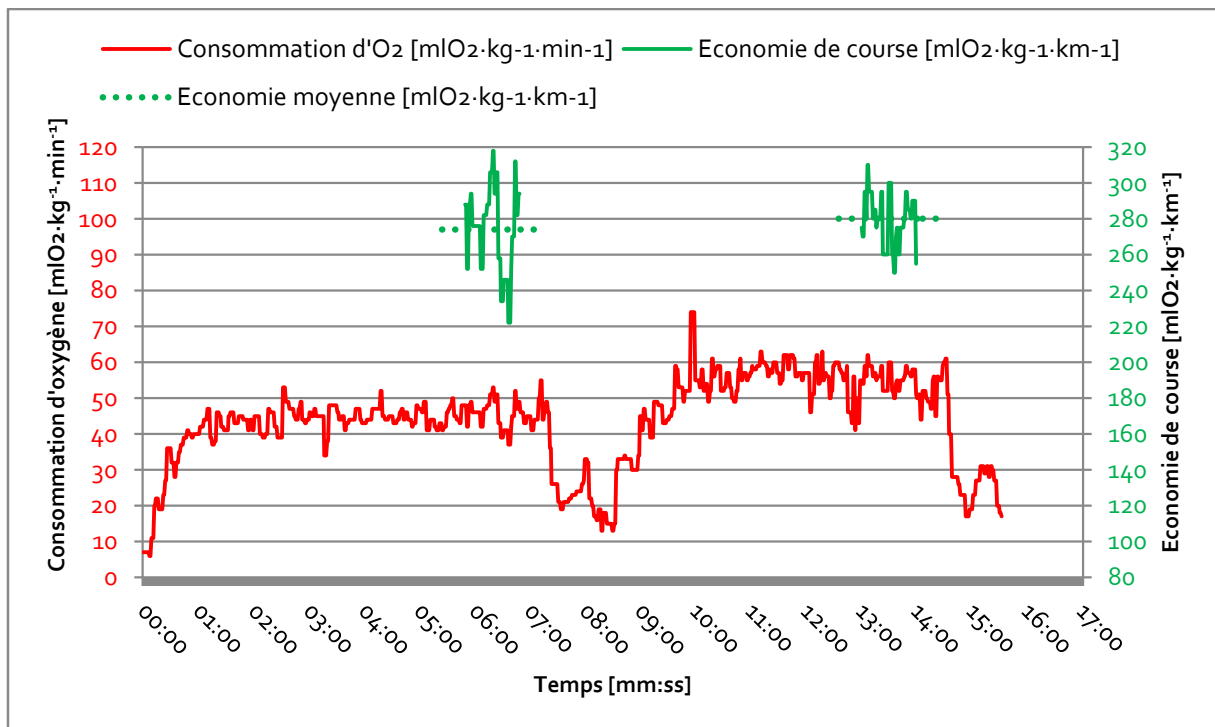


Figure 4 - Données du dernier coureur du classement, espoir junior de triathlon, dont le niveau est parmi les meilleurs du groupe

Notons que les économies de course mesurées dans cette étude, comme dans l'exemple de la figure 4, ne vont pas forcément de pair avec le niveau d'entraînement des coureurs, comme on pourrait

l'imaginer intuitivement. En effet, plusieurs des meilleurs coureurs (niveau estimé d'après leurs résultats respectifs) ne figurent pas dans le haut du classement des économies de course, voire figure en fin de classement (plutôt pour les jeunes triathlètes).

La figure 5 présente sous forme graphique l'ensemble des résultats pour le groupe de coureurs, ainsi que les écarts-type pour chaque mesure. On voit donc que la tendance des économies de course est plus haute que ce qui aurait été attendu. De plus, les différences entre les coureurs sont faibles mais clairement distinguables.

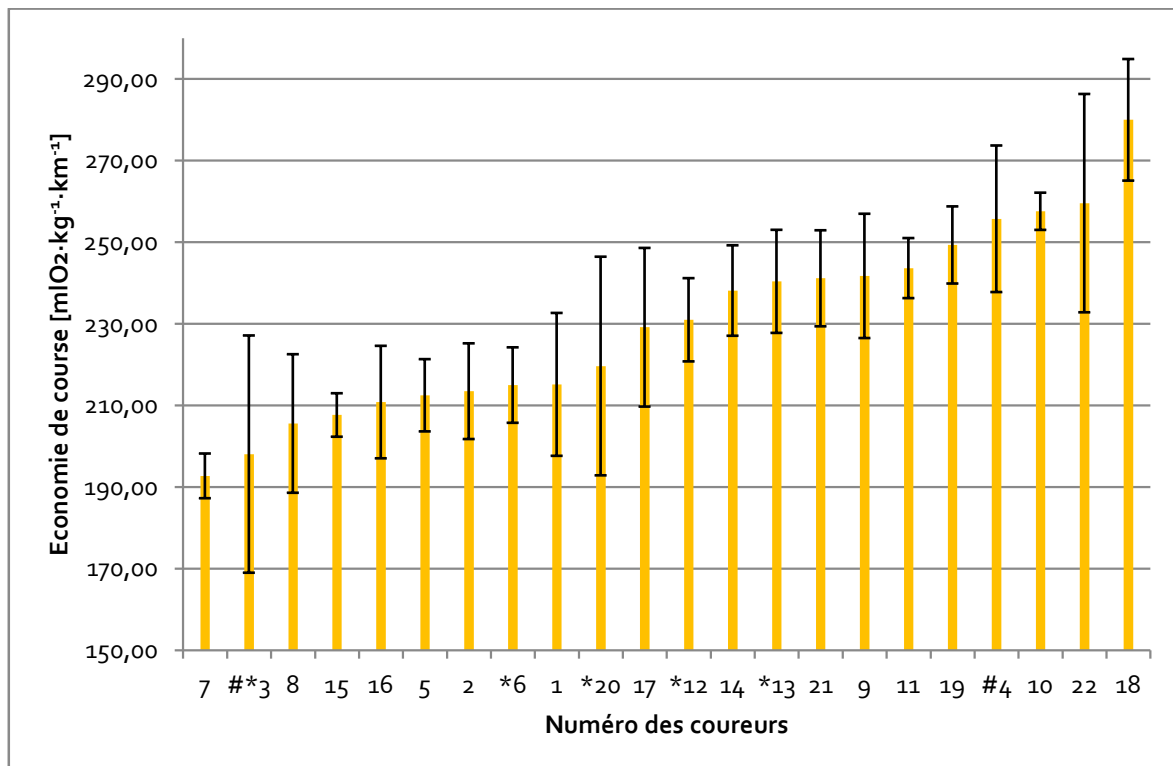


Figure 5 - Economies de course et écart-types des coureurs, de la meilleure à la moins bonne. \*femmes ; # stade Copet III de 300m à Vevey VD

Les critères majoritairement retenus pour évaluer visuellement l'économie de course sur les vidéos par les entraîneurs d'après les remarques qu'ils ont faites sont les suivants :

- Oscillation du centre de gravité (foulée « rasante » ou non)
- Longueur de la foulée
- Type d' « attaque » du pied au sol (vraisemblablement *forefoot*, *midfoot* ou *heel striker*)
- Temps de contact avec le sol lors de la foulée
- Mouvement des bras

Le tableau 5 présente une synthèse des résultats bruts des performances des coureurs ainsi que les évaluations des entraîneurs.

Numéro coureur	Economie de course à 12km/h (mlO <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup> )	Ecart-type	Réf	Coach 1	Coach 2	Coach 3	Coach 4	Coach 5	Coach 6	Coach 7	Coach 8	Coach 9	Moyenne coachs
1	215,17	17,51	3	5	3	4	4	3	2	3	3	3	3,33
2	213,50	11,73	3	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1,56
#*3	198,08	29,07	4	2	2	4	2	2	2	2	3	2	2,33
#4	255,75	17,96	1	3	2	3	3	2	2	4	3	2	2,67
5	212,50	8,85	3	4	3	4	4	3	3	3	4	3	3,44
*6	215,00	9,25	3	4	2	2	3	2	3	2	3	2	2,56
7	192,75	5,48	4	4	3	3	3	2	3	2	3	3	2,89
8	205,58	16,98	3	3	2	2	2	1	3	2	2	2	2,11
9	241,75	15,23	1	2	2	3	2	1	2	2	2	3	2,11
10	257,58	4,56	1	2	2	2	2	1	2	3	2	2	2,00
11	243,67	7,36	1	3	3	3	3	2	4	4	3	2	3,00
*12	231,00	10,20	2	3	2	3	2	2	4	2	2	3	2,56
*13	240,42	12,63	1	4	2	3	3	3	4	2	3	4	3,11
14	238,17	11,08	2	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3,11
15	207,67	5,33	3	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1,33
16	210,83	13,78	3	4	2	1	2	3	4	2	3	2	2,56
17	229,17	19,44	2	3	2	1	2	3	2	1	3	2	2,11
18	280,00	14,90	1	4	3	1	4	4	4	2	3	4	3,22
19	249,33	9,45	1	3	3	3	3	2	4	2	4	3	3,00
*20	219,67	26,79	3	4	4	3	3	2	4	3	4	4	3,44
21	241,17	11,77	1	5	3	4	5	5	5	3	5	4	4,33
22	259,58	26,75	1	5	3	4	4	3	4	4	5	3	3,89

Tableau 5 - Synthèse des résultats : classement de référence et évaluations des entraîneurs. \* femmes ; # stade Copet III de 300m à Vevey VD

Le tableau 6 présente une comparaison des notes de référence avec une moyenne de toutes les évaluations correspondantes. En clair, en prenant l'exemple de toutes les notes de référence égales à 3, on a alors une moyenne de toutes les évaluations correspondantes à 2,54. On remarque que les moyennes ont tendance à s'aligner entre elles, montrant une mauvaise concordance, voire même une concordance inverse entre référence et évaluations. À noter l'absence de la note 5 dans le classement de référence, aucun coureur n'ayant couru en dessous de 180 mlO<sub>2</sub>·kg<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>.

Note de référence	Moyenne des évaluations
1	3,04
2	2,59
3	2,54
4	2,61
(5)	-

Tableau 6 - Notes de référence et leurs évaluations correspondantes.

La figure 6 présente, sous forme de nuage de points, le degré d'accord entre le classement de référence ainsi que la moyenne des évaluations des entraîneurs pour chaque coureur. On voit clairement le niveau de concordance médiocre, comme il a été mentionné ci-avant.

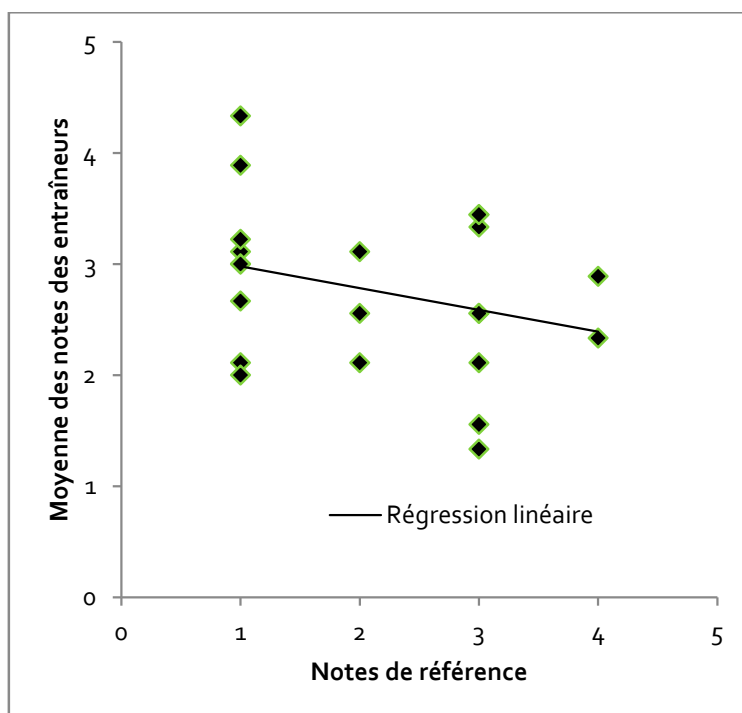


Figure 6 - Schéma opposant notes de référence et moyennes des évaluations des entraîneurs. À noter l'absence de la note 5 dans le classement de référence.

N° entraîneur	Biais systématique	Corrélation standard	qwKc (weighted Kappa coeff)	ICC (Intraclass coefficient)
1	1.182 ( $p = 0.002$ )	-0.079	-0.298	-0.276
2	0.318 ( $p = 0.272$ )	-0.089	-0.109	-0.086
3	0.591 ( $p = 0.091$ )	-0.048	-0.118	-0.095
4	0.636 ( $p = 0.095$ )	-0.316	-0.375	-0.355
5	0.227 ( $p = 0.520$ )	-0.224	-0.232	-0.210
6	0.909 ( $p = 0.023$ )	-0.342	-0.448	-0.429
7	0.318 ( $p = 0.366$ )	-0.378	-0.385	-0.365
8	0.818 ( $p = 0.033$ )	-0.247	-0.348	-0.327
9	0.591 ( $p = 0.079$ )	-0.297	-0.348	-0.328
<b>Moyenne des notes attribuées par les entraîneurs</b>	0.621 ( $p = 0.061$ )	-0.290	-	<b>-0.326</b>
<b>Concordance au sein des entraîneurs</b>	-	-	-	<b>0.480</b>

Tableau 7 - synthèse des résultats de concordance chaque fois par rapport au classement de référence. "Concordance au sein des entraîneurs" reflète uniquement la concordance des entraîneurs entre eux, sans rapport avec le classement de référence.

Le tableau 7 présente une synthèse des résultats des calculs des qwKc et ICC respectifs. On constate que les résultats, aussi bien le qwKc ou encore l'ICC, sont quasi tous négatifs. Comme il a été

mentionné dans le chapitre précédent, ces coefficients s'adaptent mal à la négativité. On peut cependant affirmer que ces résultats indiquent une mauvaise concordance entre chacun des entraîneurs par rapport au classement de référence. Enfin, la concordance au sein du pool des entraîneurs a été calculée à 0.480, ce qui indique une tendance des entraîneurs à être plutôt d'accord entre eux (tableau 4). On remarque aussi aisément un biais systématique moyen, entre tous les entraîneurs, calculé à 0.621 ( $p = 0.061^5$ ).

Les économies de course ont à nouveau été calculées en prenant en compte le poids de l'appareillage (1.4kg), sans changer de manière significative les résultats (la note 1 passe dans quatre cas à 2). Le biais systématique moyen passe à 0.439 ( $p = 0.134$ ) et la corrélation standard ainsi que l'ICC pour la moyenne des notes restent négatifs, respectivement à -0.227 et -0.250.

Catégories (économie de course)	Valeurs [mlO <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup> ]	Notes
Excellente	< 202	5
Très bonne	202 – 214	4
Bonne	214-231	3
Moyenne	231 – 247	2
Faible	> 247	1

Tableau 8 - Catégorisation selon les percentiles 20 (22 notes : 5x1, 5x2, 5x3, 5x4, 2x5)

Le tableau 8 présente une reclassification du tableau 3 mais selon les percentiles 20 dans le groupe des 22 coureurs de l'étude. Au total, 18 notes sont majorées d'une unité. En relançant la routine de calcul, les valeurs de concordances restent médiocres, avec une corrélation standard ainsi que l'ICC pour la moyenne des notes de respectivement -0.358 et -0.283. Le biais systématique moyen est en revanche non significatif, calculé à 0.03 ( $p = 0.935^6$ ). Le reste des résultats de ce paragraphe n'est pas présenté. La suite de ce document se fera donc par rapport à la classification de base illustrée par le tableau 3.

<sup>5</sup> Cette valeur de  $p = 0.061$  traduit une significativité faible, le biais est en fait peu probable (il le serait si  $p < 0.05$ )

<sup>6</sup> Dans ce cas, l'importante valeur de  $p = 0.935$ , traduit un biais hautement improbable.

Le tableau 9 (similaire au tableau 7) présente des résultats issus du hasard (9 entraîneurs virtuels), après avoir généré dix fois des notes aléatoires (entre 1 et 5). On peut voir que les ICC des moyennes des notes sont comparables (étude vs aléatoire), mais que la concordance au sein des entraîneurs est bien meilleur avec les résultats de l'étude qu'avec les résultats obtenus au hasard (cf. *discussion*).

	Biais systématique	Corrélation standard	qwKc (weighted Kappa coeff)	ICC (Intraclass coefficient)
Moyenne des notes attribuées au <i>hasard</i>	-	[-0.225 ; 0.371]	-	[-0.374 ; 0.023]
Concordance au sein du <i>hasard</i>	-	-	-	[-0.011 ; 0.102]

Tableau 9 - Synthèse des résultats générés au hasard

Dans un dernier temps, nous nous sommes intéressés aux évaluations des quatre entraîneurs les plus expérimentés (entraînant les cadres nationaux en athlétisme ou triathlon, actifs depuis une vingtaine d'années en moyenne). En utilisant la même routine de calcul, on obtient des concordances médiocres (négatives), similaires aux résultats déjà présentés. En revanche, on obtient une concordance au sein de ces quatre entraîneurs de : ICC = 0.677, ce qui traduit une bonne concordance entre eux.

## DISCUSSION

L'étude visait à déterminer la capacité des entraîneurs à évaluer l'économie de course de coureurs issus d'un pool hétérogène en performance. Les méthodes d'évaluation de la concordance, *quadratic weighted Kappa coefficient* et *Intraclass correlation coefficient*, ont été utilisées pour tenter d'objectiver une éventuelle concordance entre les évaluations faites par les entraîneurs et le classement de référence issu des mesures sur le terrain.

Dans un premier temps, on constate une concordance médiocre de chaque entraîneur par rapport à la référence. De plus, les moyennes des notes des entraîneurs ne sont pas plus concordantes avec ce dernier classement. La concordance serait même comparable à la moyenne de notes générées au hasard. Même en s'intéressant aux quatre entraîneurs les plus expérimentés, les concordances restent médiocres. Ces résultats indiquent donc une très mauvaise performance voire une incapacité des entraîneurs à correctement évaluer visuellement l'économie de course telle que décrite par la consommation d'oxygène à vitesse sous-maximale. On rappellera à ce stade que les relations entre coût mécanique, dans notre cas la technique de course, et coût énergétique sont décrites dans la littérature comme étant faibles.

Il est encore à noter que l'ICC et le qwKc ont été développés pour comparer deux classements subjectifs. Habituellement, on ne peut pas établir de classement « gold standard » car on ne l'a tout simplement pas. Or, dans l'étude, on définit un « gold standard » qui est le classement de référence. Il faut donc avoir à l'esprit que d'un point de vue purement théorique, ICC et qwKc n'ont pas été développés stricto sensu dans le cas de comparaison de classements subjectifs et « gold standard » de référence.

Plusieurs hypothèses permettraient d'expliquer ces concordances médiocres. Tout d'abord, le classement de référence peut être critiqué. On constate qu'aucune note maximale de 5 n'y apparaît (correspondant à une économie excellente). En effet, l'appareillage pesant environ 1,4kg peut sans doute avoir des répercussions sur la foulée et l'économie, bien que la prise en compte de cette masse dans les calculs ne soit pas probante. Certains coureurs ont fait la remarque d'un appareillage non optimal au niveau de l'ergonomie, ce qui pourrait tout de même expliquer l'absence de notes maximales. De plus, ce classement pourrait être faussé par des erreurs de mesures dues à l'appareillage, peu vraisemblables au vu de la minutie des prises de mesure (avec calibration de l'appareil chaque demi-journée). D'un point de vue technique, les vidéos réalisées de résolution standard et muettes ne sont évidemment pas comparables à la réalité sur le terrain. L'estimation d'une économie de course se fait sur des détails subtils que la vidéo n'a peut-être pas rendu de manière aussi claire qu'en situation « réelle ». On peut faire l'hypothèse que le son a un impact non-négligeable sur l'entraîneur lors du processus d'évaluation.

À l'instar des coureurs, un bon nombre d'entraîneurs a relevé que la vitesse de 12 km·h<sup>-1</sup> n'était pas optimale. En effet, celle-ci s'approche trop d'une allure de footing, laquelle n'est pas la vitesse de prédilection de bon nombre de coureurs du pool et par conséquent ne renvoie pas la meilleure économie de course de chacun. On relèvera les économies étonnément faibles des espoirs du triathlon suisse (n° 18 à 22). Ces résultats peuvent être discutés, on peut se poser la question d'une vitesse trop faible pour exploiter leur technique certainement au dessus de la moyenne et ainsi



démontrer de meilleures économies. Ces coureurs présentaient néanmoins une masse musculaire plus importante que la moyenne, suggérant donc un rapport masse maigre sur masse grasse plus important. Cette plus grande masse musculaire contribue à une consommation d'oxygène plus importante expliquant sûrement les résultats pour ces coureurs. Il aurait été alors intéressant de normaliser cette consommation d'oxygène par la masse corporelle maigre et non par la masse corporelle totale. Ceci aurait permis dès lors un meilleur moyen de comparaison des économies de course parmi les différents participants. Il aurait encore été possible de soustraire la consommation d'oxygène basale au repos, pour peu que cette consommation basale ait été mesurée selon un protocole dédié. À noter que les résultats de concordance sont quasi inchangés lorsqu'on les détermine à nouveau sans ces 5 derniers triathlètes (résultats non présentés). Enfin et toujours par rapport au classement de référence, la définition des catégories d'économies (et par la suite l'attribution des notes) reste subjective même si elle revient souvent dans la littérature.

Dans un second temps, l'analyse de la concordance des entraîneurs entre eux (au sein du pool d'entraîneur) a révélé des résultats d'ICC de 0.480, ce qui indique une concordance modérée (ou *moderate agreement* selon tableau 4). Lorsqu'on isole les quatre entraîneurs les plus expérimentés, on obtient un ICC de 0.677, ce qui renvoie une meilleure concordance. Ce dernier résultat peut, dans une moindre mesure, aussi être expliqué par le fait que l'ICC tend à augmenter lorsque le nombre de juges diminue.

Le but de cette étude, inédit comme constaté d'après la littérature, aura permis d'apporter des éléments intéressants quant à la capacité des entraîneurs d'athlétisme ou de triathlon à évaluer visuellement l'économie de course d'athlètes issus d'un pool de performances hétérogènes. En ce qui concerne les calculs de concordances entre les évaluations des entraîneurs et le classement de référence, les résultats faisant tous apparaître des concordances très médiocres devraient être pris avec précaution, sous réserve des limitations discutées plus haut. En revanche, on constate que la concordance est bonne au sein du pool d'entraîneur.

Comme l'atteste la littérature et comme mentionné dans l'introduction, l'économie de course permet de différencier des coureurs issus d'un pool homogène de haut niveau. Il serait donc indiqué de répéter l'expérience en recrutant un tel pool de coureurs. Il serait encore intéressant de reprendre ce sujet avec un nombre plus grand de participants, entraîneurs et coureurs confondus, avec estimation statistique de la population minimale de l'échantillon à l'appui. En outre, on devrait s'assurer que la méthodologie permette bel et bien de mesurer la meilleure économie de chaque participant. Les vidéos devraient être faites en haute définition, avec un son de qualité et des prises de vues en plus montrant le coureur de face. Ces points permettraient de tirer au clair de nombreuses limitations soulignées dans ce chapitre.

Pour conclure, ces résultats montrent clairement un désaccord entre les économies de course mesurées et les évaluations, remettant en cause la capacité d'entraîneurs expérimentés à correctement évaluer un paramètre important de la performance qu'est l'économie de course. Cette conclusion est très tranchée et doit absolument être nuancée par les limitations de l'étude relevées dans ce chapitre.

## RÉFÉRENCES

1. Helgerud J, Støren O, Hoff J. Are there differences in running economy at different velocities for well-trained distance runners? *Eur J Appl Physiol.* avr 2010;108(6):1099-105.
2. Fletcher JR, Esau SP, Macintosh BR. Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. déc 2009;107(6):1918-22.
3. Jones AM. The Physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon. *Int J Sports Sci Coach.* juin 2006;1(2):101.
4. Fletcher JR, Esau SP, MacIntosh BR. Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners. *Eur J Appl Physiol.* nov 2010;110(5):1037-46.
5. Berryman N, Maurel D, Bosquet L. Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running. *J Strength Cond Res Natl Strength Cond Assoc.* juill 2010;24(7):1818-25.
6. Støren O, Helgerud J, Støa EM, Hoff J. Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* juin 2008;40(6):1087-92.
7. McCann DJ, Higginson BK. Training to maximize economy of motion in running gait. *Curr Sports Med Rep.* juin 2008;7(3):158-62.
8. Foster C, Lucia A. Running economy : the forgotten factor in elite performance. *Sports Med Auckl NZ.* 2007;37(4-5):316-9.
9. Vallier JM, Bigard AX, Carré F, Eclache JP, Mercier J. Détermination des seuils lactiques et ventilatoires. *Position de la Société française de médecine du sport. Sci Sports.* mai 2000;15(3):133-40.
10. Cottin F, Médigue C, Lopes P, Leprêtre P-M, Heubert R, Billat V. Ventilatory thresholds assessment from heart rate variability during an incremental exhaustive running test. *Int J Sports Med.* avr 2007;28(4):287-94.
11. Cumming GR, Borysyk LM. Criteria for maximum oxygen uptake in men over 40 in a population survey. *Med Sci Sports.* 1972;4(1):18-22.
12. Yoon B-K, Kravitz L, Robergs R. VO<sub>2</sub>max, protocol duration, and the VO<sub>2</sub> plateau. *Med Sci Sports Exerc.* juill 2007;39(7):1186-92.
13. Duncan GE, Howley ET, Johnson BN. Applicability of VO<sub>2</sub>max criteria: discontinuous versus continuous protocols. *Med Sci Sports Exerc.* févr 1997;29(2):273-8.
14. Helgerud J, Høydal K, Wang E, Karlsen T, Berg P, Bjerkaas M, et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO<sub>2</sub>max more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc.* avr 2007;39(4):665-71.
15. Noakes TD. Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Med Sci Sports Exerc.* août 1988;20(4):319-30.

16. Daniels J, Daniels N. Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc.* avr 1992;24(4):483-9.
17. Williams KR, Cavanagh PR. Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. sept 1987;63(3):1236-45.
18. Praz C, Jagdeep S, Praz M, Dériaz O. Coût énergétique de la course en montée et en descente chez les coureurs entraînés pour la course de montagne. *Schweiz Z Für «Sportmedizin Sporttraumatologie».* 2011;59(1):40-4.
19. Bonacci J, Chapman A, Blanch P, Vicenzino B. Neuromuscular adaptations to training, injury and passive interventions: implications for running economy. *Sports Med Auckl NZ.* 2009;39(11):903-21.
20. Moore IS, Jones AM, Dixon SJ. Mechanisms for improved running economy in beginner runners. *Med Sci Sports Exerc.* sept 2012;44(9):1756-63.
21. Millet GP, Candau R. Facteurs mécaniques du coût énergétique dans trois locomotions humaines. *Sci Sports.* 2002;17.
22. Bergh U, Sjödin B, Forsberg A, Svedenhag J. The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Med Sci Sports Exerc.* févr 1991;23(2):205-11.
23. Morgan DW, Bransford DR, Costill DL, Daniels JT, Howley ET, Krahenbuhl GS. Variation in the aerobic demand of running among trained and untrained subjects. *Med Sci Sports Exerc.* mars 1995;27(3):404-9.
24. Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med Auckl NZ.* 2004;34(7):465-85.
25. Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Reliability and variability of running economy in elite distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* nov 2004;36(11):1972-6.
26. Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS, Baldini FD. Variability in running economy and mechanics among trained male runners. *Med Sci Sports Exerc.* mars 1991;23(3):378-83.
27. Joyner MJ, Coyle EF. Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol.* 1 janv 2008;586(1):35-44.
28. Poortmans JR, Boisseau N. Biochimie des activités physiques. *De Boeck Supérieur;* 2003. 488 p.
29. Morgan DW, Martin PE, Baldini FD, Krahenbuhl GS. Effects of a prolonged maximal run on running economy and running mechanics. *Med Sci Sports Exerc.* déc 1990;22(6):834-40.
30. Adelson W, Yaggie JA, Buono MJ. The vertical component of the ground reaction force and running economy. *Clin Kinesiol J Am Kinesiotherapy Assoc.* avr 2005;59(1).
31. Perl DP, Daoud AI, Lieberman DE. Effects of footwear and strike type on running economy. *Med Sci Sports Exerc.* juill 2012;44(7):1335-43.

32. McGregor SJ, Busa MA, Yaggie JA, Boltt EM. High resolution MEMS accelerometers to estimate VO<sub>2</sub> and compare running mechanics between highly trained inter-collegiate and untrained runners. *PLoS One*. 2009;4(10):e7355.
33. Saunders PU, Telford RD, Pyne DB, Peltola EM, Cunningham RB, Gore CJ, et al. Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J Strength Cond Res Natl Strength Cond Assoc*. nov 2006;20(4):947-54.
34. Spurrs RW, Murphy AJ, Watsford ML. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol*. mars 2003;89(1):1-7.
35. Kram R, Taylor CR. Energetics of running: a new perspective. *Nature*. 19 juill 1990;346(6281):265-7.
36. Chapman RF, Laymon AS, Wilhite DP, McKenzie JM, Tanner DA, Stager JM. Ground contact time as an indicator of metabolic cost in elite distance runners. *Med Sci Sports Exerc*. mai 2012;44(5):917-25.
37. Dalleau G, Belli A, Bourdin M, Lacour JR. The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *Eur J Appl Physiol*. févr 1998;77(3):257-63.
38. Kyröläinen H, Belli A, Komi PV. Biomechanical factors affecting running economy. *Med Sci Sports Exerc*. août 2001;33(8):1330-7.
39. Hallgren KA. Computing Inter-Rater Reliability for Observational Data: An Overview and Tutorial. *Tutor Quant Methods Psychol*. 2012;8(1):23-34.
40. Rousson V, Gasser T, Seifert B. Assessing intrarater, interrater and test-retest reliability of continuous measurements. *Stat Med*. 30 nov 2002;21(22):3431-46.
41. Norman GR, Streiner DL. *Biostatistics: The Bare Essentials*. 2nd éd. B.C. Decker; 2000. 324 p.
42. Fleiss JL, Cohen J. The equivalence of weighted kappa and the intraclass correlation coefficient as measures of reliability. *Educ Psychol Meas*. 1973;33:613-9.
43. Rousson V. Assessing inter-rater reliability when the raters are fixed: Two concepts and two estimates. *Biom J Biom Z*. 21 mars 2011;53(3):477-90.
44. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. mars 1977;33(1):159-74.