



Identification des différentes stratégies de course en cyclisme : Influence sur la performance en course à pied chez les triathlètes

Christophe Hausswirth, Jeanick Brisswalter, Fabrice Vercruyssen, Cyrille Mazure, Thierry Bernard, Philippe Fattori, Frank Bignet

► To cite this version:

Christophe Hausswirth, Jeanick Brisswalter, Fabrice Vercruyssen, Cyrille Mazure, Thierry Bernard, et al.. Identification des différentes stratégies de course en cyclisme : Influence sur la performance en course à pied chez les triathlètes. [Rapport de recherche] Rapport du projet de recherche MJSVA n° 03-052, Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2006. hal-01931342

HAL Id: hal-01931342

<https://insep.hal.science/hal-01931342>

Submitted on 22 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Juin 2006

Rapport du projet de recherche MJSVA n° 03-052
INSEP - Département des Sciences du Sport
Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

« Identification des différentes stratégies de course en cyclisme :

Influence sur la performance en course à pied chez les triathlètes »

Christophe HAUSSWIRTH ¹

Collaborateurs scientifiques :
J. BRISSWALTER ², F. VERCRUYSEN ², C. MAZURE ², T. BERNARD ²

Collaborateurs fédéraux :
P. FATTORI ³, F. BIGNET ³

Travail effectué par

¹ Laboratoire de biomécanique et physiologie, INSEP

En collaboration avec

² Université du Sud de Toulon-Var, Laboratoire d'ergonomie sportive et performance,
³ Fédération Française de Triathlon

Institut National du Sport et de l'Education Physique
11, avenue du Tremblay – 75012 Paris
01 41 74 41 00 - www.insep.fr

SOMMAIRE

SOMMAIRE	- 2 -
INTRODUCTION GENERALE	- 5 -
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	6
CHAPITRE 1	- 7 -
COUT ENERGETIQUE ET PARAMETRES	- 7 -
D'INFLUENCE DE LA PERFORMANCE	- 7 -
1. Description du coût énergétique	- 8 -
1.1. Rendement global et coût énergétique	- 9 -
1.2. Les différents indices de l'efficacité en cyclisme	- 10 -
1.3. Définition du coût énergétique	- 14 -
1.4. Paramètres de variation du coût énergétique du cyclisme	- 15 -
1.4.1. Résistances aérodynamiques	- 15 -
1.4.2. Facteurs non aérodynamiques	- 21 -
1.4.2.1. Résistance de friction	- 21 -
1.4.2.2. Force gravitationnelle	- 22 -
1.4.2.3. Vitesse de déplacement	- 24 -
1.4.2.4. Position corporelle	- 26 -
1.4.2.5. Forces d'inertie	- 28 -
1.4.2.6. Caractéristiques du pédalage	- 28 -
1.4.2.6.1. Cadence de pédalage	- 28 -
1.4.2.6.2. Paramètres biomécaniques du pédalage	- 33 -
1.4.2.6.3. Longueur de manivelle	- 34 -
1.4.2.6. Stratégie d'allure	- 35 -
2. Adaptation physiologique au cours d'enchaînements d'exercices : influence des caractéristiques de l'exercice préalable	- 36 -
2.1. Effet d'un exercice préalable sur la performance au cours d'enchaînements d'exercices	- 36 -
2.2. Effet d'un exercice préalable sur la lactatémie au cours d'enchaînements d'exercices	- 37 -
2.3. Effet d'un exercice préalable sur la consommation d'oxygène au cours d'enchaînements d'exercices	- 38 -
2.3.1. Effet de l'intensité relative de l'exercice	- 38 -
2.3.2. Effet de la masse musculaire recrutée lors de l'exercice préalable	- 39 -
CHAPITRE 2	- 41 -
VARIATIONS DE L'EPREUVE CYCLISTE :	- 41 -
Effet sur la course à pied réalisée en enchaînement	- 41 -
1. Effet d'un exercice préalable de cyclisme sur les paramètres physiologiques et la performance en course à pied	42
2. Facteurs d'influence sur l'adaptation physiologique lors de l'enchaînement	47
2.1. Influence de la morphologie	47
2.2. Influence du niveau d'expertise	47
2.3. Rôle de la thermorégulation	48
2.4. Influence de la stratégie d'allure	49

<i>HYPOTHESES DE TRAVAIL</i>	- 51 -
<i>METHODOLOGIE GENERALE</i>	- 53 -
<i>RECUEIL DES VARIABLES ETUDIEES</i>	- 53 -
1. Introduction	- 54 -
2. Cadres expérimentaux	- 54 -
3. Sujets de l'expérimentation	- 54 -
4. Perception de l'effort	- 55 -
5. Recueil des variables métaboliques	- 56 -
6. Recueil des variables biomécaniques	- 61 -
7. Protocole expérimental sur le terrain	- 63 -
8. Logiciels et traitements statistiques des variables	- 64 -
<i>PRESENTATION DES PRINCIPAUX RESULTATS</i>	- 66 -
Résultats	- 67 -
Performances	- 67 -
Réponses métaboliques	- 67 -
Conditions	- 69 -
<i>DISCUSSION GENERALE</i>	- 74 -
Discussion	- 75 -
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	- 80 -
<i>GLOSSAIRE</i>	- 99 -
<i>RESUME</i>	- 105 -

INTRODUCTION

GENERALE

Parmi les activités dites *multivariées* qui consistent à enchaîner diverses disciplines, le triathlon et le duathlon ont en commun un enchaînement d'épreuves de cyclisme et de course à pied. Cet enchaînement est précédé d'une épreuve de natation lors du triathlon et d'une épreuve de course à pied lors du duathlon. Comme dans toutes les activités d'endurance, la performance dans ces disciplines dépend de la capacité du sujet à maintenir une vitesse maximale de déplacement pendant toute la durée de l'épreuve tout en réduisant le coût énergétique de la locomotion, défini comme la quantité d'énergie métabolique dépensée au-dessus de la valeur de repos par unité de distance parcourue (*di Prampero, 1986 ; Hausswirth et Lehénaff, 2001 ; O'Toole et Douglas, 1995*).

Depuis les premiers travaux réalisés dans le cadre des activités enchaînées, l'influence du cyclisme sur la course à pied a fait l'objet d'un intérêt particulier. En effet des corrélations significatives ont été mises en évidence entre la performance en triathlon et, le coût énergétique de la partie cycliste ou le coût énergétique de la course à pied (*Miura et coll., 1997 ; Schabort et coll., 2000*). Des études récentes ont montré que le débit d'oxygène était affecté par deux paramètres principaux : la masse musculaire et la charge métabolique mises en jeu lors de la première épreuve (*Hausswirth et coll., 1996 ; Vercruyssen et coll., 2005*). La manipulation de la cadence de pédalage a permis de suggérer qu'aucun de ces paramètres ne pouvait expliquer à lui seul l'altération de la performance pédestre lors d'un enchaînement cyclisme – course à pied (*Vercruyssen et coll., 2005*). A l'image de l'influence de la cadence, les conditions de réalisation de l'épreuve de cyclisme sont des facteurs influençant la charge métabolique et musculaire et ses conséquences sur la performance pédestre subséquente. Dans ce contexte, l'étude de Millet et coll. (2000) montre que lors d'un enchaînement course à pied – cyclisme – course à pied, les variations de coût énergétique de la dernière épreuve de course à pied dépendent du niveau d'expertise. L'augmentation du coût énergétique observée lors de cette dernière épreuve n'est pas significative chez les duathlètes élites.

L'évolution du règlement concernant l'interdiction de rouler en peloton (*i.e. drafting*) lors de l'épreuve de cyclisme du triathlon et du duathlon a modifié le déroulement des épreuves sur un plan tactique. Le niveau des performances en course à pied s'est élevé et en amont les procédures d'entraînement se sont affinées. Quelques études se sont intéressées à cette nouvelle règle et à ses influences potentielles sur la performance (*Hausswirth et coll., 1999 ; Ramsay et coll., 2001*). Elles révèlent une meilleure performance pédestre après une épreuve de cyclisme réalisé en condition de *drafting* par comparaison avec une épreuve réalisée seul (*Hausswirth et coll., 1999*).

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1

COUT ENERGETIQUE ET PARAMETRES

D'INFLUENCE DE LA PERFORMANCE

DANS

LES ACTIVITES CYCLIQUES TERRESTRES

La comparaison des vitesses maximales atteintes lors de records au cours d'épreuves d'endurance montre des valeurs fort différentes en fonction du mode de locomotion considéré pour des exercices de durée identique ($1,7 \text{ m.s}^{-1}$ en natation ; 14 m.s^{-1} en cyclisme ; $6,4 \text{ m.s}^{-1}$ en course à pied ; *di Prampero et coll., 1976*). Ces différences ne sont pas liées aux puissances musculaires maximales des sportifs détenteurs de ces records, qui sont sensiblement identiques (*Åstrand et Rodahl, 1986*), mais semblent dépendre essentiellement du coût énergétique de la locomotion, représentant la quantité d'énergie dépensée par unité de distance (*di Prampero, 1986*). Dans ce cadre, les valeurs de coût énergétique relevées dans la littérature sont de l'ordre de $20 \text{ J.m}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ lors d'un 1500 m nage libre, de $2,3 \text{ J.m}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ lors d'un 10 km de cyclisme, et de $4,3 \text{ J.m}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ lors d'un 5000 m de course à pied (*di Prampero, 1986*).

1. Description du coût énergétique

Les différences de coût énergétique entre les modes de locomotion peuvent s'expliquer à plusieurs niveaux à partir de l'analyse des différentes étapes de transformation d'énergie au sein de l'organisme. En effet, la production d'une vitesse de déplacement résulte d'un certain nombre de processus de transformations énergétiques identifiés par Van Ingen Schenau et Cavanagh (1990). L'efficacité du sujet en déplacement peut donc être envisagée aussi bien à un niveau local qu'au niveau global de l'organisme en considérant soit le rendement mécanique, soit le coût énergétique. Ces différents niveaux renvoient à des approches distinctes de la littérature qui seront détaillées dans les chapitres suivants.

Van Ingen Schenau et Cavanagh (1990) identifient plusieurs niveaux d'efficacité (ou de rendement) à partir des différentes étapes de transformation de l'énergie métabolique en énergie mécanique nécessaire au déplacement (*figure 1*).

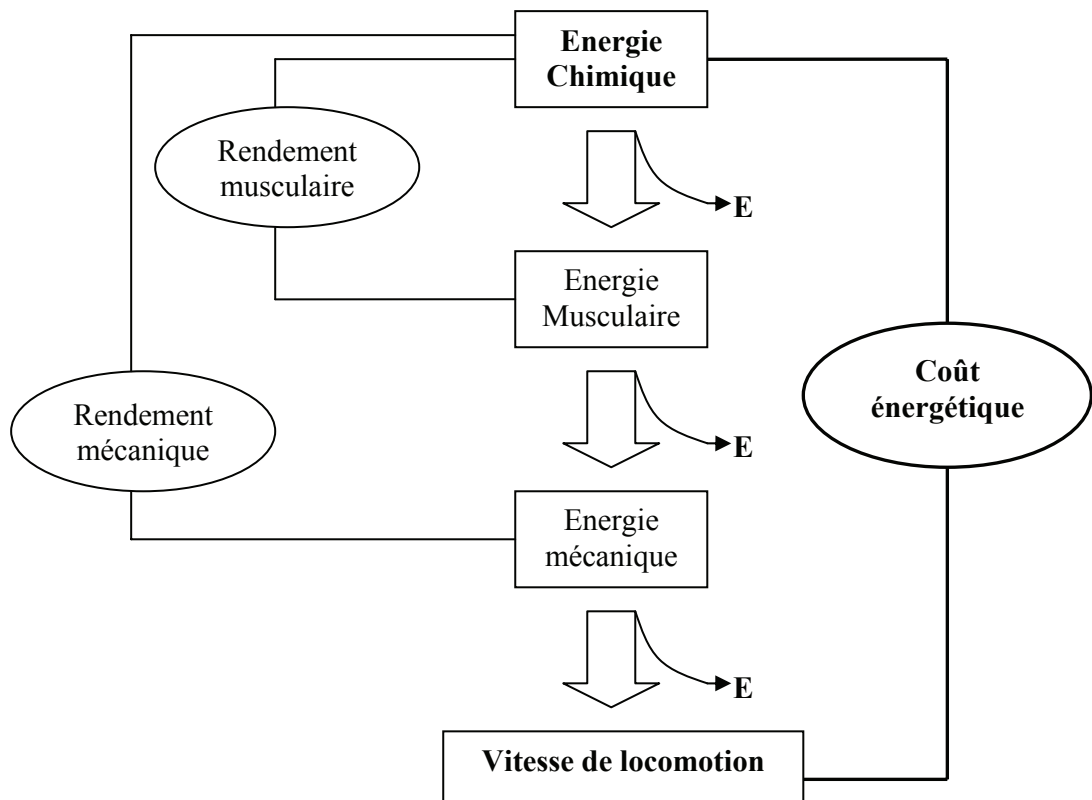


Figure 1. Représentation schématique de la transformation de l'énergie métabolique en énergie mécanique nécessaire au déplacement. *E* représente la perte d'énergie engendrée par les différentes transformations (Van Ingen Schenau et Cavanagh, 1990).

1.1. Rendement global et coût énergétique

L'effet des variations d'efficacité du système sur la performance dans les activités de locomotion est généralement évalué par des indices plus macroscopiques que le rendement musculaire et mécanique. Cette deuxième approche théorique envisage soit le calcul du rendement global, défini comme le ratio entre le travail utile produit et l'énergie métabolique dépensée (équation 2), soit le calcul du coût énergétique représentant le ratio entre l'énergie métabolique dépensée et la vitesse de déplacement (équation 3, di Prampero, 1986 ; Gaesser et Brooks, 1975).

$$\text{Rendement global (\%)} = \frac{\text{Travail utile (joules)}}{\text{Energie métabolique (joules)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Coût énergétique}^{(3)} = \frac{\text{Energie métabolique (mLO}_2\text{.min}^{-1}\text{.kg}^{-1})}{\text{Vitesse de déplacement (m.min}^{-1})} \times 100$$

(mL d'O₂.m⁻¹.kg⁻¹)

Selon l'indice utilisé, l'optimisation de l'efficacité globale du sujet se traduit soit par une augmentation du rendement global, soit par une diminution du coût énergétique. L'utilisation de l'un ou l'autre de ces indices dépend essentiellement de la façon dont est quantifié le travail utile produit. Dans la plupart des activités de locomotion, le travail utile est estimé par la vitesse de déplacement du sujet, et le coût énergétique est utilisé comme indice représentatif de l'efficacité globale du sujet. Par contre, en cyclisme, l'évaluation de l'efficacité de la locomotion est classiquement réalisée en laboratoire, et le travail utile est quantifié à partir de la puissance développée par le sujet en sortie d'ergocycle.

Ainsi le rendement global est le paramètre privilégié lors des épreuves de cyclisme réalisées en laboratoire. Dans ce contexte, les différents auteurs s'intéressant à la quantification du rendement global dans l'activité cyclisme font référence à plusieurs méthodes de calcul du rendement qu'il convient de préciser.

1.2. Les différents indices de l'efficacité en cyclisme

Quatre types d'indices sont couramment utilisés dans la littérature pour évaluer le rendement de l'activité cyclisme : *gross efficiency*, *net efficiency*, *work efficiency*, *delta efficiency* (Gaesser et Brooks, 1975 ; Stainsby et coll., 1980). Ces indices se distinguent exclusivement par la quantification de l'énergie métabolique dépensée, le numérateur représentant dans tous les cas le travail utile produit.

L'indice le plus global du rendement de l'activité est l'efficacité brute (*gross efficiency*, *équation 4*), notée GE et défini comme le ratio entre le travail utile produit mesuré à la sortie de l'ergomètre, et la dépense d'énergie métabolique totale nécessaire à la réalisation de ce travail (notée E1 et représentant l'équivalent énergétique du litre d'oxygène consommé en fonction du quotient respiratoire QR).

$$\text{Gross efficiency (\%)} = \frac{\text{Travail utile produit (joules)}}{\text{Energie métabolique totale dépensé (E1, joules)}} \times 100 \quad (4)$$

Dans cette équation, l'énergie métabolique dépensée représente non seulement l'énergie métabolique nécessaire à la réalisation du travail utile, mais également d'autres sources de dépenses énergétiques qui ne contribuent pas directement à la réalisation de ce travail. Ainsi sont prises en compte l'énergie de gesticulation (correspondant au travail interne ; *Francescato et coll., 1995*), la dépense énergétique liée au recrutement des muscles permettant le maintien de la posture ou encore le coût en oxygène des muscles assurant les fonctions cardiaque et respiratoire. Dans le calcul du rendement global, la valeur du dénominateur est donc surestimée et l'efficacité globale du sujet est sous-estimée (*Sidossis et coll., 1992 ; Stainsby et coll., 1980*). Cette principale limite a amené les physiologistes à considérer d'autres indices représentatifs de l'efficacité en cyclisme. Ces indices se différencient par leur dénominateur. Dans ce cadre, différentes dépenses d'énergie de base peuvent être retranchées à la valeur E1 de l'équation 4. Les plus couramment utilisées dans la littérature sont la valeur de débit volumique d'oxygène ($\dot{V} O_2$) consommé au repos, celle liée à la variation de puissance de sortie lors de l'exercice ou la dépense énergétique correspondant au travail interne (*Stainsby et coll., 1980*).

$$\begin{aligned}
 \text{Net efficiency (\%)} &= \frac{\text{Travail utile produit (joules)}}{\text{Energie métabolique dépensée à l'exercice (E1, joules)} - \text{Energie métabolique dépensée au repos (E2, joules)}} \times 100 \\
 (5)
 \end{aligned}$$

Dans le calcul de l'efficacité nette NE (*net efficiency*, *équation 5*), la dépense énergétique de repos (E2) est déduite de la valeur E1 afin d'évaluer exclusivement la dépense énergétique correspondant au travail externe fourni (*e.g. Stainsby et coll., 1980*). Cependant, l'estimation d'une valeur de $\dot{V}O_2$ de repos dans des conditions expérimentales a révélé une forte variabilité inter- et intra-individuelle. Ce manque de reproductibilité amène donc certains auteurs à utiliser la valeur de $\dot{V}O_2$ de repos théorique de 0,083 mL.kg⁻¹.s⁻¹ calculée par Medbø et coll. (1988) à partir de la relation $\dot{V}O_2$ -vitesse chez de jeunes adultes de sexe masculin.

L'efficacité de travail WE (*work efficiency*, *équation 6*) se définit comme le ratio entre le travail utile produit et la différence entre l'énergie métabolique totale dépensée E1 et l'énergie métabolique nécessaire au pédalage à vide (E3). La valeur d'énergie métabolique prise en considération dans ce calcul ne prend donc pas en compte l'énergie de gesticulation, correspondant au travail interne nécessaire pour déplacer les segments corporels au cours d'un cycle de pédalage (*Winter, 1990*).

$$\begin{aligned}
 \text{Work efficiency (\%)} &= \frac{\text{Travail utile produit (joules)}}{\text{Energie métabolique dépensée à l'exercice (E1, joules)} - \text{Energie métabolique dépensée pour le pédalage à vide (E3, joules)}} \times 100 \\
 (6)
 \end{aligned}$$

La variation de l'efficience DE (*delta efficiency*, *équation 7*) représente le ratio entre l'équivalent énergétique de la variation de travail utile produit entre deux instants et l'équivalent énergétique de la variation d'énergie métabolique dépensée entre ces deux instants. Comparativement aux indices du rendement précédemment évoqués, de nombreux auteurs considèrent ce paramètre comme la meilleure estimation de l'efficience musculaire (*Horowitz et coll. 1994; Coyle 1995*). Ce calcul réduirait l'influence des processus métaboliques qui ne contribuent pas directement à la réalisation du travail mécanique (*Böning et coll., 1984 ; Gaesser et Brooks, 1975 ; Sidossis et coll., 1992*).

$$(7) \quad \text{Delta efficiency (\%)} = \frac{\text{Delta du travail utile produit (joules)}}{\text{Delta de l'énergie métabolique dépensée (joules)}} \times 100$$

Cependant, Stainsby et coll. (1980) soulignent qu'aucun de ces indices du rendement (GE, NE, WE, DE) ne représente précisément la variation de l'efficience au cours de l'exercice. D'une part, il apparaît que la mesure du travail utile produit représente une sous-estimation du travail mécanique total réalisé, parce qu'elle ne prend pas en compte le travail interne dont l'évaluation nécessite une analyse cinématique afin d'estimer les variations d'énergie cinétique et potentielle liées au déplacement du centre de masse (*Neptune et Van den Bogert, 1998 ; Widrick et coll., 1992 ; Winter, 1979*). D'autre part, la soustraction d'une valeur d'énergie métabolique de base (dépense énergétique de repos, dépense énergétique liée au pédalage à vide pour NE et WE respectivement) nécessite que celle-ci soit constante tout au long de l'exercice. Or, l'intervention de certains processus métaboliques qui ne contribuent pas directement à la production du travail utile au cours de l'exercice peut modifier ces valeurs de base entre le début et la fin de l'exercice. Ces principaux mécanismes sont le métabolisme splanchnique, l'augmentation de la température

corporelle, le coût de la ventilation, ou encore la modification du niveau de catécholamines circulantes.

1.3. Définition du coût énergétique

Le coût énergétique de la locomotion (CE) est défini comme la quantité d'énergie consommée par unité de distance. Il peut également être décrit comme le rapport entre le débit d'énergie consommé par unité de temps $\dot{E}$ et la vitesse de déplacement v (*équation 8; di Prampero, 1986*).

$$CE = \dot{E} \cdot v^{-1}$$

(8)

Lors d'un exercice réalisé dans des conditions aérobies, E correspond à la consommation d'oxygène (VO_2) exprimée en $mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$, v est exprimée en $m \cdot min^{-1}$, et CE en $mL \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$. De plus, CE peut être exprimé en $J \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1}$ en prenant en compte l'équivalent énergétique du litre d'oxygène (EO_2) exprimé en $kJ \cdot L^{-1}$ dont la valeur dépend du substrat utilisé comme source d'énergie. Pour une consommation exclusive de lipides, le taux d'échange respiratoire ou quotient respiratoire (QR) est de 0,7 et EO_2 est égal à 19,6 $kJ \cdot L^{-1}$ alors que pour une consommation exclusive de substrats glucidiques, le quotient respiratoire est de 1,0 et EO_2 est égal à 21,3 $kJ \cdot L^{-1}$. La valeur de EO_2 est déterminée par l'équation suivante (*équation ci-dessous ; Åstrand et Rodahl, 1986*).

$$EO_2 = 21,3 \cdot [(QR - 0,7) \cdot 0,3^{-1}] + 19,6 \cdot [(1,0 - QR) \cdot 0,3^{-1}]$$

1.4. Paramètres de variation du coût énergétique du cyclisme

En cyclisme, le CE est dépendant des résistances à l'avancement (résistance totale R_T). Les résistances de roulement (R_r) auxquelles sont associées les résistances de frictions représentent une partie de la dépense énergétique.

Cependant, il apparaît que la plus grande partie de la dépense énergétique (environ 90 %) est utilisée pour lutter contre la résistance de l'air (R_a) (*équation 10*).

$$R_T = R_a + R_r$$

(10)

L'influence des résistances aérodynamiques sur le CE du cyclisme sera donc envisagée dans un premier temps. Les autres facteurs de variation de CE seront abordés par la suite.

1.4.1. Résistances aérodynamiques

Dans toutes les formes de locomotion terrestre, l'air s'oppose au déplacement d'un corps avec une force proportionnelle (R_a exprimé en Newton N) au carré de la vitesse (*équation 11* ; Capelli et coll., 1993 ; Davies, 1980 ; Di Prampero et coll., 1979 ; Ménard et coll., 1992 ; Pugh, 1974)

$$R_a = 0,5 \cdot S \cdot C_x \cdot \rho \cdot v^2$$

(11)

Où S représente la surface de projection frontale en m^2 , C_x est le coefficient de forme, et ρ , la masse volumique de l'air en $kg.m^{-3}$ (égale à $1,293 kg.m^{-3}$ à une pression atmosphérique de 760

mmHg et une température de 273 °K). L'énergie métabolique dépensée contre cette force est elle aussi proportionnelle au carré de la vitesse. Par conséquent la puissance métabolique, représentant le produit de l'énergie métabolique par la vitesse de déplacement, varie avec le cube de la vitesse (*di Prampero, 1986*).

Les indices S et Cx, difficilement mesurables séparément, sont classiquement regroupés en un coefficient de traînée aérodynamique (SCx), prenant en compte essentiellement la forme du corps en déplacement et sa surface, et caractérisant la globalité des qualités aérodynamiques d'un athlète et de son équipement. Dans ce cadre, lorsqu'une bicyclette traditionnelle est utilisée, une relation de type linéaire est décrite entre la surface de projection frontale des sujets et leur surface corporelle (BS en m² ; *figure 2 ; Capelli et coll., 1998*).

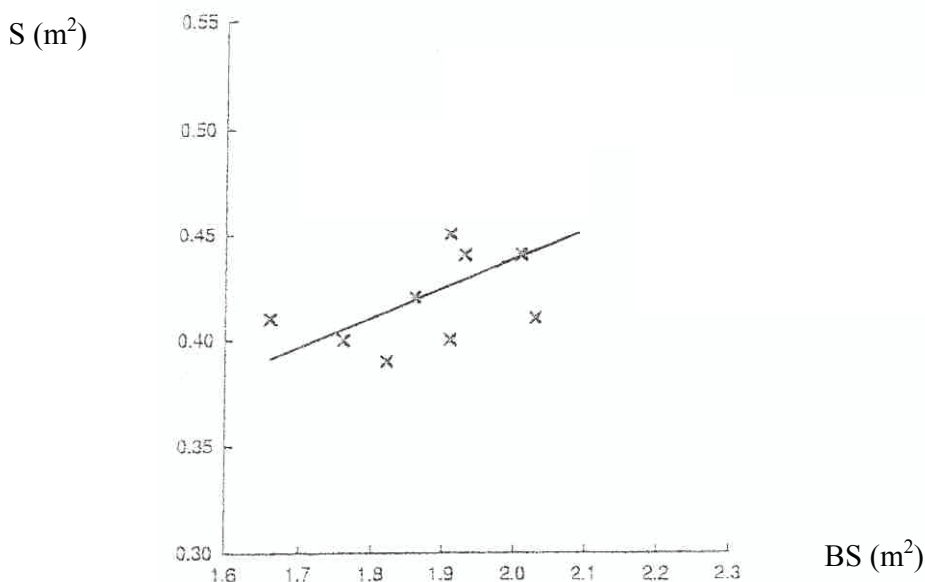


FIGURE 2. Influence de la surface corporelle (BS en m²) sur la surface projetée sur le plan frontal (S en m²) lors d'un exercice sur bicyclette traditionnelle. La régression est décrite par l'équation : $S = 1,137 BS + 0,165$; $r^2 = 0,401$ (d'après Capelli et coll., 1998)

La plupart des auteurs s'accordent à dire que les principaux facteurs de variation de SCx sont la position du sujet sur la bicyclette (*Gnehm et coll., 1997*), la géométrie de la bicyclette (*Heil et coll., 1995 ; Kyle, 1979 ; Kyle et Burke, 1984*), l'utilisation de matériel aérodynamique (*Kyle et Burke, 1984*), ainsi que la texture des vêtements (*Kyle, 1988*).

Dans ce cadre, l'influence de la position du sujet sur la bicyclette a été étudiée à plusieurs reprises en considérant trois types de position : la position haute avec les mains sur les leviers de freins (*upright position*, UP), la position basse avec les mains au creux du cintre (*dropped position*, DP), et la position aérodynamique (*aerodynamic position*, AP) généralement adoptée sur les épreuves de contre-la-montre (clm), grâce à l'ajout d'un guidon aérodynamique dit "de triathlète" (Gnehm et coll., 1997 ; Grappe et coll., 1997 ; Faria, 1992). Ce type de guidon permet aux coudes de reposer sur des coussinets placés au niveau du cintre. Les mains agrippant le bout du guidon de manière à former un angle bras - avant bras d'environ 90°, se trouvent devant la tête ou le torse du cycliste (Grappe et coll., 1998).

Grappe et coll. (1997) ont observé des diminutions de l'aire frontale du sujet liées à l'adoption des positions DP et AP, (respectivement -7,8 % et -12,4 %) par comparaison avec la position UP (*figure 3*). D'autres auteurs relèvent des réductions encore plus importantes de l'aire frontale grâce à l'utilisation de bicyclette aérodynamique (-30 % à -48 % pour Ménard et coll., 1990). Enfin, les cyclistes sont amenés à utiliser du matériel aérodynamique pouvant également avoir une influence sur les résistances à l'avancement. En particulier, celles-ci sont réduites par l'utilisation de roues plus petites, plus légères, plus rigides et comportant moins de rayons, de pneus plus étroits, mais également de chaussures et de casques spécialement profilés pour réduire les résistances aérodynamiques (Kyle, 1979 ; Kyle et Burke, 1984). Il semble aussi que l'utilisation d'une combinaison intégrale en lycra avec une capuche et le port d'un casque profilé puissent réduire ces résistances d'environ 11 % et 7 % respectivement (Kyle, 1988 ; Kyle et Burke, 1984). De même, un cadre poli et profilé limitant les parties acérées et les protubérances, un bidon profilé, des couvres-chaussures, et des composants (*e.g.* câbles de transmissions) re-agencés et cachés dans la structure même de la bicyclette diminuent les résistances aérodynamiques (Kyle et Burke, 1984).

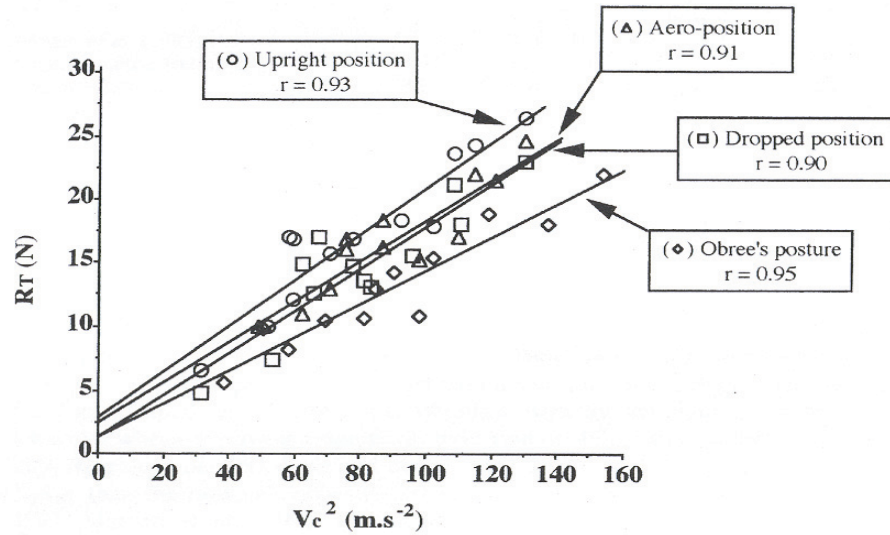


FIGURE 3. Evolution de la résistance totale R_T (N) en fonction de la vitesse au carré V_c^2 ($m.s^{-1}$) pour quatre positions de pédalage (d'après Grappe et coll., 1997).

La masse volumique ρ déterminée à partir de l'équation 12, évolue dans le même sens que la pression barométrique (PB), et donc dans le sens inverse de l'altitude.

$$\rho = \rho_0 \cdot (PB / 760) \cdot (273 / T) \quad (12)$$

Où T est la température en $^{\circ}K$, PB est la pression barométrique, et ρ_0 est la masse volumique de l'air dans les conditions standards de température et de pression (*Standard Temperature and Pressure Dry : STPB*).

En altitude, les diminutions de la pression barométrique et de la masse volumique de l'air ($\rho = 1,23 \text{ kg.m}^{-3}$ au niveau de la mer et $\rho = 0,93 \text{ kg.m}^{-3}$ à 2300 m d'altitude) se traduisent par une réduction des résistances aérodynamiques. Cependant, la moindre dépense énergétique pour lutter contre ces résistances est contrebalancée par la réduction progressive de la consommation

maximale d'oxygène au fur et à mesure que l'altitude augmente (*Åstrand et Rodahl, 1986*). En effet, avec l'altitude, PB diminue de 760 Torr au niveau de la mer à 526 Torr à 3000 m et 354 Torr à 6000 m. Cette baisse de PB s'accompagne en parallèle d'une baisse de la pression partielle en O₂ selon la loi de Dalton définie par l'équation 13, où PIO₂ est la pression de l'O₂ inspiré, FIO₂ la fraction d'O₂ dans l'air inspiré (en L d'O₂.L⁻¹), et 47 la valeur de la tension de vapeur d'eau à 37 °C (310 °K).

$$PIO_2 = (PB - 47) FIO_2$$

(13)

Au niveau de la mer, la PIO₂ est de 158,8 Torr, et s'abaisse à 100 Torr à 3000 m, et à 65 Torr à 6000 m (*Monod et Flandrois, 1997*) entraînant une diminution de la consommation maximale en O₂. Par exemple, à Mexico (altitude : 2200 mètres), lors des Jeux Olympique de 1968, la vitesse en cyclisme était environ 3 à 5 % plus grande qu'au niveau de la mer alors qu'en théorie la différence aurait dû être de 8 %. L'écart entre ces valeurs est justifié par la diminution, avec l'altitude, de la puissance aérobie (*Kyle et Burke, 1984*). Les effets de l'altitude sur la performance cycliste peuvent être calculés à partir du $\dot{V} O_{2max}$ du cycliste et de l'influence de l'altitude sur sa diminution (*Capelli et di Prampero, 1995 ; di Prampero et coll., 1979 ; Péronnet et coll., 1989*). Cependant, cette diminution varie selon les individus de 1,5 à 3,5 % par élévation de 300m (*Åstrand et Rodahl, 1986*) et est dépendante de plusieurs facteurs comme l'âge, les variations circannuelles, l'aptitude physique, le sexe (*Monod et Flandrois, 1997*). Dans ce cadre, Rieu (1988) suggère qu'il existe une altitude optimale située aux alentours de 4000 m qui permet d'atteindre une vitesse maximale de déplacement en cyclisme sur le kilomètre départ arrêté. Ainsi, le record du monde de cette épreuve est de 1 min 00 s 711 ms au niveau de la mer (détenu par Chris Hoy) et de 58 s 875 ms à une altitude de 3700 m (réalisé par Arnaud Tournant au vélodrome d'Alto Irpavi, La Paz, Bolivie) où la densité de l'air est réduite de 33 % (*Kyle et Burke, 1984*).

L'influence non négligeable des résistances aérodynamiques sur le CE du cyclisme a amené les compétiteurs à utiliser un certain nombre de stratégies afin de s'exposer le moins possible à ces résistances. C'est ainsi que le fait de rouler en peloton ou dans l'aspiration d'un autre cycliste est devenu une pratique courante en cyclisme. C'est aussi le cas lors de la partie cycliste de certaines compétitions de triathlon sur les distances sprint et courte distance chez les élites (seniors et juniors) depuis la légalisation du *drafting* (*i.e.* fait de rouler abrité derrière un autre concurrent) en 1995 sur les épreuves de niveau national et plus.

De nombreux auteurs ont observé que rouler en situation d'aspiration se traduit par une diminution des résistances à l'avancement d'une part, et du coût énergétique d'autre part (*Hagberg et McCole, 1996; Hausswirth et coll., 1999; Hausswirth et coll., 2001; Kyle, 1979; McCole et coll., 1990*). La diminution des résistances aérodynamiques en situation d'aspiration entraîne une diminution des paramètres physiologiques ($\dot{V} O_2$, débit ventilatoire $\dot{V}_E$, et fréquence cardiaque FC) dont l'ampleur dépend de plusieurs facteurs, en particulier de la vitesse de déplacement, du type d'abri, et de la distance entre les cyclistes (*Millet et Candau, 2002*). Ainsi, Kyle (*1979*) a observé une diminution significative de $\dot{V} O_2$ de 29 % en situation d'aspiration à 24 km.h⁻¹ par comparaison avec un effort solitaire. Par ailleurs, Hagberg et McCole (*1996*) et McCole et coll. (*1990*) ont étudié l'influence de différents types d'abris et ont mis en évidence des diminutions de $\dot{V} O_2$ de 26 %, 39 %, et 62 % lorsque le sujet roulait derrière un cycliste seul, un groupe de cycliste ou un camion respectivement. La distance à laquelle se tient le sujet en situation de *drafting* par rapport à son abri est également un paramètre déterminant l'efficacité de cette stratégie. Dans ce cadre, si la diminution des résistances aérodynamiques est de 44 % lorsque le sujet est proche de son abri (0 m), elle se réduit à 27 % si la distance est de 2 m (*Kyle, 1979 ; Kyle et Burke, 1984*).

1.4.2. Facteurs non aérodynamiques

Malgré l'importance des résistances aérodynamiques en cyclisme, d'autres facteurs ont une influence non négligeable sur le CE de cette activité. Les principaux sont la résistance de friction, la force gravitationnelle, la vitesse de déplacement, la position du cycliste, et la cadence de pédalage (*di Prampero, 1986 ; Millet et Candau, 2002*).

1.4.2.1. Résistance de friction

En cyclisme, la résistance de friction comprend deux composantes : d'une part, la résistance de roulement (R_r , exprimé en N) créée par le contact entre les roues de la bicyclette et le sol et d'autre part, les résistances de friction internes liées aux frottements des différents mécanismes de la bicyclette et concernant notamment les altérations au niveau de la transmission par la chaîne (*Kyle et Burke, 1984*).

Les résistances de roulement peuvent être déterminées à partir de l'équation 14:

$$R_r = CR \cdot m^* \cdot g$$

(14)

Où CR est le coefficient de roulement, m^* est la masse de l'ensemble cycliste-bicyclette (exprimée en kg), et g est l'accélération gravitationnelle (égale à $9,81 \text{ m.s}^{-2}$). Ces résistances sont généralement comprises entre 0,001 et 0,006 N (*Grappe et coll., 1999*). Elles sont indépendantes de la vitesse de déplacement mais varient en fonction de nombreux paramètres : la charge additionnelle qui potentialise m^* , la pression de gonflage, le type de pneumatique, la largeur de la jante, et les propriétés de la surface de roulement qui influencent le coefficient de roulement CR (*Grappe et coll., 1999 ; Kyle et Burke, 1984*). Ainsi, une surcharge de 15 kg se traduit par une augmentation de R_r de 14 %. Le coefficient de roulement peut varier de 0,0015 à 0,017 selon le

pneumatique utilisé et la pression de gonflage (*Kyle et Burke, 1984*), et une diminution de la pression de gonflage de 12 bars à 6 bars se traduit par une variation de R_r de 24 % (*Kyle et Burke, 1984 ; Grappe et coll., 1999*). Cependant, des différences de pression de gonflage allant de 552 à 965 kPa sont trop faibles pour induire des différences significatives du $\dot{V} O_2$ relatif au poids total (*Ryschon et Stray-Gundersen, 1993*).

Les résistances de friction internes liées aux frottements des différents mécanismes de la bicyclette concernent essentiellement le système de transmission de la puissance et le système de changement de développement pour une perte maximale estimée à 3 à 5 % de la puissance délivrée (*Kyle et Caiozzo, 1981*).

1.4.2.2. Force gravitationnelle

La principale force non-aérodynamique exercée sur un sujet en déplacement est la force gravitationnelle. Cette force est définie par Newton en 1687 par l'équation 15 :

$$F_G = m \cdot (m' \cdot G / d^2)$$

(15)

Où m' est la masse de la Terre (égale à $5,98 \times 10^{24}$ kg), m est la masse du mobile considéré (exprimée en kg), d est le rayon de la terre ($d = 6378000$ m) et G est la constante gravitationnelle (environ égale à $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$). La force gravitationnelle est donc proportionnelle à la masse du sujet et inversement proportionnelle au rayon de la Terre. Connaissant m' , d et G , l'équation de F_G devient (*équation 16*):

$$FG = 9,8052 \cdot m$$

(16)

Où 9,8052 correspond à l'accélération gravitationnelle g , dépendante de la situation du sujet par rapport à la Terre, et arrondie à $9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

Sur un terrain plat, la force gravitationnelle ne semble pas jouer un rôle prépondérant sur le CE en cyclisme. En effet, les résistances aérodynamiques s'opposant au déplacement du sujet sont proportionnelles à sa masse élevée au cube. Cependant, les bénéfices aérodynamiques dont bénéficient les cyclistes les plus légers sont compromis d'une part, par la moindre puissance mécanique qu'ils sont capables de maintenir, et d'autre part, par la plus grande masse additionnelle relative que représente leur bicyclette (*Swain, 1994*). Ceci permet notamment d'expliquer le succès rencontré par les cyclistes de grands gabarits dans les épreuves de contre la montre (clm) sur terrain plat. Dans ce cadre, de fortes corrélations négatives ont été mises en évidence entre la performance de cyclistes et le ratio puissance maximale aérobie (PMA) / masse corporelle élevée à la puissance 0,32 ou 0,31 (*Padilla et coll., 1999 ; Swain, 1994*).

Lorsqu'un sujet se déplace sur un terrain en pente, la force gravitationnelle qui s'exerce sur son corps nécessite la production d'un travail mécanique supplémentaire dépendant de l'importance de l'inclinaison du terrain et de la masse du corps en déplacement (*i.e.* m^* : la masse de l'ensemble cycliste - bicyclette exprimée en kg) et qui peut être estimée à partir de l'équation (17) suivante (*di Prampero, 2000*):

$$Wg = m^* \cdot g \cdot h$$

(17)

Où Wg est le travail mécanique (exprimé en Newton), h est le déplacement vertical (exprimé en m).

Or, sachant que h est égal au produit de la distance parcourue (d) par le sinus de l'angle du terrain par rapport à l'horizontale ($\sin\alpha$), le travail mécanique fourni par le sujet par unité de distance peut être décrit par l'équation 18 :

$$Wg = m^* \cdot g \cdot h \cdot d^{-1} = m^* \cdot g \cdot d \cdot \sin \alpha \cdot d^{-1} = m^* \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (18)$$

L'inclinaison de la pente est classiquement exprimée en pourcentage (*i.e.* $\tan \alpha \times 100$). D'après cette équation, il apparaît que le poids de l'ensemble sujet-bicyclette est le principal facteur limitant la performance lorsque d'importantes dénivellations caractérisent le parcours. Ceci permet d'expliquer que, contrairement aux épreuves réalisées sur terrain plat, les cyclistes de petits gabarits ont un avantage non négligeable lors des épreuves de montagne (*Padilla et coll., 1999*). Une étude comparant un exercice de cyclisme réalisé sur terrain plat ou sur une côte de pente égale à + 5,3 % a montré que les résistances totales s'opposant au déplacement du sujet étaient doublées en côte (28,3 N vs. 56,8 N) et que la part des résistances pour lutter contre la gravité passait de moins de 20 % des résistances totales sur la plat à environ 80 % des résistances totales en côte (*Millet et coll., 2002*).

1.4.2.3. Vitesse de déplacement

Une relation curvilinéaire entre le CE du cyclisme et la vitesse de déplacement est classiquement décrite dans la littérature (*figure 4, McCole et coll., 1990 ; Pugh, 1974 ; Swain et coll., 1997*)

$$VO_2 \text{ (L.min}^{-1}\text{)}$$

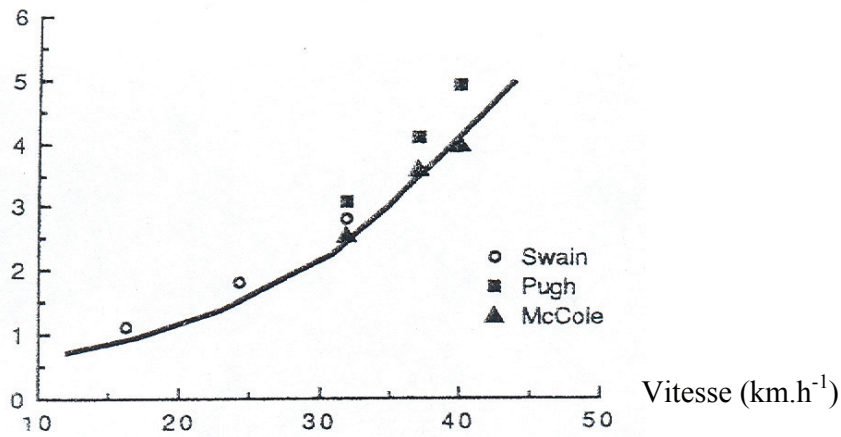


FIGURE 4. Relation $\dot{V} O_2$ – Vitesse élaborée à partir de trois études. Pugh (1974) a mesuré chez 6 cyclistes à 32 et 37 km.h⁻¹. Les données de Swain et coll. (1987) sont présentées pour des vitesses de 16 à 32 km.h⁻¹, et celle de McCole et coll. (1990) concernent 28 cyclistes roulant à des vitesses comprises entre 32 et 40 km.h⁻¹ (d'après McCole et coll., 1990).

Ainsi, le CE du cyclisme varie de manière linéaire selon le carré de la vitesse de déplacement. Plusieurs équations ont été élaborées afin de prédire CE en fonction de la vitesse, comme celle (Figure 5) proposée par Capelli et coll. (1993) pour des sujets utilisant un cadre de bicyclette standard (équation 19) ou aérodynamique (équation 20):

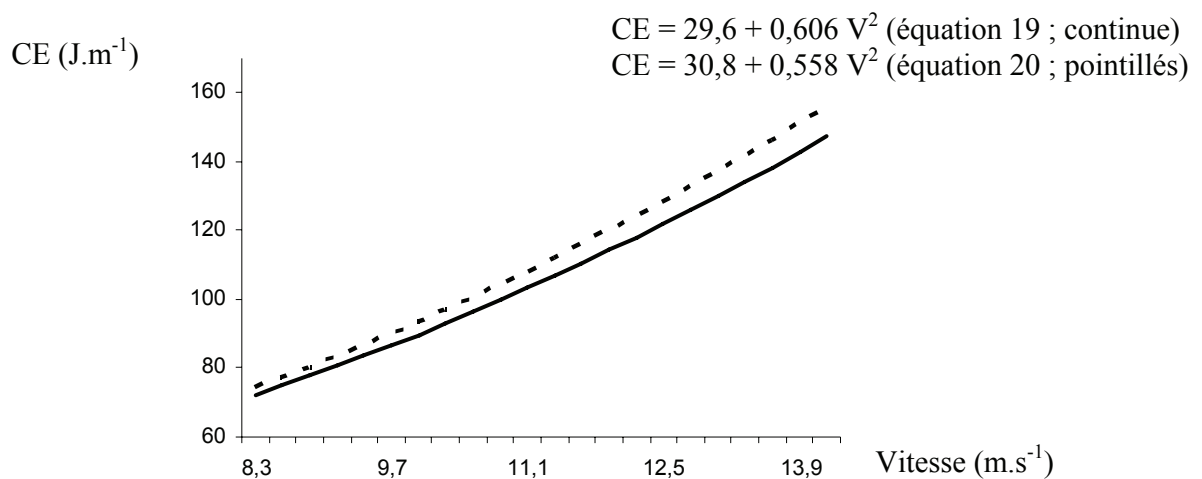


FIGURE 5. Coût énergétique du cyclisme en fonction de la vitesse sur un cadre de bicyclette classique (équation 19), et sur un cadre aérodynamique (équation 20).

Où v est la vitesse de déplacement (exprimée en m.s⁻¹) et CE est exprimé en J.m⁻¹. Dans ce cadre, l'utilisation de la configuration aérodynamique permet une diminution de 5 % du CE à 45 km.h⁻¹ (i.e. 12,5 m.s⁻¹; Capelli et coll., 1993).

1.4.2.4.. Position corporelle

Parallèlement aux effets de la position corporelle du sujet sur les résistances aérodynamiques précédemment évoqués, il semble que celle-ci puisse également avoir des influences au niveau des paramètres physiologiques.

Ainsi, en situation aérobie (Nordeen-Snyder, 1977) ou en situation anaérobie (Hamley et Thomas, 1967), la modification de la hauteur de selle par rapport à la valeur optimale peut entraîner une diminution de la puissance de sortie de l'ordre de 5 à 8 %. D'autre part, Heil et coll. (1995) ont comparé l'influence de différentes positions des sujets sur la bicyclette (angle de tube de selle par rapport à l'axe du pédalier de 69°, 76°, 83° et 90°, *figure 6*) sur les réponses physiologiques lors d'un exercice de 10 min réalisé à une intensité de 73 % de $\dot{V} O_{2max}$ et à une cadence de 90 rotations par minute (RPM). Ils ont observés des valeurs de $\dot{V} O_2$ et de FC significativement supérieures pour un angle de 69°, par rapport à des angles de 83° et 90° (entre 69° et 83° : +2,5 % et + 2,2 % pour $\dot{V} O_2$ et FC respectivement), et des valeurs de $\dot{V} E$ significativement supérieures (+ 4,5 %) pour un angle de 69° par rapport à un angle de 83°. Ces résultats, confirmés par l'étude de Heil et coll. (1997), indiquent que des angles de tube de selle supérieurs à 69° semblent préférables afin de diminuer la dépense énergétique en cyclisme. De plus, une analyse cinématique a montré que les angles supérieurs permettaient une plus grande extension de la hanche et une plus grande flexion plantaire lors du cycle de pédalage ainsi qu'une meilleure orientation des membres inférieurs par rapport à l'axe des manivelles (Heil et coll., 1995).

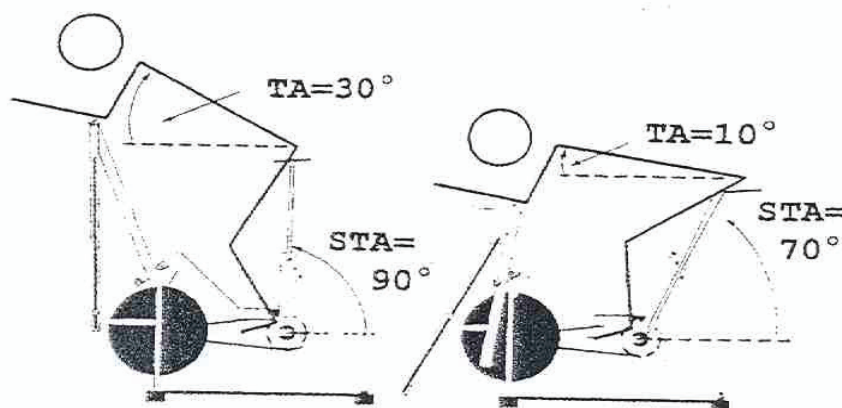


FIGURE 6. Représentation schématique d'une modification de l'angle du tube de selle de 70° à 90° ; TA : trunc angle, STA : seat-tube angle (d'après Heil et coll., 1997)

Dans ce cadre, l'étude de Grappe et coll. (1998) consiste à réaliser 10 min de pédalage à 70 % de $\dot{V}O_{2max}$, en modifiant la position des mains sur le cintre (*i.e.* UP, DP, et AP). Le $\dot{V}E$, le QR, le débit inspiratoire et la concentration de lactate sanguin sont significativement supérieurs lorsque le cycliste pose ses mains dans le creux du cintre (position DP) par rapport à la position UP qui offre une plus grande projection frontale. Grappe et coll. (1998) suggèrent que les changements d'angles de hanche pourraient altérer l'alignement et la géométrie du système respiratoire supérieur, et expliquer les résultats de Heil et coll. (1995). Cependant, les modifications de l'angle du tube de selle induisent aussi d'autres modifications au niveau de la flexion plantaire de la cheville et de la position du pied par rapport à l'axe de la pédale, pouvant influencer, dans un contexte de performance, l'application de la force sur les pédales (Ericson et coll., 1986).

Le cas particulier de la position "en danseuse" a été évoqué dans deux études (Ryschon et Stray-Gundersen, 1991 ; Millet et coll., 2002). L'étude de Ryschon et Stray-Gundersen (1991) compare l'influence de quatre positions de pédalage (3 positions assises variant la prise du cintre et une position "en danseuse") sur le $\dot{V}O_2$ à une vitesse de 19,3 km.h⁻¹ (environ 60 % de $\dot{V}O_{2max}$) avec une pente de 4 %, et montre un $\dot{V}O_2$ significativement supérieur lors de l'exercice réalisé "en danseuse" par rapport aux autres positions ($31,7 \pm 0,4$ vs. $28,3 \pm 0,7$ mL.min⁻¹.kg⁻¹). A 75 %

de la puissance maximale aérobie, le $\dot{V}E$, et la FC sont significativement supérieurs lors de l'ascension "en danseuse" d'une pente de 5,3 % pendant 6 min comparativement au même exercice réalisé assis (*Millet et coll., 2002*). Les auteurs suggèrent qu'à intensité modérée (inférieure à 70 % de $\dot{V}O_{2max}$), la position "en danseuse" impose un travail mécanique supplémentaire de la partie supérieure du corps, qui se traduit par une augmentation significative du $\dot{V}O_2$. Aux intensités supérieures à 70 % de $\dot{V}O_{2max}$, les forces appliquées par les bras sur le cintre en position assise augmentent de 2 à 3 fois et expliquent l'absence de différence de consommation d'oxygène observée par Millet et coll. (2002).

1.4.2.5. Forces d'inertie

Les forces d'inertie en cyclisme retardent l'accélération et la décélération. Sur des périodes de quelques secondes, un cycliste de bon niveau, peut développer entre un et deux chevaux de puissance hp (1 hp = 745 Watts). Un cheval de puissance suffit pour faire passer un ensemble cycliste-bicyclette d'une masse de 86 kg, de 0 à 40 km.h⁻¹ en 9 secondes sur un terrain plat. L'ajout d'un kilogramme, demande un dixième de seconde de plus pour la même accélération (*Kyle et Caiozzo, 1981*). Cependant, aucune étude n'a, à ce jour, quantifié le coût énergétique supplémentaire que représente ce délai.

1.4.2.6. Caractéristiques du pédalage

1.4.2.6.1. Cadence de pédalage

L'influence de la cadence de pédalage sur le CE du cyclisme a fait l'objet de nombreuses expérimentations. Le geste de pédalage est un mouvement circulaire au cours duquel les membres inférieurs interviennent en opposition de phase. Un cycle de pédalage peut être décomposé en deux phases : d'une part, une phase de propulsion couvrant le secteur angulaire qui s'étend du point mort haut (*i.e. top dead centre*) au point mort bas (*i.e. bottom dead centre*) c'est à dire de 0°

à 180°, et d'autre part, une phase de traction correspondant au trajet du point mort bas au point mort haut (*i.e.* de 180° à 360°). Le déplacement du sujet et de la bicyclette est créé par l'application d'un moment de force (exprimé en N.m), défini comme le produit de la force appliquée sur la pédale par la longueur de manivelle (*Coyle et coll., 1991*). L'analyse des forces appliquées sur les pédales au cours du cycle montre que celle-ci atteignent des valeurs maximales entre 90 et 110° (*figure 7; Faria, 1992*). Par ailleurs, la figure 10 illustre l'activité de plusieurs muscles des membres inférieurs en fonction du secteur angulaire. Il apparaît que les muscles du quadriceps sont fortement impliqués lors de la phase de propulsion. En effet, le *rectus femoris* (RF), participant à la flexion de la hanche et à l'extension du genou, montre une activité importante entre 300° et 70°, tandis que les *vastus lateralis* (VL) et *vastus medialis* (VM), muscles extenseurs du genou sont principalement sollicités entre 315° et 120°. Le *gluteus maximus* (GM), muscle extenseur de la hanche participe également à la propulsion entre 350° et 120°. La phase de traction implique majoritairement le groupe musculaire *ischio-crurala* comprenant le *biceps femoris* (BF), le *semimembranosus* (SB) et le *semitendinosus* (ST), muscles extenseurs de la hanche et fléchisseur du genou. En particulier, l'activité du *semimembranosus* et *semitendinosus* est maximale et se situe entre 60° et 240°.

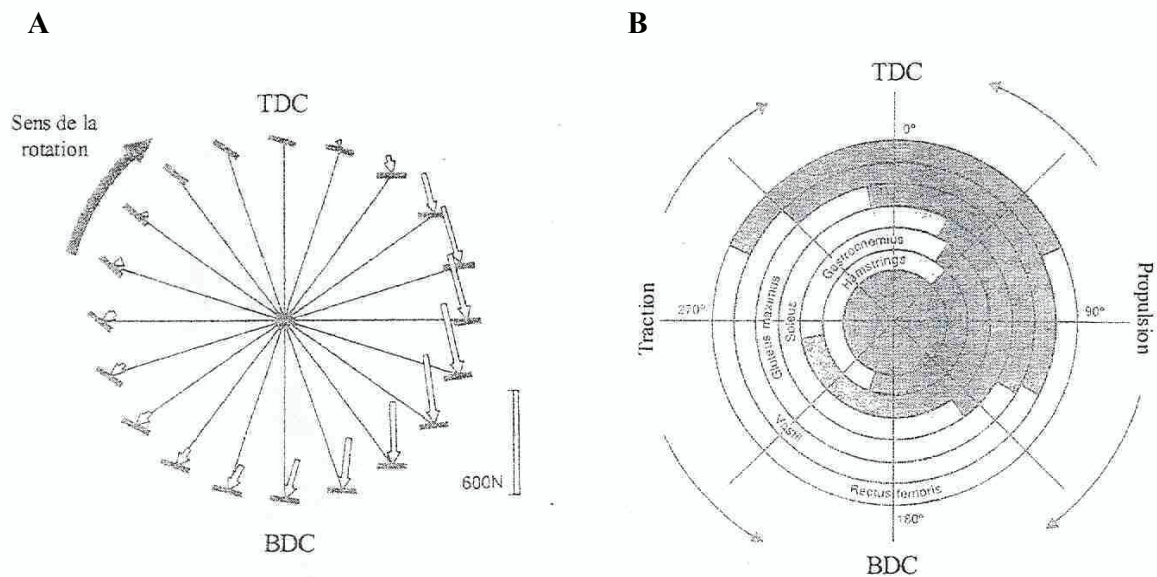


FIGURE 7. Evolution de la force résultante appliquée sur les pédales (A) au cours d'un cycle de pédalage (la longueur de la flèche est proportionnelle à l'intensité de la force) et secteurs angulaires (B) correspondant à la sollicitation de 6 muscles des membres inférieurs (d'après Faria, 1992)

La plupart des auteurs qui ont étudié l'effet de la cadence de pédalage sur la consommation d'oxygène observent une relation de type curvilinéaire entre les deux paramètres pour une puissance donnée (Banister et Jackson, 1967 ; Marsh et Martin, 1993 ; Takaishi et coll., 1996 ; Vercruyssen et coll., 2001). Un exemple de ce type de relation est présenté figure 10. Ainsi un optimum énergétique théorique (CEO, cadence correspondant à la valeur minimale de $\dot{V}O_2$) identifié par la relation curvilinéaire est généralement mis en évidence entre 50 et 80 RPM quel que soit le niveau d'entraînement ou d'expertise des sujets en cyclisme (Coast et Welch, 1985 ; Marsh et Martin, 1993 ; Takaishi et coll., 1996 ; Vercruyssen et coll., 2002).

Ces valeurs sont très inférieures aux cadences spontanément adoptées par ces sujets (CL pour Cadence Libre, variant entre 80 et 110 RPM ; Marsh et Martin, 1993 ; Marsh et Martin, 1997 ; Lepers et coll., 2001 ; Vercruyssen et coll., 2002). Ce décalage entre les valeurs de CEO et CL peut s'expliquer par un certain nombre d'observations.

Coût énergétique ($\text{mL O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)

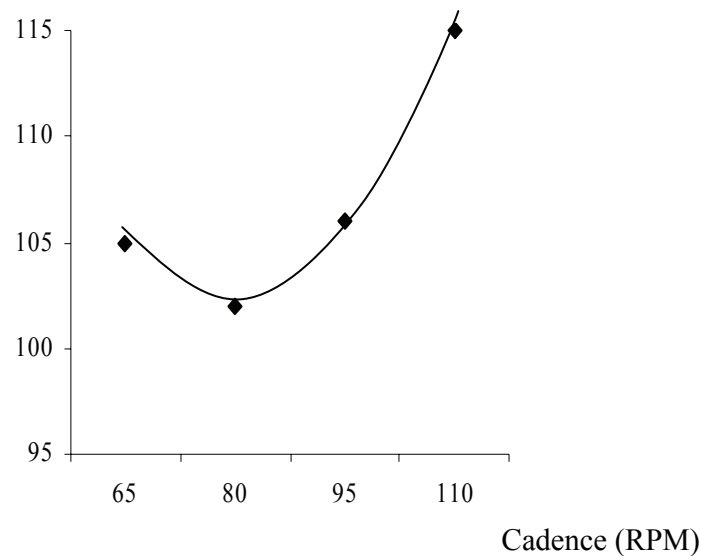


FIGURE 8. *Variation du coût énergétique (C) en fonction de la cadence de pédalage (CL : cadence spontanément adoptée par les sujets (d'après Vercruyssen et coll., 2001).*

Tout d'abord, il semble que les valeurs de CEO varient selon un certain nombre de paramètres dont les principaux sont la puissance développée et la durée de l'exercice. Plusieurs auteurs ont observé une augmentation de la CEO avec la puissance des sujets chez différents types de populations (*Banister et Jackson, 1967 ; Böning et coll., 1984 ; Coast et Welch, 1985 ; Seabury et coll., 1977*). Ainsi, Seabury et coll. (1977) ont montré que la CEO de sujets non cyclistes variait de 42 à 60 RPM lorsqu'une incrémentation progressive de la puissance de 40 à 327 W était réalisée. Coast et Welch (1985) ont observé le même phénomène chez des cyclistes, mettant en évidence une augmentation linéaire de CEO avec l'élévation de puissance (de 50 à 78 RPM pour des puissances variant de 100 à 300 W). Par ailleurs, les valeurs de CEO et CL semblent se modifier avec le développement de la fatigue liée à la durée de l'exercice. Brisswalter et coll. (2000) ont rapporté une augmentation de CEO de 70 à 86 RPM lors d'un exercice de 30 min réalisé à 80 % de PMA, tandis qu'aucune variation significative de CL n'a été mise en évidence durant cette période (valeur moyenne de 83 RPM). Pour des exercices plus longs (*i.e.* 1 ou 2 heures), plusieurs auteurs ont mis en évidence une diminution de CL au cours de l'effort pour atteindre des valeurs proches de CEO (*Lepers et coll., 2000 ; Vercruyssen et coll., 2001*).

L'observation des cadences de pédalage élevées spontanément adoptées par les sujets suggère que des critères indépendants de la minimisation de la dépense énergétique déterminent l'adoption d'une cadence de pédalage particulière. Une première hypothèse relie l'adoption d'une cadence de pédalage élevée à la diminution de la force résultante appliquée sur les manivelles lors de chaque contraction musculaire (*Patterson et Moreno, 1990 ; Takaishi et coll., 199 ; Takaishi et coll., 1996 ; Takaishi et coll., 1998*), qui se traduit par une minimisation de la fatigue neuromusculaire. Cette fatigue musculaire est caractérisée par la pente de l'électromyogramme intégré (EMGi). Dans ce cadre, Takaishi et coll. (1998) ont montré que la cadence préférée de cyclistes coïncidait avec l'optimum neuromusculaire (cadence à laquelle la valeur de l'EMG intégré est minimale) et était supérieure à la cadence correspondant à l'optimum énergétique. Par ailleurs, Neptune et Hull (1999) ont analysé l'influence de la cadence de pédalage sur neuf indices dérivés des courbes d'activation (EMG) et de force de 14 muscles des membres inférieurs lors d'un exercice de 5 min à une puissance de 265 W. Ces différents indices étaient les valeurs moyennes et maximales d'activation, de forces, de stress (défini comme le rapport entre la force et la section du muscle) et d'endurance musculaire (définie comme le rapport entre la force et la section du muscle élevée au carré) ainsi que la valeur intégrée de l'activation musculaire. Ces auteurs ont mis en évidence une valeur minimale de ces différents indices pour une cadence de 90 RPM, par comparaison avec des cadences de 75 RPM ou 105 RPM. Une deuxième hypothèse concerne le niveau d'entraînement des sujets. En effet, il apparaît que des sujets non cyclistes mais entraînés en course à pied adoptent spontanément des cadences de pédalage identiques aux cyclistes entraînés (supérieures à 90 RPM ; *Marsh et Martin, 1993 ; Marsh et Martin, 1997*). Il semble que le niveau élevé d'aptitude aérobie de ces sujets (généralement objectivé par des valeurs élevées de $\dot{V} O_{2max}$) ainsi que les caractéristiques de leur entraînement proches de celle des cyclistes (*i.e.* répétition d'exercices à haute fréquence de mouvement associées à des vitesses articulaires importantes) soient deux critères importants déterminant le choix d'une cadence de pédalage élevée (*Marsh et Martin, 1993 ; Marsh et Martin, 1997*). Enfin, une troisième hypothèse relative à des modifications de type hémodynamique peut-être évoquée. Takaishi et coll. (1996)

ont suggéré que l'adoption de cadences de pédalage élevées présente l'avantage d'améliorer la perfusion musculaire. Dans ce contexte, les travaux de Gottshall et coll. (1996) ont montré que l'augmentation de la cadence de pédalage de 70 à 110 RPM lors d'un exercice réalisé à une puissance de 200 W se traduisait par une élévation du débit cardiaque et une diminution des résistances vasculaires systémiques déterminées par le rapport entre la pression artérielle moyenne et le débit cardiaque.

1.4.2.6.2. Paramètres biomécaniques du pédalage

Lors du pédalage, la répartition des forces exercées sur les pédales change de direction et d'intensité au cours de chaque révolution et les membres inférieurs travaillent en opposition de phase. La locomotion en cyclisme est assurée par l'application d'un moment de force correspondant au produit de la force appliquée sur la pédale par la longueur de la manivelle et exprimé en $N.m^{-1}$ (Coyle et coll., 1991). Le pédalage est caractérisé d'une part par l'ordre et le niveau d'activation des différents muscles impliqués et d'autre part, par la cadence d'exécution de ce patron locomoteur. La définition d'un patron de locomotion optimal sous entend que ce paramètre combiné aux modifications de cadence, est susceptible d'influencer le coût énergétique du cyclisme.

Les modifications électromyographiques (EMG) liées à l'augmentation de cadence montrent l'importance des muscles impliqués, plus particulièrement au moment du passage entre le mouvement de flexion et d'extension. L'augmentation importante de l'activité EMG du *gastrocnemius* (GAS), particulièrement du *biceps femoris* et des *hamstrings* (HAM : *medial hamstrings* et *biceps femoris long*), illustre cette sensibilité à la cadence (Neptune et coll., 1997). L'activité EMG des *tibialis anterior* (TA) et du *rectus femoris* autour du point mort haut (TDC : *Top Dead Centre*) n'augmente pas avec la cadence. L'extension du RF diminue avec la cadence probablement en raison de la diminution concomitante de la charge. Différentes études concernant le *soleus* (SOL ; Marsh et Martin, 1995 ; Raasch et coll., 1997 ; Ericson et coll., 1985) aboutissent à deux idées : l'activité du SOL dans la phase d'extension décroît avec l'augmentation

de cadence, alors que l'activité autour du point mort bas (*BDC : Bottom Dead Center*) augmente avec la cadence. Concernant le déclenchement de l'activité des muscles impliqués, à la différence des muscles de la cheville (*i.e.* GAS et SOL), les BF, GM, RF, SM, VL montrent des avances de phase similaires, allant de 10° à 40° quand la cadence augmente de 45 à 120 RPM respectivement (*Neptune et coll., 1997*). Sachant que le coût énergétique de la locomotion reflète la demande biomécanique associée aux modifications du patron locomoteur, ces modifications de schéma moteur liées à la cadence sont susceptibles, via un recrutement musculaire différent, d'engendrer une augmentation du CE.

1.4.2.6.3. Longueur de manivelle

La locomotion en cyclisme est aussi dépendante de la longueur des manivelles et quelques études se sont intéressées à l'influence de ce paramètre sur la performance en cyclisme (*Inbar et coll., 1983 ; Martin et Spirduso, 2001*). Les longueurs de manivelles optimales (164-166 mm) déterminées par Inbar et coll. (1983) lors de tests de Wingate, sont très légèrement inférieures aux longueurs couramment utilisées en cyclisme (170-175 mm). Mais des variations de l'ordre de 5 mm n'entraînent qu'une variation de puissance de sortie d'environ 1 % chez des sujets non cyclistes. Inbar et coll. (1983) suggèrent une dépendance entre la longueur optimale des manivelles et la longueur de la jambe. Dans ce contexte, Martin et Spirduso (2001) ont montré que la puissance développée par 16 cyclistes équipés avec des manivelles de 145 et 170 mm est significativement plus importante que la puissance développée avec des manivelles de 120 et 220 mm. Ces auteurs déterminent une longueur optimale de manivelle égale à 20 % de la longueur de la jambe et 41 % de la longueur du tibia.

1.4.2.7. Stratégie d'allure

La stratégie d'allure ou "*pacing*" est définie comme la régulation consciente ou subconsciente du travail produit selon un plan prédéterminé dans le but d'optimiser la performance sans entraîner de dommages irréversibles du système physiologique (*Ansley et coll., 2004*). Peu d'études se sont intéressées au *pacing* et à ses effets sur la performance ou sur le coût de l'effort en cyclisme. Foster et coll. (1993) ont étudié l'effet de cinq stratégies d'allure de départ sur la performance lors d'un effort de 2 km réalisé sur un ergocycle. La meilleure performance chronométrique ($2,77 \pm 0,18$ min) était réalisée lors de la stratégie la plus régulière ("*even start strategy*") avec un gain de 7,2 sec qui représente une différence de 4,3%. Selon De Koning et coll. (1999), une course à allure régulière est bénéfique lors de performances chronométriques réalisées en poursuite sur 1000 m et 4000 m. Des études se sont aussi penchées sur l'influence du *pacing* sur la performance lors d'épreuves d'endurance (*Swain, 1997 ; Palmer et coll., 1997 ; Palmer et coll., 1999 ; Liedl et coll., 1999 ; Atkinson et Brunskill, 2000*). Celles de Swain (1997) et de Atkinson et Brunskill (2000) concernent les stratégies en situation de parcours ventés ou vallonnés. Swain (1997) montrent que lors d'un clm de 10 km, la variation de vitesse sur un parcours plat abrité aboutit à un temps final plus important. Les résultats de l'étude de Atkinson et Brunskill (2000) simulant un clm de 16,1 km avec et sans vent (8,05 km vent "de face" et 8,05 km vent "de dos") sont conformes à ceux de Swain (1997). Pour une même puissance d'effort, la performance est meilleure lorsque la première moitié du parcours est réalisée à une puissance 5 % supérieure à la puissance moyenne du clm à allure libre, et la seconde moitié à une puissance 5 % plus faible. Swain (1997) conclue que les cyclistes ont un intérêt à choisir une puissance constante quand les conditions extérieures le sont, et une puissance variable en conditions externes variables. Une augmentation du $\dot{V}O_2$ de 15 % dans les parties difficiles n'est pas possible pour des cyclistes élites soutenant 1 h d'effort à 90 % de $\dot{V}O_{2max}$ mais une augmentation de 5 % suffit à réaliser un gain de temps significatif (*Swain, 1997*). Ces résultats illustrent ceux de Kyle (1988), qui avait été le premier à démontrer mathématiquement que la perte de temps dans les parties défavorables d'un parcours vallonné ou venté est supérieure au gain de temps récupéré dans les

parties favorables. Les résultats de ces travaux font donc apparaître une absence de différence globale pour les paramètres physiologiques quelle que soit la stratégie choisie, mais un intérêt à choisir la stratégie consistant à minimiser les variations de vitesse, dans le but d'optimiser la performance chronométrique.

2. Adaptation physiologique au cours d'enchaînements d'exercices : influence des caractéristiques de l'exercice préalable

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'influence des caractéristiques d'un exercice préalable sur la réalisation d'un exercice suivant. Dans ce contexte, les principaux paramètres étudiés sont la performance (*i.e.* puissance maximale ou moyenne soutenue, temps de maintien d'une certaine puissance), la lactatémie et la consommation d'oxygène ($\dot{V} O_2$). Ces différents paramètres vont être envisagés successivement.

2.1. Effet d'un exercice préalable sur la performance au cours d'enchaînements d'exercices

L'influence d'un exercice préalable sur la performance lors d'un exercice subséquent de cyclisme de courte durée semble dépendre en grande partie de la durée et de l'intensité de cet exercice préalable. En effet, l'augmentation de la durée d'une épreuve préalable de cyclisme réalisée à une intensité de 98 % de $\dot{V} O_{2max}$ se traduit par une diminution de la puissance maximale (Pmax) développée lors d'un exercice subséquent de cyclisme (diminution de 70 % par rapport à la condition contrôle pour des durées d'exercice préalable de 3 à 6 min ; *Sargeant et Dolan, 1987*). Dans la même expérimentation, il a été montré que la variation de l'intensité de l'exercice préalable réalisé pendant une durée fixe de 6 min pouvait avoir des effets contradictoires sur la Pmax développée lors de l'exercice suivant. Pmax était améliorée d'environ 12 % lorsque l'intensité de l'exercice préalable était inférieure à 60 % de $\dot{V} O_{2max}$, tandis qu'une diminution de Pmax était observée pour des intensités supérieures à 60 % de $\dot{V} O_{2max}$, cette

diminution atteignant 35 % pour une intensité égale à $\dot{V} O_{2\max}$ (Sargeant et Dolan, 1987). Par ailleurs, Palmer et coll. (1997) ont mis en évidence qu'un exercice préalable de 150 min de cyclisme réalisé à une puissance variable ($58 \% \pm 12,2 \%$ de PMA) entraînait une altération de la performance (+ 1 min 36 s ; - 89 Watts) lors d'une épreuve subséquente de 20 km de cyclisme comparativement au même exercice préalable réalisé à une puissance constante (58 % de PMA ; Palmer et coll., 1997).

2.2. Effet d'un exercice préalable sur la lactatémie au cours d'enchaînements d'exercices

Rieu et al. (1988) ont étudié l'évolution de la lactatémie lors de l'enchaînement de quatre sprints de 45 s en course à pied séparés par 9 min de récupération. Ils ont observé d'une part, que la lactatémie augmentait progressivement au fil des répétitions, et d'autre part, que son accumulation (delta lactate) diminuait au cours des quatre sprints. Deux hypothèses peuvent être avancées afin d'expliquer cette diminution de delta lactate au cours de ces exercices. D'une part, une partie du lactate produit lors du premier sprint a pu être utilisée comme source d'énergie au cours des sprints suivants. D'autre part, le volume de diffusion du lactate des muscles vers le sang a pu être augmenté. Cependant, la contribution relative de ces deux processus n'a pas été clairement établie. Les résultats de Rieu et coll. (1988) ont été confirmés pour d'autres types d'exercices. En particulier, Bogdanis et coll. (1994) ont étudié l'évolution de la lactatémie lors de l'enchaînement d'un exercice de 5 min de pédalage des bras à une intensité représentant 30 % de la puissance moyenne soutenue au cours d'un sprint de 30 s, suivi de deux sprints de 30 s de cyclisme réalisés contre une résistance de 75 g.kg^{-1} de poids corporel, séparés par 6 min de récupération passive. Le pédalage préalable des bras se traduit par une augmentation de la lactatémie immédiatement après l'exercice, et par une diminution de l'accumulation de lactate de 50 % au cours des deux sprints de cyclisme suivants, par rapport à un enchaînement de ces deux sprints sans exercice préalable. Ces auteurs suggèrent que la moindre accumulation de lactate au

cours des deux sprints de cyclisme serait liée soit à une diminution du flux de lactate des muscles vers le sang, soit à une inhibition de la glycolyse par les ions H^+ libérés lors du premier sprint.

2.3. Effet d'un exercice préalable sur la consommation d'oxygène au cours d'enchaînements d'exercices

L'évolution de la consommation d'oxygène au cours d'enchaînements d'exercices a été largement étudiée dans la littérature. La plupart des travaux dans ce domaine se sont penchés sur l'influence d'un exercice préalable sur la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours d'un exercice subséquent. Il ressort que la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours d'un exercice dépend essentiellement de deux paramètres : d'une part, l'intensité relative des exercices et d'autre part, la masse musculaire recrutée lors de l'exercice préalable. Ces deux facteurs vont être envisagés successivement dans les paragraphes suivants.

2.3.1. Effet de l'intensité relative de l'exercice

Les premiers travaux qui ont permis de caractériser l'influence d'un exercice préalable sur l'adaptation physiologique au début d'un exercice suivant ont été réalisés par Gausche et coll. (1989) et Gerbino et coll. (1996). Dans ces études, aucune modélisation de la cinétique de $\dot{V}O_2$ n'a été réalisée, essentiellement pour des raisons méthodologiques (variabilité du signal cycle à cycle trop important, et impossibilité de discerner un état stable ou une asymptote pour les principaux paramètres physiologiques mesurés ; *Lamarra et coll., 1987*). Gausche et coll. (1989) ont néanmoins montré que la cinétique de $\dot{V}O_2$ lors d'un exercice d'intensité supérieure au seuil anaérobie était accélérée lorsqu'il était précédé d'un exercice de même intensité, par comparaison avec un exercice réalisé de manière isolée. Par la suite, Gerbino et coll. (1996) ont étudié l'influence de quatre combinaisons d'enchaînements d'exercices de 6 min réalisés à différentes intensités : 1) modérée - modérée (*i.e.* intensité inférieure au seuil lactique), 2) élevée - élevée (*i.e.*

intensité égale à 50 % de la différence entre le seuil lactique et $\dot{V} O_{2\max}$, delta 50 noté $\Delta 50$), 3) élevée - modérée, 4) modérée - élevée. Ces auteurs ont montré d'une part que la cinétique de $\dot{V} O_2$ lors d'un exercice d'intensité modérée n'était pas affectée par l'exercice préalable (combinaison 1 et 3), et d'autre part que la cinétique de $\dot{V} O_2$ lors d'un exercice d'intensité élevée était significativement modifiée uniquement à la suite d'un exercice de même intensité (combinaison 2). Dans ce dernier cas, une accélération de la cinétique de $\dot{V} O_2$ était observée lors du deuxième exercice comparativement au premier (*Gerbino et coll., 1996*). Les auteurs émettent l'hypothèse selon laquelle l'accélération de la cinétique de $\dot{V} O_2$ au cours de l'enchaînement d'exercices réalisés à intensité élevée pouvait être expliquée par une augmentation de la perfusion des muscles actifs au début du second exercice consécutive à l'acidose métabolique induite par le premier exercice. En outre, les travaux de Gausche et coll. (1989) et de Gerbino et coll. (1996) ont permis de mettre en évidence que les cinétiques de $\dot{V} O_2$ lors d'exercices réalisés à intensité modérée et élevée sont contrôlées par deux mécanismes distincts.

2.3.2. Effet de la masse musculaire recrutée lors de l'exercice préalable

A notre connaissance, seuls les travaux de Bonhert et coll. (1998) ont étudié l'influence de la masse musculaire recrutée lors de l'exercice préalable sur la cinétique de $\dot{V} O_2$ lors d'un exercice suivant. Ces auteurs ont comparé la cinétique de $\dot{V} O_2$ au cours d'un exercice de 6 min de cyclisme réalisé à intensité élevée lorsqu'il était précédé soit par un exercice de 6 min de cyclisme réalisé à la même intensité (enchaînement Jambes - Jambes, J-J), soit par un exercice de 6 min de pédalage des bras impliquant le même degré d'acidose métabolique (enchaînement Bras - Jambes, B-J). Ils ont mis en évidence que la cinétique de $\dot{V} O_2$ lors du deuxième exercice était caractérisée par une diminution de l'amplitude de la composante lente, cette diminution étant plus importante lors de l'enchaînement J-J par rapport à l'enchaînement B-J. Bohnert et coll. (1998) émettent l'hypothèse selon laquelle un mécanisme relatif à la sollicitation préalable des unités motrices

spécifiquement impliquées en cyclisme exerce l'effet principal sur la cinétique de $\dot{V}O_2$ lors de l'exercice suivant.

CHAPITRE 2

VARIATIONS DE L'ÉPREUVE CYCLISTE :

Effet sur la course à pied réalisée en enchaînement

1. Effet d'un exercice préalable de cyclisme sur les paramètres physiologiques et la performance en course à pied

De nombreuses études se sont intéressées aux altérations physiologiques et biomécaniques liées à l'enchaînement d'un exercice de cyclisme et de course à pied. En général, ces différentes altérations ont été mises en évidence en comparant une épreuve de course à pied isolée (CàPI) avec une épreuve de course à pied réalisée à la suite d'un exercice de cyclisme, ou avec l'épreuve de course à pied d'un triathlon (CàPT) ou d'un duathlon (CàPD). Dans ce cadre, deux types d'études peuvent être distingués, considérant d'une part, des épreuves de course à pied réalisées à la même vitesse (*Boone et Kreider, 1986 ; Kreider et coll., 1988a ; Hue et coll., 1998 ; Hue et coll., 1999 ; Vercruyssen et coll., 2002*) et d'autres part, des épreuves de courses à pied réalisées à vitesse maximale (*Bernard et coll., 2003 ; Garside et Doran, 2000 ; Gottschall et Palmer, 2002 ; Hausswirth et coll., 1999, 2001*).

Le premier type d'études montre comme résultat principal une augmentation du coût énergétique (CE) de CàPT et de CàPD par rapport à celui de CàPI réalisée à la même allure. Les premiers travaux dans ce domaine ont été entrepris par Boone et Kreider (1986), observant une augmentation du CE de 8,7 % lors d'une épreuve de course à pied de 5 min sur tapis roulant à 9,6 km.h⁻¹ lorsqu'elle était précédée d'un exercice de pédalage sur ergocycle (10 min à 80 % de FC_{max}) par rapport à une course à pied isolée (CàPI). Par la suite, les travaux de Kreider et coll. (1988a, 1988b) ont confirmé ces résultats en mettant en évidence une augmentation de $\dot{V} O_2$, de $\dot{V} E$, et de FC d'une part, lors d'un enchaînement cyclisme - course à pied (60 min de cyclisme à 70 % de $\dot{V} O_{2max}$ suivi de 30 min de course à pied à 85 % de $\dot{V} O_2$) par rapport à une course à pied isolée (30 min de course à pied à 85 % de $\dot{V} O_{2max}$), et d'autre part lors de la course à pied d'un triathlon simulé en laboratoire (0,75 km de natation, 75 min de cyclisme, 40 min de course à pied) par rapport à CàPI (40 min à la même allure que CàPT). Des altérations similaires des paramètres physiologiques ont été observées lors des travaux récents étudiant de façon spécifique l'enchaînement cyclisme - course à pied. Ainsi, l'étude de Danner et Plowman (1995), réalisée sur

une population de 13 femmes spécialistes de triathlon et de duathlon, montre une augmentation de l'économie de course à des vitesses comprises entre 10 et 13 km.h⁻¹, après 45 minutes de cyclisme à 70 % de $\dot{V} O_{2max}$. Hue et coll. (1998) ont aussi mis en évidence des valeurs significativement supérieures de $\dot{V} O_{2max}$ (+ 7,0 %), de $\dot{V} E$ (+ 19,0 %), de FC (+ 4,2 %), et de FR (+ 13,9 %) lors d'une épreuve de course à pied de 10 km précédée d'un exercice de 40 km de cyclisme par comparaison avec une épreuve isolée de course à pied réalisée à la même allure. De même, Vercruyssen et coll. (2002) ont observé qu'un exercice de 30 min de cyclisme réalisé à une intensité correspondant au seuil ventilatoire + 5 % (*ventilatory threshold* VT + 5% ; allure adoptée par les triathlètes en compétition ; *O'Toole et Douglas, 1995*) entraînait une augmentation de $\dot{V} O_2$ (+ 11,7 %) et de $\dot{V} E$ (+ 15,7 %) au cours d'une épreuve suivante de 15 min de course à pied à VT + 5 % par rapport à la même épreuve de course à pied réalisée de manière isolée. Cependant, ces différentes études ont été réalisées en laboratoire, ce qui limite l'interprétation concernant les éventuelles modifications liées au contexte réel de l'activité.

Au cours de la dernière décennie, l'utilisation d'appareils télémétriques de mesure des échanges gazeux et respiratoires a permis de caractériser l'adaptation des triathlètes lors d'enchaînements cyclisme - course à pied dans les conditions réelles de pratique (*Guezennec et coll., 1996 ; Hausswirth et coll., 1996*). Ces études, basées sur des comparaisons entre l'épreuve de course à pied d'un triathlon (1,5 km de natation, 40 km de cyclisme, et 10 km de course à pied pour *Guezennec et coll., 1996* ; 30 min de natation 60 min de cyclisme, et 45 min de course à pied pour *Hausswirth et coll., 1996*) et une épreuve de C_àP réalisée à la même vitesse, confirment les résultats précédemment obtenus en laboratoire. En effet, une augmentation du coût énergétique (224 vs. 207 mL O₂ .kg⁻¹.km⁻¹ ; *Hausswirth et coll., 1996*), de $\dot{V} O_2$ (+ 7,1 %), de $\dot{V} E$ (+ 16,2 %) et de FC (+ 3,8 %) ont été mises en évidence par ces auteurs lors de C_àT par rapport à C_àP (*figure 9 ; Guezennec et coll., 1996*).

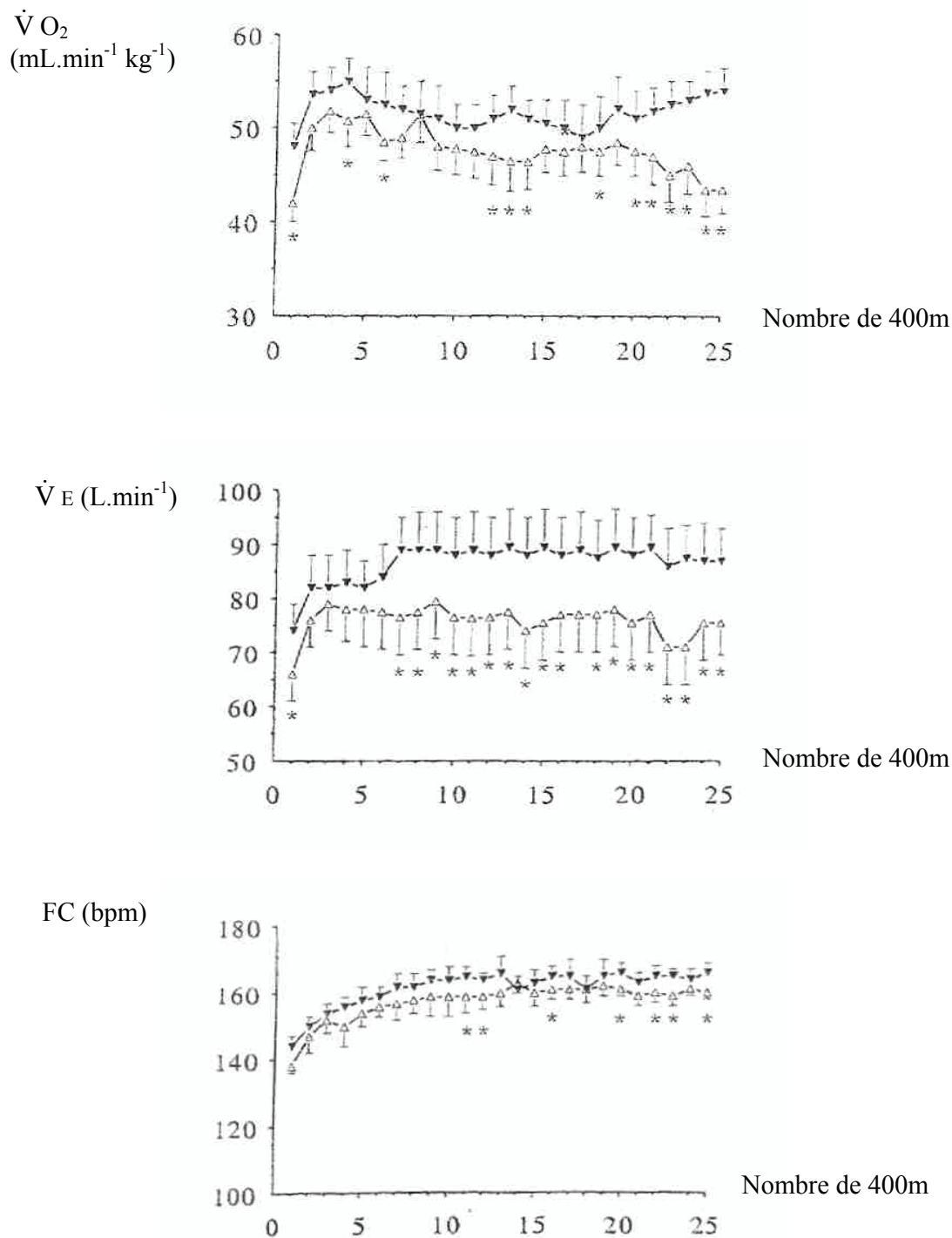


FIGURE 9. Evolutions des $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, et FC au cours des 10 km de course à pied d'un triathlon (symboles noirs) et d'une course contrôlée de 10 km (symboles blancs). Chaque point représente la valeur moyenne obtenue pour chaque tour de 400 m. * : différence significative, $P < 0,05$ (d'après Guézennec et coll., 1996).

D'autres auteurs ont tenté de caractériser les modifications induites lors de l'enchaînement cyclisme - course à pied en considérant des épreuves de course à pied (CàpI, CàpT, CàpD)

réalisées à vitesse maximale (*Bernard et coll., 2003 ; Hausswirth et coll., 1999*). Ce type d'études a permis de quantifier l'altération de la performance lors de C_àT par rapport à C_àI. Ainsi, Hausswirth et coll. (1999) ont montré que la performance lors d'un 5000 m était supérieure de 5,5 % lorsque cette course était réalisée isolément par rapport à l'épreuve de course à pied d'un triathlon sprint. De même, Bernard et coll. (2003) ont observé qu'un exercice de 20 min de cyclisme réalisé à une intensité correspondant à celle soutenue lors de la partie cycliste d'un triathlon sprint (environ 70 % de PMA) entraînait une augmentation de 7,6 % du temps réalisé lors d'un 3000 m subséquent de course à pied, par rapport à une course à pied isolée.

Différentes hypothèses ont été évoquées dans la littérature afin d'expliquer l'augmentation du coût énergétique de C_àT par rapport à C_àI. Ces mécanismes spécifiques induits par les caractéristiques de la transition cyclisme - course à pied, se manifestent par des altérations physiologiques, biomécaniques ou posturales.

La première hypothèse fait référence à l'altération spécifique de la fonction pulmonaire mise en évidence lors d'un enchaînement cyclisme - course à pied, comparé à une C_àI (40 km de cyclisme suivi de 10 km de course à pied *vs.* 10 km de course à pied ; *Hue et coll., 1998*) ou au cours d'un enchaînement de deux épreuves de course à pied (30 min de cyclisme et 5 km de course à pied *vs.* 30 min de course à pied et 5 km de course à pied ; *Hue et coll., 1999*). Cette altération se traduit par une moindre efficacité ventilatoire, objectivée à travers une augmentation de $\dot{V}_E$, de FR, ou des ratios $\dot{V}_E/\dot{V}_{O_2}$ et $\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$ (*Hue et coll., 1998*), mais également une augmentation du volume résiduel, de la capacité fonctionnelle résiduelle ou du ratio entre le volume résiduel et la capacité totale pulmonaire (*Hue et coll., 1999*). Ces auteurs précisent que l'altération de l'efficacité ventilatoire est plus marquée lors des premières minutes de C_àT et suggèrent qu'elle peut être associée à une apparition de la fatigue des muscles respiratoires et/ou une hypoxémie relative induite lors de l'épreuve de cyclisme (*i.e.* altération de la capacité de diffusion de l'oxygène au niveau de la barrière alvéolo - capillaire).

Une deuxième hypothèse liée à la modification de paramètres cinématiques et biomécaniques peut également être à l'origine de l'augmentation du coût énergétique observée à la fin d'un triathlon. Dans ce contexte, Hausswirth et coll. (1997a) rapportent certaines variations cinématiques au début de C  T par rapport à C  I, comme une réduction de la hauteur maximale de la hanche, l'angle plus élevé du tronc (par rapport à la verticale)    la pose du talon et la diminution de la longueur de foulée. L'inclinaison plus importante du tronc vers l'avant semble associée aux changements posturaux se produisant pendant la transition cyclisme - course à pied (*i.e.* passage d'une position assise en cyclisme à une position debout en course à pied), induisant un recentrage des afférences sensibles pendant C  T qui peut entraîner une augmentation de la dépense énergétique (Hausswirth et coll., 1997a). Par ailleurs, les valeurs de longueur de foulée spontanément adoptée immédiatement après la transition ne correspondent pas à celles qui minimisent la dépense énergétique, contrairement à la longueur de foulée adoptée au cours de C  I. Ceci pourrait également expliquer l'augmentation de la dépense énergétique au cours de C  T (Cavanagh et Williams, 1982). Cependant, ces modifications de la combinaison longueur - fréquence de foulée au début de C  T par rapport à C  I ne sont pas observées par tous les auteurs (Quigley et Richards, 1996 ; Millet et coll., 2001). D'autres variables biomécaniques ont été évoquées pour expliquer partiellement l'augmentation du coût énergétique lors de C  T, comme par exemple, l'élévation du genou et la position du centre de gravité du sujet (Thorstensson et coll., 1984).

Tous les paramètres précédemment cités permettent d'expliquer l'augmentation de la dépense énergétique classiquement observée au cours de C  T par rapport à C  I. Dans une perspective d'optimisation de la performance en triathlon, l'identification de ces paramètres met en évidence un certain nombre de facteurs permettant de réduire les altérations multifactorielles qui se produisent au cours de l'enchaînement cyclisme - course à pied du triathlon.

2. Facteurs d'influence sur l'adaptation physiologique lors de l'enchaînement

2.1. Influence de la morphologie

Suite à l'étude descriptive du profil anthropométrique des triathlètes élités de Ackland et coll. (1997), les travaux récents de Landers et coll. (2000) se sont intéressés à 28 dimensions anthropométriques, regroupés en quatre groupes (*i.e.* robustesse, adiposité, longueur des segments, masse osseuse), chez des triathlètes de niveau mondial, et à leurs éventuelles corrélations avec la performance dans chacune des activités et sur la performance globale en triathlon. Considérant à la fois les triathlètes élités senior et junior des deux sexes, les auteurs démontrent l'importance d'un niveau faible de masse grasse pour la réalisation d'une meilleure performance. Les performances en cyclisme sont liées à des longueurs de membres importantes. Et Foley et coll. (1989) ont relevé des segments plus longs chez les spécialistes de contre la montre. Aussi, Landers et coll. (2000) suggèrent que l'avantage que procure de longs segments sur la performance en cyclisme en triathlon est moins important depuis la généralisation du *drafting*. Par contre c'est le rapport poids – puissance qui doit être optimisé. Ainsi, Bentley et coll. (2002) suggèrent que les triathlètes les plus légers (la masse corporelle des triathlètes élités masculins est comprise entre 65 et 75 kg ; Landers et coll., 2000 ; Schabort et coll., 2000) sont avantagés sur des parcours cyclistes accidentés avec *drafting*. En effet, ce genre de parcours permet à ces athlètes de bénéficier de l'avantage de leur faible masse corporelle, à la fois sur la partie cycliste et sur la partie pédestre. Par contre, les triathlètes plus lourds sont avantagés sur les parcours cyclistes plats sans *drafting*.

2.2. Influence du niveau d'expertise

Comme dans les sports d'endurance mono disciplinaires, la performance en triathlon est fortement corrélée aux pratiques d'entraînement. En général, les triathlètes les plus performants ont participé à plus de triathlons, s'entraînent depuis un plus grand nombre d'années, au cours

d'entraînements plus longs et plus fréquents dans les trois disciplines (*Zinkgraf et coll., 1986*). Millet et coll. (2000 ; 2001) évoquent l'influence du niveau d'expertise sur la performance lors d'enchaînements de type course à pied – cyclisme – course à pied chez des triathlètes.

Selon Millet et coll. (2000) un enchaînement de 7 minutes de course à pied à l'allure d'un 10 km en triathlon associé à un protocole triangulaire de détermination de PMA sur ergocycle, suivi d'une épreuve de temps limite à 80 % de PMA, et enfin, d'un dernier exercice de 7 minutes de course à pied à la même allure qu'en début de test montre une évolution différente du CE au cours du test en fonction du niveau d'expertise des sujets. En effet, alors que les sujets élites ont un CE en course à pied qui diminue de $3,7 \pm 4,8\%$ ($4,01 \pm 0,46$ vs. $3,86 \pm 0,34$ J.kg⁻¹.min⁻¹ respectivement avant et après le cyclisme) sous l'influence du cyclisme, les sujets de niveau moyen ont un CE en course à pied qui augmente de $2,3 \pm 4,6\%$ ($3,67 \pm 0,37$ vs. $3,76 \pm 0,39$ J.kg⁻¹.min⁻¹ respectivement avant et après le cyclisme). Par ailleurs, chez les élites seulement, le coût mécanique (*i.e.* travail mécanique externe fourni par unité de distance et exprimé en J.kg⁻¹.m⁻¹) entre la course pré et post cyclisme aurait tendance à diminuer.

La seconde étude (*Millet et coll., 2001*) réalisée à partir du même protocole, montre que chez des triathlètes de niveau moyen, les effets du cyclisme sur la course à pied subséquente sont transitoires. En effet, les modifications du coût mécanique observées en course à pied une minute après la transition ($+ 7,1 \pm 6,0$ % avant vs. après le cyclisme) ne sont plus significatives après 6 minutes de course à pied ($- 0,1 \pm 4,3$ % avant vs. après le cyclisme).

2.3. Rôle de la thermorégulation

La principale étude concernant le rôle de la thermorégulation (*Kreider et coll., 1988a*) compare la température rectale lors d'épreuves isolées réalisées sur ergomètres et lors d'un triathlon en laboratoire (0,8 km de natation, 75 minutes de cyclisme et 40 minutes de course à pied). Les résultats montrent des températures rectales significativement plus élevées lors des épreuves de cyclisme et de course à pied en triathlon comparativement aux mêmes épreuves

isolées ($38,4 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ vs. $38,2 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ en cyclisme et $39,2 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ vs. $38,3 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ en course à pied). Les auteurs suggèrent que les différences physiologiques observées entre les épreuves isolées et le triathlon sont potentialisées par les ajustements thermorégulateurs couramment observés lors d'exercices d'endurance. En effet, avec l'augmentation de la température centrale, la vasodilatation du réseau cutané entraîne une diminution de la pression artérielle, de la pression de remplissage ventriculaire et du volume d'éjection. C'est pourquoi, la fréquence cardiaque augmente afin de maintenir le même débit cardiaque. La fréquence cardiaque est significativement plus faible lors d'une course à pied isolée comparativement aux valeurs relevées lors de la dernière épreuve de course à pied en triathlon ($161 \pm 3,1$ bpm vs. $174 \pm 3,6$ bpm ; *Kreider et coll., 1988a*). Mais, attribuer cette différence au seul rôle de l'influence de la thermorégulation serait occulter d'autres paramètres d'importance dans les sports d'endurance. D'ailleurs, la dérive thermique est observable aussi bien lors de l'exercice isolé que lors d'un triathlon. Ce sont les effets cumulatifs des épreuves, dont l'augmentation de la température centrale de $0,72^{\circ}\text{C}$ après la natation, qui semblent responsables d'ajustements cardiovasculaires plus précoces lors du triathlon (*Kreider et coll., 1988a*).

2.4. Influence de la stratégie d'allure

Avec la généralisation du *drafting* sur les épreuves de haut niveau, le parcours cycliste est le plus souvent tracé sur un circuit à réaliser plusieurs fois, incluant des parties techniques (*e.g.* montées, virages, descentes, demi-tours). Ces courses se rapprochent donc des critères cyclistes caractérisés par de rapides accélérations à des puissances supra maximales. L'étude descriptive non publiée de Smith et coll. (1999) a permis d'examiner les puissances développées lors de la partie cycliste d'une étape de coupe du monde de triathlon et de relever des puissances variant de 0 Watts à des valeurs supra maximales de l'ordre de 950W (*i.e.* $15,4 \text{ W.kg}^{-1}$) et 600W (*i.e.* $10,0 \text{ W.kg}^{-1}$) chez les triathlètes élités masculins et féminines respectivement. Garside et Doran (2000) ont abordé cet aspect en utilisant une géométrie de cadre particulière (angle de tube de selle de

81° avec l'horizontal vs. 72° pour les cadres traditionnel) afin de permettre un départ plus rapide au cours des premiers kilomètres de course à pied suivant les 40 km de cyclisme, et ainsi, éviter un départ trop lent imposant une stratégie d'allure progressive en course à pied. Deux autres études ont envisagé l'influence de la stratégie d'allure d'un exercice sur le suivant (*Palmer et coll., 1997 ; Palmer et coll., 1999*).

La première étude avait pour but d'évaluer les effets de deux exercices de cyclisme de 150 minutes réalisés à 58 % de PMA (*i.e.* "*peak power output*" dans le texte) soit de manière constante ("*steady state*" *SS*), soit avec des variations d'allures ("*variable intensity*" *VI*), sur la performance lors d'un contre la montre (clm) de 20 km engagé après 1 minutes de récupération. Lors du protocole à intensité variable dit "stochastique", la puissance évoluait de 35,8 à 82,3 % de PMA, soit de 155 à 355 W, afin de mimer les situations rencontrées sur des courses cyclistes d'environ 105 km. En dépit d'une performance sur clm significativement moins bonne après l'exercice *VI* (*figure 10* ; 28 min 0 s ± 1 min 47 s vs. 26 min 32 s ± 1 min 30 s respectivement), et d'une puissance soutenue significativement plus faible (302,5 ± 42,3 vs. 340,3 ± 44,2 W ; 70,0 ± 9,8 vs. 77,8 ± 10,2 % de PMA respectivement), les auteurs n'observent pas de différence de FC entre les deux clm subséquents mais suggèrent que les variations répétées de puissance lors de l'effort stochastique pourraient induire une augmentation de l'utilisation du glycogène musculaire.

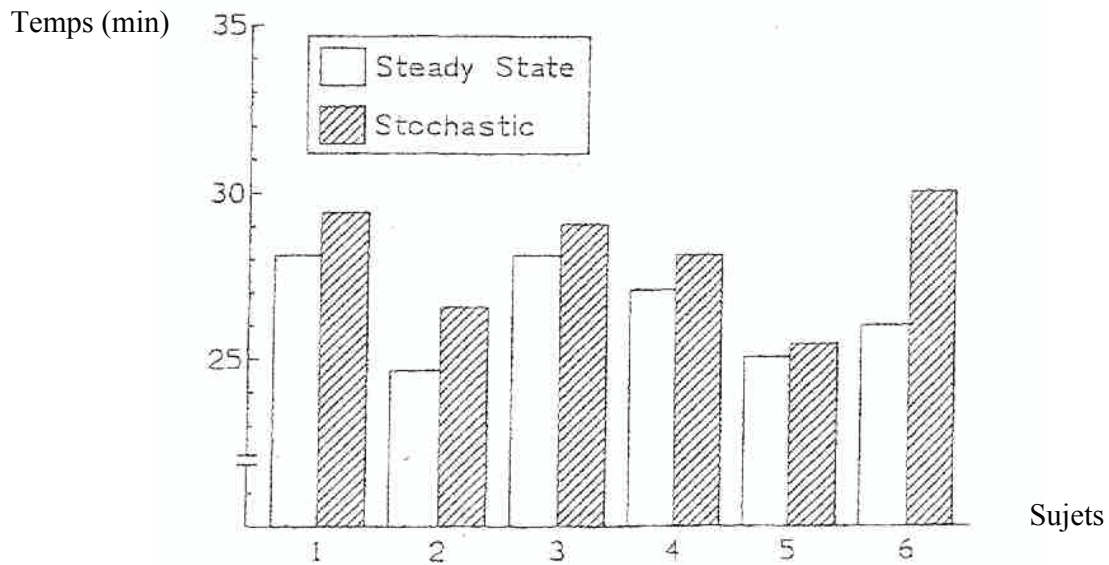


FIGURE 10. Performance lors du contre la montre de 20 km de cyclisme réalisé après 150 minutes de cyclisme à puissance constante ("steady State") et à puissance variable ("Stochastic") pour 6 sujets (d'après Palmer et coll., 1997)

La seconde étude de (Palmer et coll., 1999) a été conduite selon un protocole semblable (*i.e.* 140 minutes au lieu de 150 minutes pour l'effort préliminaire) dans le but d'évaluer les effets des deux types de stratégies lors d'efforts préliminaires sur le métabolisme musculaire des hydrates de carbone lors d'un effort subséquent de pédalage de type contre la montre. Les résultats montrent les quantités de lactate produit ($29,1 \pm 3,9$ vs. $24,6 \pm 3,7$ mM) et de glucose oxydé ($99,2 \pm 5,3$ vs. $83,9 \pm 5,2$ g) sont supérieures lors de l'épreuve VI (figures 11A et 11B). Il y a une diminution plus marquée de la quantité de glycogène au sein des fibres de type I après l'épreuve SS, et une tendance inverse au sein des fibres de type II (figure 11C). En dépit de ces différences métaboliques, les deux clm ont été réalisés à des puissances (283 ± 22 vs. 256 ± 18 W pour SS et VI respectivement) et des FC moyennes identiques (171 ± 4 vs. 172 ± 4 bpm pour SS et VI respectivement).

Concentration
plasmatique en
Lactate (mM)

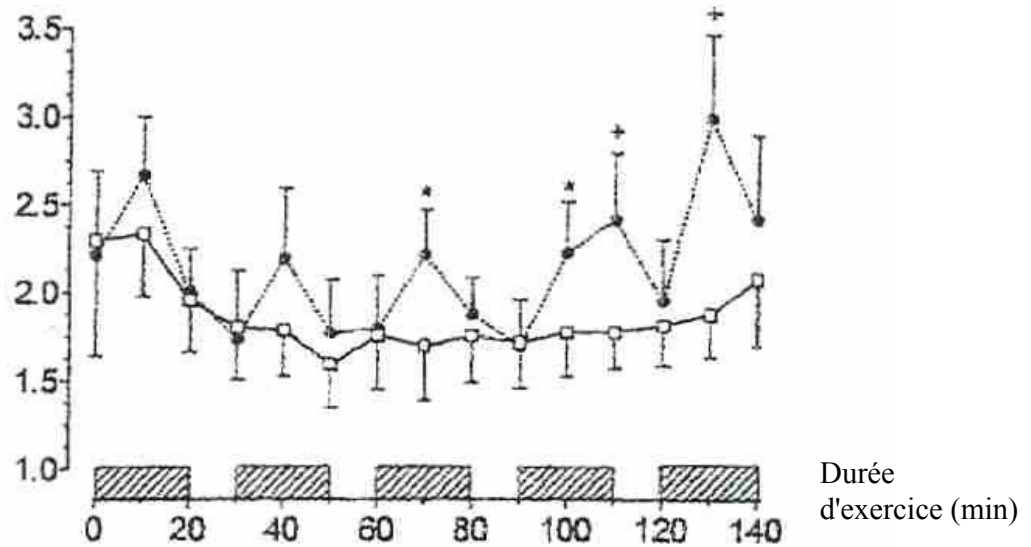


FIGURE 11A. Concentration plasmatique de lactate (mM) lors de l'épreuve de 140 minutes de cyclisme à puissance constante (carrés blancs) et à puissance variable (ronds noirs). VI significativement supérieur à SS: * $P < 0,001$, + $P < 0,05$ (d'après Palmer et coll., 1999).

Vitesse d'oxydation
du Glucose
plasmatique
(mmol.min⁻¹)

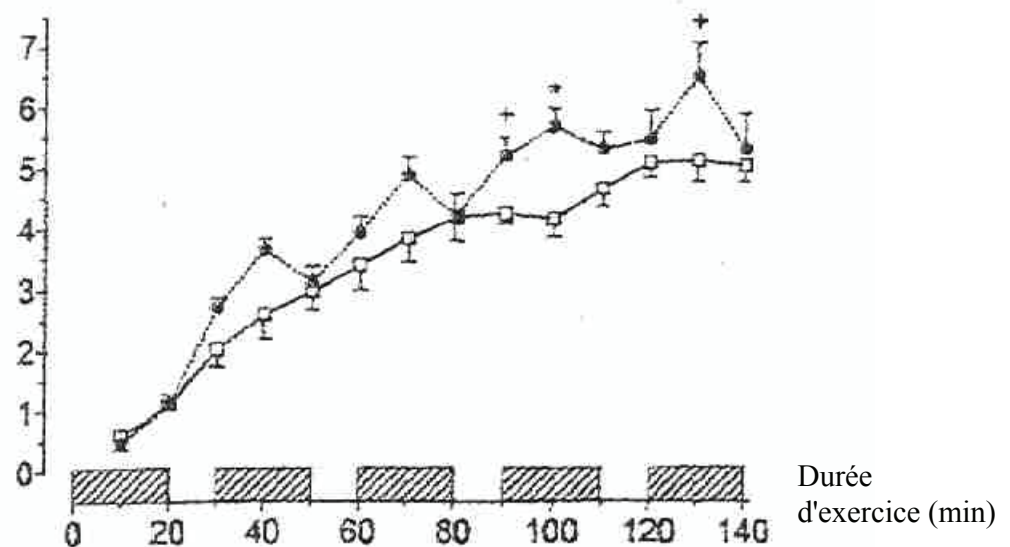


FIGURE 11B. Oxydation du glucose plasmatique (mmol.min⁻¹) lors de l'épreuve de 140 minutes de cyclisme à puissance constante (carrés blancs) et à puissance variable (ronds noirs). VI significativement supérieur à SS: * $P < 0,001$, + $P < 0,05$ (d'après Palmer et coll., 1999).

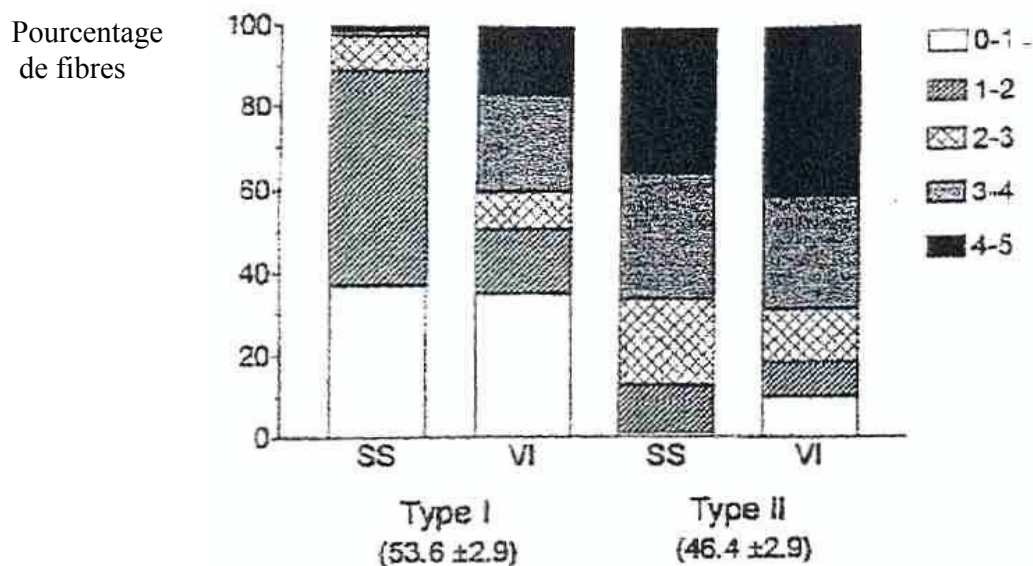


FIGURE 11C. *Quantité de glycogène révélée par coloration (acide de Schiff) sur des sections de muscles obtenues à partir d'échantillons de biopsies du vastus lateralis après 140 minutes de cyclisme à puissance constante (SS) et à puissance variable (VI). Le pourcentage des fibres de type I et II au sein du vastus lateralis est indiqué entre parenthèses. L'intensité de la coloration est établie par traitement informatique sur une échelle allant de 0 (pas de coloration) à 5 (d'après Palmer et coll., 1999).*

Ces résultats, en partie contradictoires avec ceux de la première étude, sont expliqués par une puissance relative supérieure lors de l'épreuve VI de la première étude. Les auteurs concluent que deux exercices réalisés aux mêmes puissances avec des stratégies différentes, induisent des différences non significatives de métabolisme glucidique et de recrutement musculaire, insuffisants pour affecter la performance lors d'un exercice cycliste intense subséquent (Palmer et coll., 1999).

Dans le cadre des activités multivariées, une seule étude concerne la stratégie d'allure en course à pied (Kreider et coll., 1988b). Cette étude proposait d'enchaîner 60 minutes de cyclisme à 70 % de $\dot{V}O_{2max}$ avec 30 minutes de course à pied réalisée selon deux modalités : soit de manière constante (i.e. 7,25 km à 85 % de $\dot{V}O_{2max}$), soit de manière progressive pendant les 9 premières minutes (i.e. 3 min à 55 %, 3 min à 65 %, 3 min à 75 % de $\dot{V}O_{2max}$, puis 20 min à 85 % de $\dot{V}O_{2max}$, soit 6,75 km). Les résultats montrent que la stratégie progressive entraîne des valeurs significativement plus faibles pour $\dot{V}O_2$, FC, $\dot{V}E$ et LAs, par comparaison avec la stratégie

constante. Malgré la différence de distance parcourue, les auteurs suggèrent que la stratégie progressive permet d'être plus efficace sur la suite du parcours.

HYPOTHESES DE TRAVAIL
ET
OBJECTIFS DE RECHERCHE

Très peu de travaux ont été réalisés dans le contexte du triathlon réalisé en situation « écologique ». Dans ce contexte, **l'étude présente** présente deux objectifs principaux. Le premier objectif est d'évaluer les réponses métaboliques chez des triathlètes entraînés lors d'un enchaînement cyclisme – course à pied au cours duquel l'épreuve de cyclisme est réalisée, soit à puissance constante, soit à puissance variable. Le deuxième objectif de cette expérimentation est d'analyser l'influence de ces conditions de pédalage sur la performance lors de l'épreuve de 5 km de course à pied. L'hypothèse émise est que les variations d'allure en cyclisme pourraient entraîner une fatigue musculaire plus importante, engendrant une altération de la performance lors de la course à pied subséquente.

METHODOLOGIE GENERALE

RECUEIL DES VARIABLES ETUDIEES

1. Introduction

L'expérimentation décrite ci-après a été réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire de Biomécanique et de Physiologie de l'Institut National du Sport et de l'Education Physique (*INSEP, DSS, LBP, 11 avenue du Tremblay 75012 Paris*) et le Laboratoire Ergonomie Sportive et Performance de l'Université du Sud Toulon – Var (*EA 3162, Avenue de l'Université 83957 La Garde Cedex*). La méthodologie générale présente un descriptif des moyens matériels et techniques utilisés et un aperçu de la situation géographique dans lesquels se sont intégrées les expérimentations réalisées dans le cadre de ce travail.

2. Cadres expérimentaux

Ce travail repose sur une expérimentation qui a été réalisée dans le cadre de l'Université du Sud Toulon – Var sur le site de "l'Almanarre" (Hyères-les-Palmiers, Var). Les épreuves de cyclisme ont eu lieu sur un parcours ouvert à la circulation mais disposant d'une bande de roulement réservée aux cyclistes. Ce circuit plat de 2 km devait être parcouru 5 fois sous la forme d'un aller-retour entre 2 ronds points. Le même principe a été repris pour les épreuves de course à pied, réalisées sur une chaussée réservée aux promeneurs, sur une distance de 500 m matérialisée par 2 plots.

3. Sujets de l'expérimentation

Dix triathlètes expérimentés en triathlon et ayant un vécu d'au moins 4 ans dans l'activité, ont participé à cette étude. Leur kilométrage moyen par discipline et par semaine était de : $16,4 \pm 8,2$ km en natation, $222,7 \pm 80,2$ en cyclisme et $46,4 \pm 15,5$ km en course à pied. Leur âge était de $25,2 \pm 6,8$ ans, leur poids corporel de $71,8 \pm 8,4$ kg et leur taille de $181,3 \pm 6,7$ cm. Chaque triathlète ont passé un test incrémenté de cyclisme en laboratoire (*cf. §4.c.i*). et 3 conditions V-C, (i.e. Vélo-Course à pied) sur le terrain sur une période de 4 semaines et avec une récupération minimale de 72h entre chaque session.

4. Perception de l'effort

Au cours des expérimentations, le niveau de perception de l'effort (Rating of Perceived Exertion, RPE) est évalué à partir de l'échelle de cotation mise au point par Borg (1970). Cette échelle, comprenant 15 niveaux numérotés de 6 à 20 (*figure 12*), est présentée immédiatement après les épreuves de pédalage de course à pied

	6
7	Très très facile
8	
9	Très facile
10	
11	Facile
12	
13	Ni facile, ni difficile
14	
15	Difficile
16	
17	Très difficile
18	
19	Très très difficile
20	

Figure 12. *Echelle de perception de l'effort (d'après Borg, 1970)*

5. Recueil des variables métaboliques

a. Mesure de la fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque (FC, exprimée en bpm) est enregistrée pendant toute la durée des épreuves de cyclisme et de course à pied par des cardiofréquencemètres de type *POLAR Accurex Plus* (Kempele, Finlande) et *POLAR S710i* (Kempele, Finlande). Couplés à une ceinture émettrice située autour du torse des sujets, ces deux appareils permettent d'obtenir des valeurs de FC moyennées toutes les 5 s. Pour les épreuves réalisées en laboratoire, cet enregistrement est systématiquement doublé par une mesure obtenue à partir de la sonde de FC du système d'analyse des échanges gazeux et respiratoires (cf paragraphe 5.3).

b. Mesure des paramètres sanguins

i. Lactatémie

Dans notre étude, les valeurs de lactatémie sont obtenues grâce au système *Lactate Pro* (ARKRAY, Kyoto, Japon), validé par Pyne et coll. (2000). Une pommade de type Finalgon (Thomae, Boehringer Ingelheim Phrama GmbH & Co. KG, Ingelheim, Deutschland), permettant de dilater les vaisseaux sanguins et de faciliter le prélèvement, est appliquée sur le lobe de l'oreille du sujet. Après l'incision, des prélèvements sanguins sont effectués en début et fin d'épreuve et au cours de chaque transition. Chaque prélèvement de 5 μ L de sang est déposé sur une bandelette reliée au système qui l'analyse immédiatement (en 60 s ; *figure 13*).



Figure 13. *Analyseur Lactate*

Pro

c. Analyse des échanges gazeux et respiratoires

i. Les systèmes d'analyse

Dans notre étude, l'ensemble des variables métaboliques a été recueilli grâce à un système d'analyse télémétrique de type *K4b²* (COSMED, Rome, Italie). Ces appareils permettent de mesurer les échanges gazeux respiratoires dans les conditions réelles de l'activité grâce à un système de transmission-réception d'une portée de 1 km. Les analyseurs Cosmed sont portés par les sujets au moyen d'un harnais anatomique fixé sur leur tronc et sont alimentés par une batterie rechargeable (Ni-MH) dont l'autonomie est d'environ 2 h.

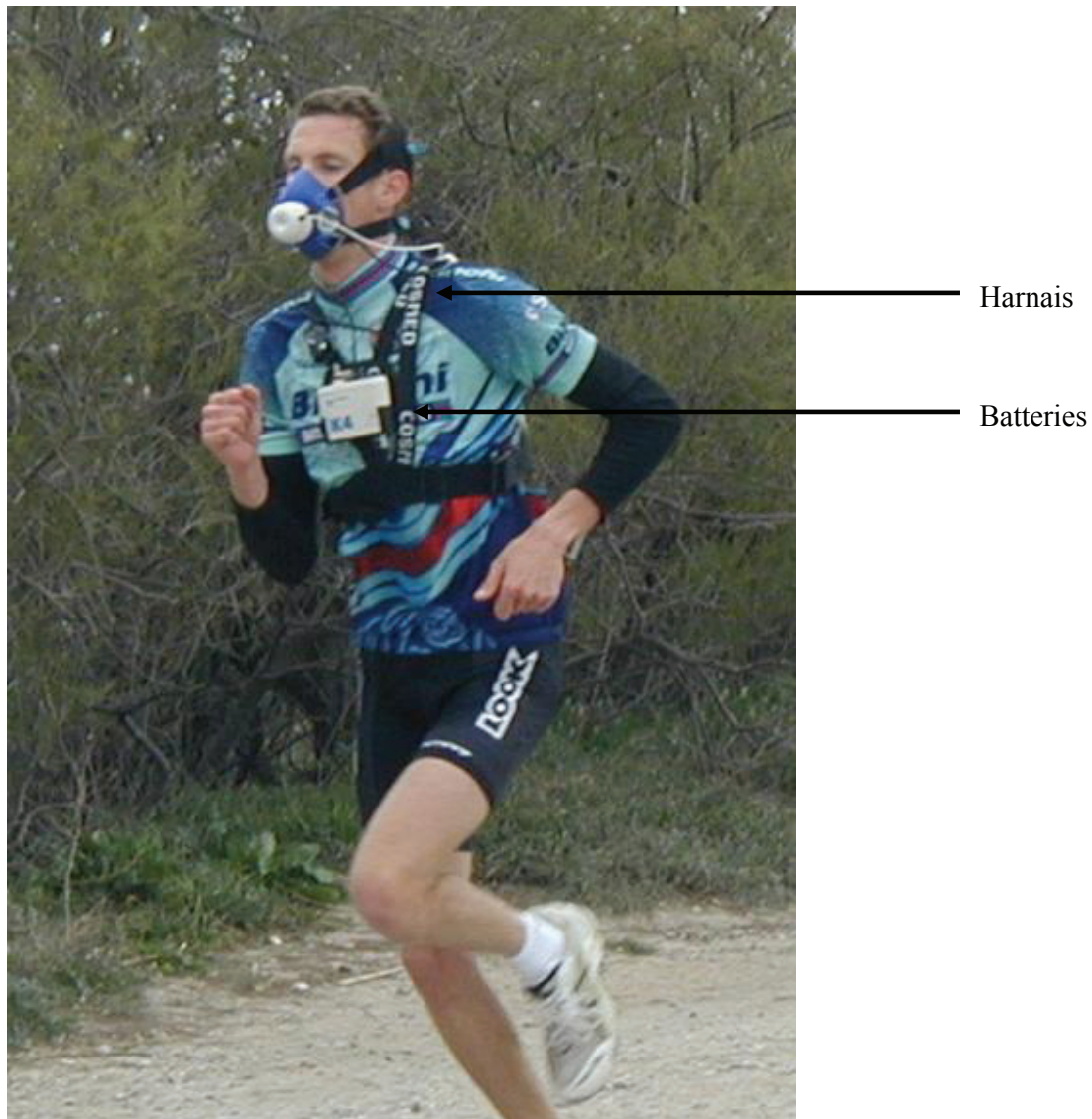


Figure 14. Utilisation du système $K4b^2$

Le $K4_{b2}$ comprend deux unités et un masque placé contre le visage du sujet (*Figure 14*). Une unité portable de 800 g mesure les différents paramètres ventilatoires et gazeux et une unité réceptrice traite et enregistre par télémétrie les signaux recueillis par l'unité portable. Ce système permet de mesurer le débit ventilatoire (V_E , exprimé en $L \cdot \text{min}^{-1}$) et la fréquence respiratoire (FR , exprimée en $\text{cycles} \cdot \text{min}^{-1}$) grâce à un débitmètre comprenant une turbine digitale bidirectionnelle de 28 mm de diamètre. La vitesse de rotation de la turbine (exprimée en $\text{tours} \cdot \text{min}^{-1}$), détectée par un système opto-électronique, est proportionnelle à

la quantité d'air qui la traverse. Le débitmètre est calibré avant chaque utilisation à partir d'une seringue de 3 litres. L'air expiré est véhiculé à travers un tube capillaire flexible (Permapure) jusqu'à une microchambre dynamique de prélèvement et de mélange des gaz (située à l'intérieur de l'unité portable). Les concentrations en oxygène (O₂) et en dioxyde de carbone (CO₂) sont alors mesurées à des intervalles de temps réguliers. La fraction d'oxygène contenue dans l'air expiré (FEO₂) est mesurée par une sonde polarographique tandis qu'une sonde infrarouge permet d'analyser la fraction de gaz carbonique (FECO₂). Les analyseurs d'O₂ et de CO₂ sont également calibrés avant chaque expérimentation en fonction de la concentration en O₂ et en CO₂ de l'air ambiant (respectivement 20,93 % et 0,03 %) et d'un gaz étalon (respectivement 5 % et 15 %). Les valeurs de fractions inspirées d'O₂ et de CO₂ (FIO₂ et FICO₂ respectivement) sont ainsi connues. Pendant la calibration, les valeurs de pressions barométriques et de degrés hygrométriques sont enregistrées. Les paramètres ventilatoires et gazeux mesurés et analysés par ce système sont ensuite moyennés sur un intervalle de temps fixé à 15 s avec le *K4_{RQ}* (études n°1 et n°3) et à 5 s avec le *K4b²* (étude n°2). A partir de ces données, le débit d'O₂ (*i.e.* $\dot{V} O_2$) est calculé à partir de l'équation 24 :

$$\dot{V} O_2 = \dot{V}_E \times \left\{ \left[\frac{1 - (FEO_2 + FECO_2)}{1 - (FIO_2 + FICO_2)} \times FIO_2 \right] - FEO_2 \right\} \quad (24)$$

Lors de l'expérimentation n°2, le système d'analyse télémétrique de type *K4b²*, (*figure 25*) récemment validé par Mc Laughlin et coll. (2001), a été utilisé pour mesurer les paramètres ventilatoires et gazeux lors des épreuves de terrains (*figure 15*).



Figure 15. *Analyseur télémétrique cycle à cycle K4b²*

ii. Détermination de la consommation maximale en oxygène.

Dans le but de caractériser les populations soumises aux différentes expérimentations, des tests préliminaires à charge croissante sont réalisés.

Lors de notre expérimentation, l'épreuve à charge croissante est réalisée sur ergocycle. L'exercice débute à une puissance de 100 W incrémentée de 30 W toutes les deux minutes jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus maintenir une cadence supérieure à 50 rotations par minute (RPM).

L'épreuve est considérée comme maximale lorsque deux des trois critères suivants sont observés :

- un plafonnement de $\dot{V}O_2$ (*i.e.* une augmentation inférieure à $2,1 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) malgré une augmentation de la vitesse ou de la puissance (*Taylor et coll., 1955*) ;
- un quotient respiratoire supérieur à 1,1 ;

- une fréquence cardiaque supérieure à 90 % de la fréquence cardiaque maximale théorique (*Astrand et Ryhming, 1954 ; Howley et coll., 1995*).

La Puissance maximale associée à $\dot{V}O_{2\max}$ (i.e. PMA) est définie comme la puissance du dernier palier réalisé intégralement (1 ou 2 minutes selon le protocole ; *Poole et Richardson, 1997*). Dans le cas où le dernier palier n'est pas complètement achevé, les valeurs de PMA sont obtenues en ajoutant à la valeur de l'avant-dernier palier, le produit de l'incrément de la vitesse ou de la puissance (i.e. 30 W) par le pourcentage du temps de maintien du dernier palier. Les valeurs atteintes furent de $61,9 \pm 4,1$ ml/min/kg pour la $VO_{2\max}$, et de 380 ± 31 W pour la puissance maximale.

iii. Détermination des seuils ventilatoires.

La détection des seuils est systématiquement réalisée de façon conjointe au minimum par deux expérimentateurs sans prise de connaissance du résultat final. Le premier seuil ventilatoire (SV) est déterminé selon la méthode de Wasserman et coll. (1973). Dans ce cadre, la valeur de SV correspond à la rupture de pente de la cinétique de $\dot{V}_E$ associée à celle de l'équivalent respiratoire pour l' O_2 ($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$) sans augmentation concomitante de l'équivalent respiratoire pour le CO_2 ($\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$). Le deuxième seuil ventilatoire (SV2) correspond à l'augmentation concomitante de $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ et $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ (*Davies, 1985*).

6. Recueil des variables biomécaniques

- L'activité cycliste

L'ergocycle de type *SRM* (Schobere Rad Meßtechnik, Jülich, Welldorf, Germany) fut utilisé pour notre expérimentation.

Cet ergocycle à résistance électromagnétique est équipé avec les pédales personnelles des sujets et peuvent s'ajuster précisément à leurs caractéristiques

anthropométriques grâce à un réglage horizontal et vertical de la selle et du cintre. La position adoptée par les sujets peut ainsi être fidèlement répliquée à partir des « côtes » de leur vélo personnel. Pour toutes les expérimentations, le mode hyperbolique de l'ergocycle, qui se caractérise par un asservissement de la puissance de sortie à la cadence de pédalage, est utilisé. Ainsi, quelle que soit la cadence adoptée par le sujet et ses variations au cours de l'exercice, la puissance moyenne de sortie demeure constante pendant toute la durée de l'épreuve (*Balmer et coll., 2000*).

L'ergomètre SRM utilisé dans le cadre de nos expérimentations est un modèle validé par Balmer et coll. (2000) et Jones et Passfield (1998). Dans sa version de laboratoire (*figure 25*), l'ergocycle mesure la puissance développée par le sujet à partir de 20 jauges de contraintes situées dans le pédalier. Cette puissance est obtenue à partir de l'équation 30 :

$$\text{Puissance (W)} = \text{Moment de force (N.m)} \times \text{Vitesse angulaire (radian.s}^{-1}\text{)}$$

(26)

L'application d'une force sur les manivelles entraîne une déformation des bandes de jauges de contraintes fixées entre les 4 bras d'aluminium du pédalier. L'ensemble, bandes de jauges de contrainte et pédalier, constitue le *Powermeter*. Les bandes envoient un signal, converti en fréquence-voltage par les éléments électroniques, proportionnel aux forces appliquées sur les manivelles et à la cadence de pédalage. Cette fréquence est transmise, par induction à une fréquence d'échantillonnage de 500 kHz, à un capteur fixé dans le boîtier de pédalier. Avant chaque épreuve, le pédalier est calibré en effectuant deux tours de manivelles à vide (*i.e.* sans exercer de tension sur la chaîne). Les valeurs de cadence de pédalage (RPM) et de puissance (W) sont transmises au boîtier *Powercontrol* du SRM (*figure 16*) depuis le boîtier de pédalier, et leurs variations peuvent ainsi être visualisées par le sujet. Le *Powercontrol* est un micro-ordinateur amovible fixé sur le guidon permettant de

stocker 25500 données, soit 76 heures d'enregistrement pour un intervalle de mémorisation fixé à 10 secondes. Ces données peuvent ensuite être transmises à un ordinateur.

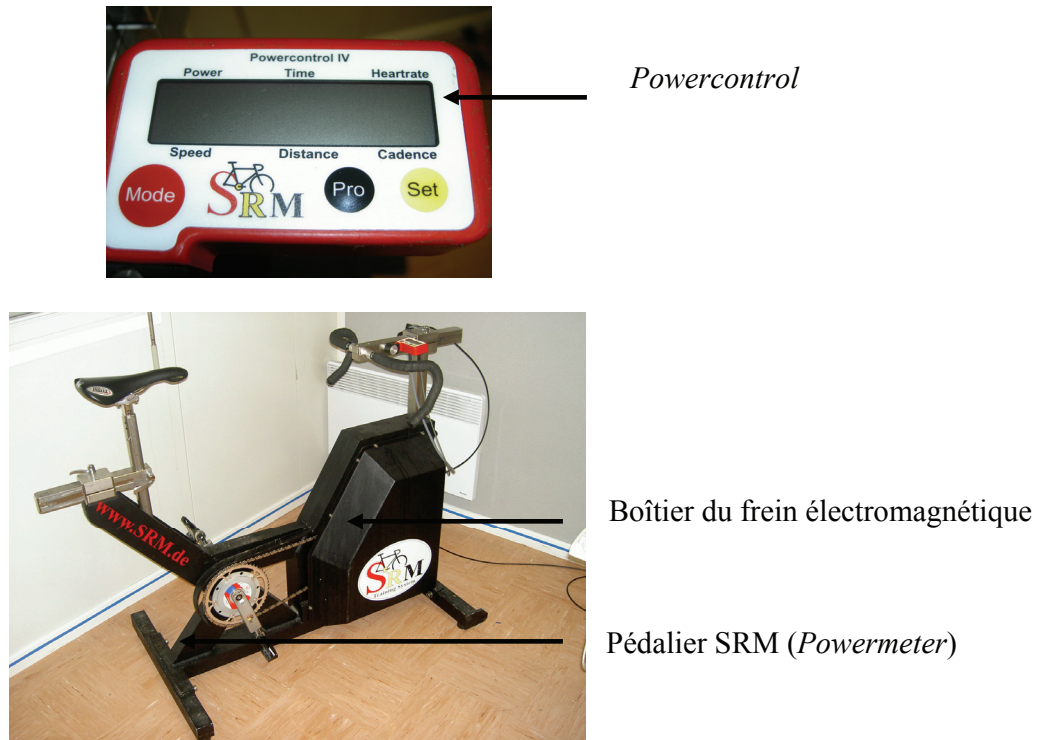


Figure 16. *Powermeter et powercontrol du Système SRM*

Lors de l'expérimentation, une version portable du *Powermeter* (860 g), constituée de 4 jauges de contraintes, est montée sur les bicyclettes des athlètes. Un capteur situé sur la fourche avant du vélo permet d'afficher et d'enregistrer sur le *Powercontrol*, la puissance, la cadence, la distance parcourue et la vitesse. Enfin une ceinture émettrice de type Polar permet d'enregistrer les valeurs de fréquence cardiaque.

7. Protocole expérimental sur le terrain

Tous les triathlètes ont effectué, dans un environnement extérieur, 3 sessions d'enchaînement V-C (i.e. Vélo-Course à pied) composées chacune de 20 km de cyclisme

(10 fois un circuit de 2 km) et d'une course à pied de 5km consécutive à l'épreuve cycliste. Avant chaque session, chaque sujet réalise un échauffement de 8km en vélo soit environ 20 minutes. Après 5 minutes de repos, les triathlètes étaient équipés de l'analyseur Cosmed K4 b2 et les gaz expirés furent enregistrés en continu durant tous les tests. Nous avons demandé aux triathlètes de réaliser une première session V-C pendant laquelle la partie cycliste devait être réalisée à une puissance libre (PL). Toutes les valeurs sont masquées pendant cette épreuve afin de ne pas fournir d'informations aux triathlètes, celles-ci pouvant influencer la gestion de l'effort. Cette condition PL fut systématiquement la première condition pour tous les triathlètes, autorisant ainsi l'identification des différentes stratégies de puissance développées par les triathlètes sur le circuit. Les deux autres V-C situations expérimentales furent menées tirées au sort par chaque triathlète. Ils devaient soit maintenir constante la puissance en vélo (PC) ou bien réaliser les 20km en puissance variable (PV, cf figure). Afin de maintenir leur puissance de sortie, les sujets pouvaient avoir un feed back visuel sur le powermeter SRM pendant les situations PV et PC. Pendant la session PV, les sujets avaient à fournir une puissance allant de $\pm 15\%$, $\pm 5\%$ et $\pm 10\%$ de la puissance moyenne obtenue dans la situation PL, respectivement au début, au milieu et à la fin des 20km. Dans la logique de compétition, les sujets terminaient le dernier km de vélo par une intensité au moins supérieure de 10% à la puissance moyenne des 20km. Après une transition de 40 secondes en moyenne pour chaque sujet et chaque situation, les triathlètes devaient réaliser une course à pied sous forme de performance chronométrique et dont les temps intermédiaires étaient enregistrés tous les 500m, avec aucun feedback aux athlètes.

8. Logiciels et traitements statistiques des variables

a. Logiciels utilisés

Le logiciel Statistica version 5.5 (STATSOFT, Statsoft France, Maisons-Alfort, France) a permis le traitement statistique des données.

b. Traitements statistiques

Les résultats de notre étude a été exprimé en moyenne $\pm$ écart-type. Les variations des différents paramètres mesurés ont été étudiées au moyen d'une analyse de variance à mesure répétée à deux facteurs de type ANOVA (condition et période). Lorsque la valeur de p ajusté est inférieure à 0,05 un test post-hoc HSD de Tukey ou un test de Newman-Keuls a été utilisé pour identifier d'éventuelles différences entre les différents temps de l'expérimentation. Ainsi, les différences de performance en course à pied entre les différents tests ont été analysées avec un test t pour échantillons appariés. Le seuil de signification a été fixé à $p < 0,05$.

PRESENTATION

DES PRINCIPAUX RESULTATS

Résultats

Performances

Une diminution significative du temps de Course à pied après la situation CI en vélo fut observée (1118 ± 72 s), comparée à celles obtenues en PL (1134 ± 64 s) et PV (1168 ± 73 s) bouts. Le temps de course à pied était aussi significativement plus faible après la partie vélo PL comparée à PV. De plus, la vitesse de course était significativement supérieure pendant le 1er kilometre couru après les épreuves cyclistes PL (4.57 ± 0.26 m.s⁻¹) et PC (4.57 ± 0.31 m.s⁻¹) et comparées à la partie PV (4.35 ± 0.26 m.s⁻¹) (figure 18).

Ajouté à celà, les sujets ont roulé à PL, PC et VI respectivement à des puissances moyennes et vitesses de 310 ± 28 et 37.8 ± 1.9 , 306 ± 36 et 38.3 ± 1.9 , 305 ± 46 W et 37.5 ± 3.0 km.h⁻¹ pendant les 20 km (figure 17). Ces puissances moyennes sont proches de 80% of PMA. Pour la partie PV, les valeurs de puissances sont comprises entre 68 et 92% PMA (260 à 350 W). Aucune différence significative pour les puissances et les vitesses n'ont été observées dans les différentes allures de cyclismes, indiquant que nos sujets ont respecté les allures que nous leur avons indiquées avant chaque épreuve. La moyenne des cadences de pédalage étaient significativement plus faibles à la fin de l'épreuve PC comparée à PL (-7.1%).

Réponses métaboliques

Le Tableau 1 les changements des paramètres physiologiques pendant toutes les épreuves. Un effet significatif de la durée d'exercice a été observé sur $\dot{V}_E$ et FC pour les 3 parties cyclistes (tableau 1). En contraste, aucune variation n'a été trouvée avec la durée de l'exercice. De plus, pas de différence significative sur les valeurs de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}_E$,

FC, $[La^-]$ et RPE n'a été observé entre les 3 conditions cyclistes des sessions V-C. Les valeurs de $[La^-]$ étaient de 6.6 ± 2.1 , 6.6 ± 2.8 et 7.7 ± 2.2 mmol.l⁻¹, respectivement à la fin des parties vélo des conditions PL, PC et PV. Les valeurs de RPE n'étaient pas significativement différentes à la fin des parties cyclistes, 16 ± 2 , 16 ± 1 et 17 ± 2 respectivement pour les sessions PL, PC et PV.

Le Tableau 2 montre les changements des variables physiologiques obtenues lors de l'épreuve de 5 km de course à pied lors de l'enchaînement V-C. Un effet significatif de la durée d'exercice a été relevé sur les valeurs de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}_E$, et FC entre la première section et les autres, au travers les 3 courses à pied, tandis qu'aucune variation des paramètres physiologiques ne fût observée entre les 3 sessions de 5 km à pied. La Figure 18 indique les réponses de $\dot{V}O_2$ et les valeurs de vitesse en course au travers les 3 performances. Les valeurs de $[La^-]$ n'étaient pas significativement différentes entre les 3 conditions de course à pied (7.9 ± 1.3 , 8.1 ± 1.9 et 7.1 ± 2.9 mmol.l⁻¹, respectivement après PL, PC et PV. De façon similaire, aucune variation significative dans les valeurs de RPE ne fut trouvée entre les sessions de courses à pied (18 ± 1 , 18 ± 1 et 19 ± 1 respectivement après PL, PC et PV).

Tableau 1.

Paramètres	Conditions	Section 1 km 1-3	Section 2 km 4-6	Section 3 km 7-10	Section 4 km 11-14	Section 5 km 15-17	Section 6 km 18-20
$\dot{V}O_2$ (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	PC	48.4 (5.5)	51.4 (5.5)	49.8 (4.1)	49.0 (4.1)	48.2 (3.5)	48.5 (3.6)
	PL	50.3 (3.8)	53.6 (4.1)	52.0 (4.1)	50.4 (4.6)	48.4 (4.5)	48.9 (4.3)
	PV	52.6 (3.2)*	49.7 (4.4) [†]	50.5 (4.4)*	47.0 (4.0)	45.2 (4.2) [§]	49.8 (3.2)
FC (batt.min ⁻¹)	PC	164 (12) [‡]	173 (11)	175 (11)	175 (12)	174 (12)	174 (10)
	PL	160 (13) [‡]	169 (13)	171 (12)	172 (12)	172 (12)	173 (12)
	PV	165 (12)	162 (13)	170 (10) [#]	167 (10) [#]	163 (11)	174 (10) [‡]
$\dot{V}_E$ (L.min ⁻¹)	PC	116.2 (12.0) [‡]	132.4 (9.8)	134.9 (8.8)	137.8 (11.1)	139.7 (12.5)	141.3 (12.8)
	PL	125.8 (18.9) [‡]	139.3 (16.6)	139.5 (16.0)	143.9 (15.6)	140.4 (15.2)	139.3 (16.3)
	PV	152.2 (18.7)* [#]	134.6 (20.0) [†]	151.8 (11.2)* [#]	140.5 (14.9) [†]	127.1 (13.0)	165.6 (14.6) [‡]

TABLEAU 1. Changements des valeurs de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), de la fréquence

cardiaque (FC) et du débit expiratoire ($\dot{V}_E$) pendant les 3 épreuves de cyclisme à différentes distances par section (S1-S6) (moyennes (ET)).

* significativement différent des sections 4 et 5 pendant la même condition, $p < 0.05$.

[†] significativement différent des sections 5 pendant la même condition, $p < 0.05$.

[§] significativement différent de la section 6 pendant la même condition, $p < 0.05$.

[‡] significativement différent des autres sections pendant la même condition, $p < 0.05$.

[#] significativement différent de la section 2 pendant la même condition, $p < 0.05$.

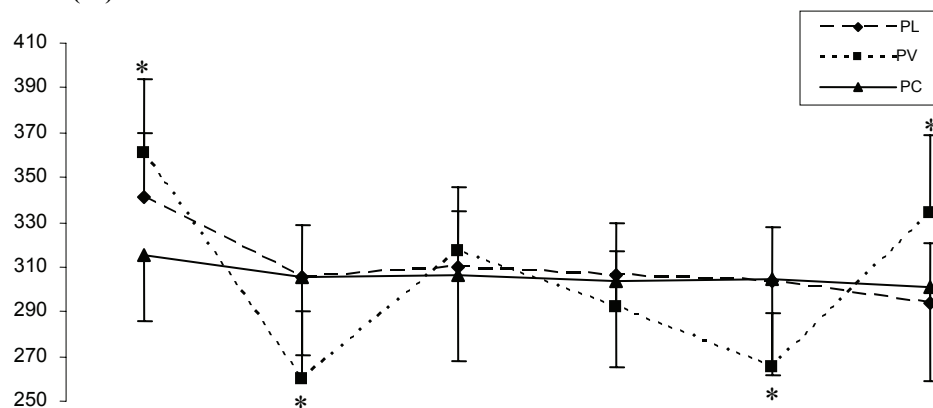
Tableau 2.

Paramètres	Conditions	Section 1 km 0.5	Section 2 km 1	Section 3 km 2	Section 4 km 3	Section 5 km 4	Section 6 km 5
$\dot{V}O_2$ (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	PC	42.5 (4.6) [‡]	52.2 (5.5)	53.0 (5.9)	53.4 (5.3)	53.1 (5.2)	54.1 (5.3)
	PL	42.7 (5.1) [‡]	48.0 (8.2)	51.7 (5.6)	52.3 (6.1)	52.4 (6.3)	52.4 (6.7)
	PV	42.6 (4.9) [‡]	49.9 (6.6)	51.5 (6.1)	53.1 (6.8)	53.0 (6.4)	54.4 (5.9)
FC (batt.min ⁻¹)	PC	169 (10) [‡]	179 (08)	179 (09)	180(09)	181 (09)	185 (08)
	PL	172 (13) [‡]	180(10)	180 (10)	181 (10)	182 (10)	184 (09)
	PV	165 (13) [‡]	174 (12)	175 (10)	176 (09)	177 (09)	184 (08)
$\dot{V}_E$ (L.min ⁻¹)	PC	124.9 (15.7) [‡]	147.7 (19.4)	148.8 (18.8)	147.8 (19.3)	149.9 (17.9)	159.8 (15.7)
	PL	126.8 (14.9) [‡]	147.3 (15.2)	144 (16.6)	146.7 (16.1)	148.7 (14.7)	154.9 (18.2)
	PV	136.7 (16.2)	147.1 (15.6)	145.7 (15.8)	147.2 (18.9)	147.4 (19.0)	159.9 (14.8) [‡]

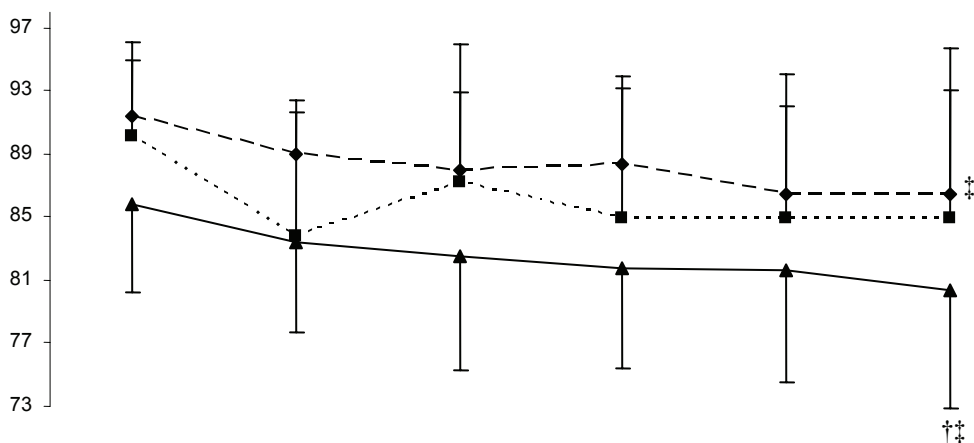
TABLEAU 2. Changements des valeurs de la consommation d’oxygène ($\dot{V}O_2$), de la fréquence cardiaque (FC) et du débit expiratoire ($\dot{V}_E$) pendant les épreuves de course à pied réalisées après les 3 épreuves de cyclisme (moyennes (ET)).
[‡] significativement différent des autres sections pendant la même condition, p<0.05.

Figure 17.

Puissance (W)



Cadence (rév.min⁻¹)



Vitesse (km.h⁻¹)

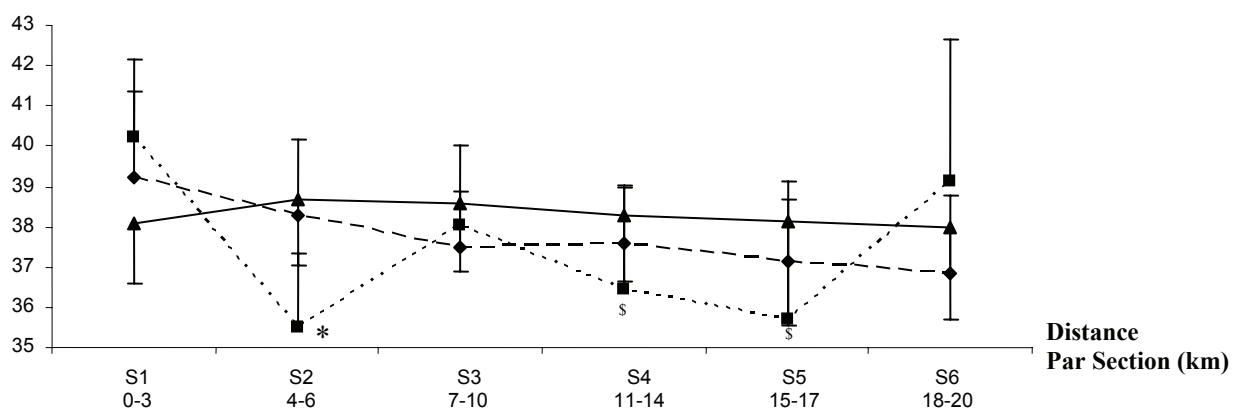


FIGURE 17. Variations de la puissance de sortie, de la cadence et de la vitesse pendant les 3 épreuves de cyclisme. Les valeurs sont moyennées ($\pm$ ET).

* significativement différent des conditions de cyclisme PL et PV à la même période, $p < 0.05$.

^s significativement différent de la condition PC à la même période de temps ($p < 0.05$).

† significativement différent de la partie cycliste PL ($p < 0.05$).

‡ significativement différent de la section 1 ($p < 0.05$).

Figure 18.

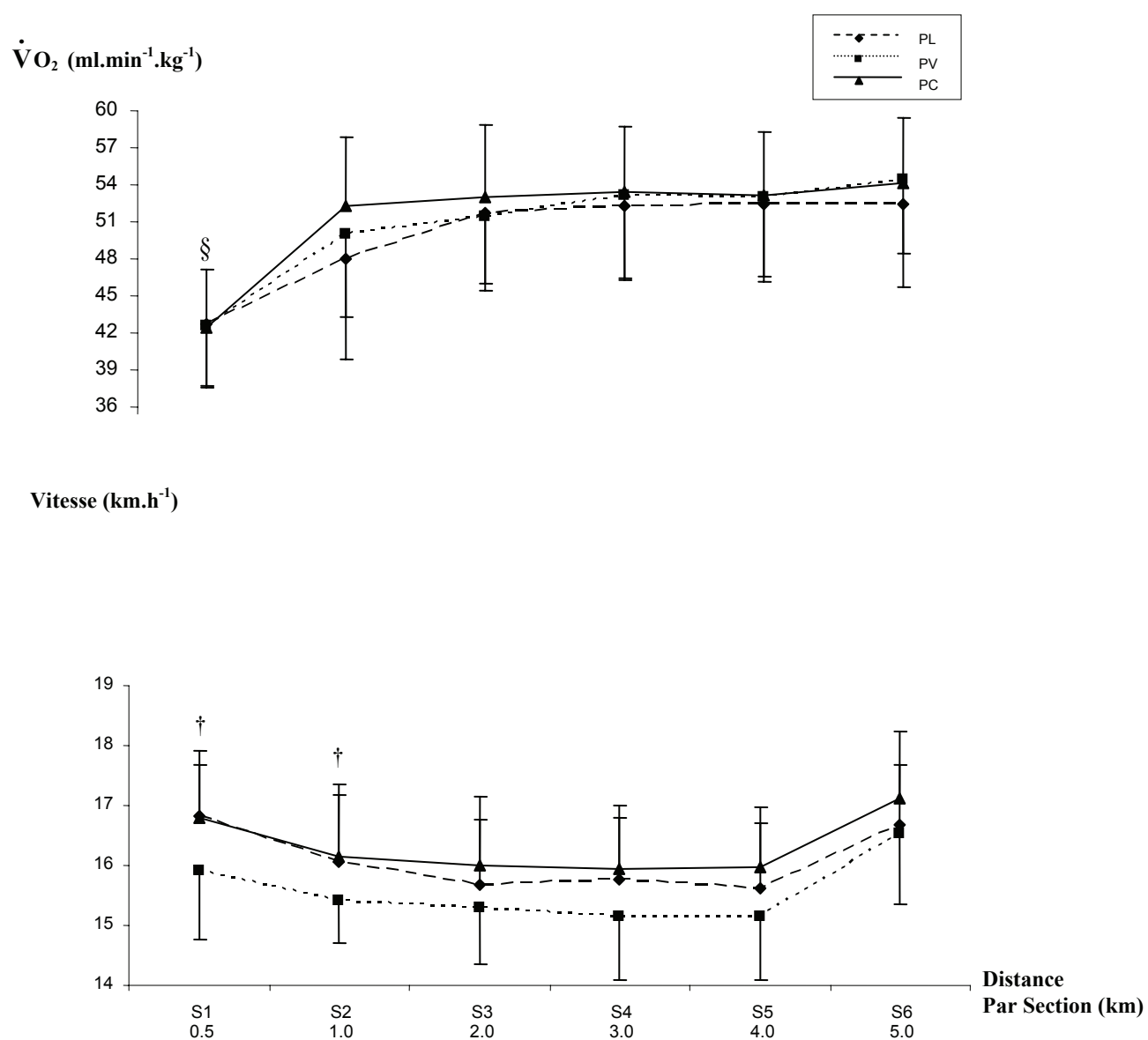


FIGURE 18. Changements de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et de la vitesse pendant les épreuves de course à pied après les 3 conditions de cyclisme. Les valeurs sont moyennées ($\pm$ ET)

§ significativement différent des autres sections indépendamment de la condition ($p < 0.05$).

† significativement différent des sections 3,4 and 5 pendant les parties cyclistes PL et PC ($p < 0.05$).

DISCUSSION GENERALE

ET

PERSPECTIVES

SCIENTIFIQUES

Discussion

Les résultats obtenus dans des travaux antérieurs réalisés à allure libre par des sujets de haut niveau ne rendent pas compte de toutes les situations rencontrées en compétition. Aujourd'hui lors des compétitions de duathlon et de triathlon de niveaux national et international, l'autorisation de rouler en groupe (*i.e.* "*drafting*") permet une économie d'énergie en vue de la dernière épreuve. Hausswirth et coll. (1999), ont montré que l'usage du *drafting* permettait de minimiser la charge métabolique pendant l'épreuve de cyclisme et de réaliser une meilleure performance lors de la course à pied subséquente chez des triathlètes élites. Les compétitions internationales sont caractérisées, à l'image des courses cyclistes, par des variations aléatoires de l'intensité. Ces variations sont dépendantes de choix stratégiques, et de facteurs environnementaux (*i.e.* parcours vallonnés, virages) et se traduisent par des fluctuations des paramètres physiologiques lors de l'épreuve de cyclisme.

Les principaux résultats de cette étude indiquent qu'un exercice de 20-km de cyclisme effectué à Puissance Constante (PC) améliore significativement la performance réalisée lors d'une course à pied subséquente de 5-km, en comparaison avec les conditions où les triathlètes réalisaient l'exercice de cyclisme à Puissance Libre (PL) ou à Puissance Variable (PV). Des hypothèses métabolique et musculaire sont avancées afin de tenter d'expliquer les différences observées lors des diverses combinaisons Vélo – Course à pied (V-C) pour notre groupe de triathlètes bien entraînés.

Une donnée intéressante de ce travail concerne les différences de performance en course à pied entre les sessions V-C, malgré des réponses physiologiques (*i.e.* $\dot{V}O_2$, $\dot{V}_E$, FC et $[La^-]$) et des valeurs de RPE identiques observées lors des exercices cyclistes effectués à PC (~80% PMA) et PV (de 68 à 92% de PMA, figure 17). Il a été précédemment proposé que les

différences de temps de course puissent être reliées à des changements d'énergie métabolique, d'une source aérobie à une source anaérobie (Brandon et al., 1995)). Ainsi, l'analyse des variations de $\dot{V}O_2$ a souvent été utilisée pour évaluer ces changements de contribution énergétique, d'une source aérobie à une source anaérobie, lors d'exercices isolés et combinés (Bernard et al., 2003 ; Bishop et al., 2002). Dans le contexte d'enchaînement V-C, Hausswirth et al. (1999) ont suggéré que les changements au niveau des contributions aérobies constituaient des facteurs limitants potentiels à la performance en course à pied. Ces auteurs ont constaté une fraction significativement plus élevée de $\dot{V}O_{2max}$ lors d'une épreuve de course à pied conduite sous forme de performance et après un exercice de cyclisme en position abritée chez des triathlètes élites, suggérant qu'une plus haute contribution aérobie pouvait être reliée au temps de course le plus rapide. Cependant, Vercruyssen et al. (2005) ont montré récemment des réponses de $\dot{V}O_2$ identiques lors de sessions de courses à pied exhaustives entre différents enchaînements V-C, indiquant que les différences dans les temps de course n'étaient pas expliquées par des changements d'énergie métabolique, du système aérobie au système anaérobie. Dans l'étude actuelle, il n'y avait également aucune différence significative concernant les réponses de $\dot{V}O_2$ lors des trois conditions de course (figure 18). Ainsi, nos données, et celles rapportées dans l'étude précédente (Vercruyssen et al., 2005), suggèrent qu'une réponse modifiée de $\dot{V}O_2$ ne serait pas en mesure d'expliquer les différences observées dans la performance en course à pied enchaînée après différentes stratégies cyclistes.

Les différences au niveau des performances en course à pied sur 5-km pourraient être expliquées par la puissance sélectionnée lors des exercices cyclistes. En comparaison aux sessions réalisées à PC et PL, nos triathlètes ont supporté une très haute puissance (~92% PMA) durant les trois derniers kilomètres de celle effectuée à PV et aucun changement dans

la contribution énergétique des sources aérobie et anaérobie (e.g. variations de $\dot{V}O_2$) lors de cette période ne pourrait affecter la capacité des sujets une course à pied plus rapide. En complément, Bishop et al. (2002) ont montré que l'utilisation de $[La^-]$ était l'une des meilleures variables pour refléter la contribution anaérobie d'un exercice, laquelle pourrait être plus importante lors de la session effectuée à puissance variable. Dans cette étude, aucune différence au niveau des valeurs de $\dot{V}O_2$ (tableau 1) et $[La^-]$ n'a été observée à l'issue des exercices cyclistes, indiquant aucune variation dans les demandes aérobie et anaérobie entre les trois allures de cyclisme réalisées avant la course à pied. Ces résultats sont identiques à ceux relevés par Liedl et al. (1999) constatant des valeurs de $[La^-]$ et $\dot{V}O_2$ similaires à la fin d'exercices de cyclisme réalisés à puissance constante vs. puissance variable. Ainsi, l'amélioration du temps de course après les parties cyclistes effectuées à PL et à PC comparées à celle réalisée à PV ne peut pas être expliquée par les réponses métaboliques induites lors de ces exercices cyclistes. Nos observations rapportées durant un enchaînement V-C sont en accord avec ceux de Palmer et al. (1997) qui ont montré une amélioration de la performance cycliste réalisée à la suite d'un exercice prolongé à puissance constante chez des cyclistes, comparé à un exercice effectué à intensité stochastique (i.e. variable). Dans ces deux études, durant les dix dernières minutes de l'exercice à intensité variable, les sujets maintenaient de hautes puissances (~300-350 W) avant l'exercice suivant à enchaîner. En conséquence, les différentes augmentations de l'intensité en cyclisme lors de l'épreuve réalisée à PV, et tout spécialement lors des dernières minutes, devraient aboutir à une fatigue musculaire avant la course à pied. Bien qu'aucune analyse spécifique des paramètres musculaires n'ait été conduite dans cette étude, le changement d'activité neuromusculaires des muscles squelettiques périphériques nous apparaît donc comme une hypothèse attractive afin d'expliquer la diminution de performance en course à pied après la partie cycliste effectuée à PV. Les implications des muscles des membres inférieurs comme le rectus femoris

, le vastus lateralis, le vastus medialis et le soleus ont été rapportés comme étant considérablement recrutés en cyclisme (Citterio et al., 1984 ; Marsh et Martin, 1995) et course à pied (Borrani et al., 2001) suggérant qu'aucun changement dans le recrutement de ces muscles lors d'un exercice préalable de cyclisme ne pourrait affecter la performance en course à pied.

Lors d'exercices cyclistes réalisés dans un état de non-fatigue, une augmentation de l'activité des muscles quadriceps et soleus (à partir de la méthode EMG) a été observée avec l'augmentation de la puissance (Citterio et al., 1984 ; Marsh et Martin, 1995). On peut penser que pendant les augmentations répétées de la puissance délivrée dans la situation PV en cyclisme, il y a un meilleur recrutement des unités motrices de ces muscles, ainsi que des changements associés de leurs propriétés contractiles, résultant d'une augmentation du niveau de fatigue musculaire lors de la course à pied subséquente. Basée sur cette même hypothèse, la plus faible activité des muscles périphériques après PL et PC pourrait réduire le niveau de fatigue au cours de la partie cycliste et améliorer ainsi leur utilisation lors d'une course à pied subséquente, menant à de plus hautes vitesses de courses du premier kilomètre (figure 18). Dans ce contexte, Duc et al. (2005) n'ont observé aucun changement au niveau de l'activité musculaire de quatre muscles des membres inférieurs (e.g. vastus medialis, rectus femoris) lors d'un exercice cycliste constant de 30-min à une allure libre choisie par les sujets. Le manque d'augmentation de l'activité EMG des muscles suggèrent que les sujets ont effectué le contre la montre dans un état stable de travail musculaire.

Des variables complémentaires comme la cadence de pédalage ont été rapportées comme affectant la performance en course à pied. Par exemple, Gottshall et Palmer (2002) ont constaté qu'une cadence de pédalage élevée (> 100 rpm), comparée à une sélection de cadences plus faibles (70-90 rpm), immédiatement avant la course à pied augmentait la fréquence de foulées et, en conséquence, augmentait la vitesse de course. Ces auteurs ont

suggéré que la combinaison des effets de générateur centraux devait contribuer aux différences de performance en course à pied. Au contraire, Vercruyssen et al. (2005) ont constaté que la sélection d'une faible cadence de pédalage (~ 75 rpm) comparée à de plus hautes cadences (95-110 rpm) lors des dix dernières minutes de cyclisme améliore manifestement la durée à l'épuisement de la course à pied subséquente. Cette amélioration de la performance en course à pied après l'exercice cycliste effectué à faible cadence a été reliée à l'hypothèse d'une plus faible fatigue musculaire ressentie lors des dernières minutes de cyclisme. Dans l'étude actuelle, l'amélioration de la performance en course à pied après la partie cycliste réalisée à PC, comparée à celle effectuée à PL, pourrait être partiellement expliquée par la sélection d'une plus faible cadence lors des trois derniers kilomètres de cyclisme (figure 17) et de son impact positif sur le délai de développement de la fatigue. A cause du manque d'analyse spécifique des paramètres musculaires au cours des exercices cyclistes, cette hypothèse a besoin d'être validée par de futures recherches se concentrant sur le rôle que jouent la puissance et la cadence lors des derniers kilomètres de cyclisme et sur la performance de la course à pied subséquente.

En conclusion, cette étude indique que la sélection d'une puissance constante durant l'exercice cycliste améliore la performance d'une course à pied subséquente. D'autres recherches sont nécessaires pour analyser la relation entre l'activité neuromusculaire et la performance au cours d'un enchaînement V-C. D'un point de vue pratique, la meilleure stratégie d'allure en cyclisme chez les triathlètes (indépendamment de la catégorie d'athlètes) serait de maintenir une puissance constante sur une route plate, plutôt qu'une puissance variable, le plus longtemps possible avant la course à pied.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Ackland, T.R., Blanksby, B.A., Landers, G., & Smith, D. (1998). Anthropometric profiles of elite triathletes. *Journal of Science and Medicine in Sport* **1**, 53-56.

Alexander, RM (1991). Energy saving mechanism in walking and running. *Journal of Experimental Biology* **160**, 55-69.

Anderson, T. (1996). Biomechanics and running economy. *Sports Medicine* **22(2)**, 76-89.

Ansley, L., Schabert, E., St Clair Gibson, A., Lambert, I., & Noakes, T.D. (2004). Regulation of pacing strategies during successive 4-km time trials. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **36(10)**, 1819-1825.

Ariyoshi, M., Yamaji, K., & Shepard, R.J. (1979). Influence of running pace upon performance : effects upon treadmill endurance time and oxygen cost. *European Journal of Applied Physiology* **41**, 83-91.

Armon, Y., Cooper, D.M., Flores, R., Zanconato, S., & Barstow, T.J. (1991). Oxygen uptake dynamics during high-intensity exercise in children and adults. *Journal of Applied Physiology* **70(2)**, 841-848.

Åstrand, P.O., & Ryhming, I. (1954). A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *Journal of Applied Physiology* **7(2)**, 218-221.

Åstrand, P.O., & Englesson, S. (1972). A swimming flume. *Journal of Applied Physiology* **33(4)**, 514.

Åstrand, P.O., & Rodahl, K. (1986). Textbook of work physiology. *New York : McGraw-Hill Book Company*, 405-573.

Atkinson, G., & Brunskill, A. (2000). Pacing strategies during a cycling time trial with simulated headwinds and tailwinds. *Ergonomics* **43(10)**, 1449-1460.

Balmer, J., Davidson, C.R., Coleman, D.A., & Bird, S.R. (2000). The validity of power output recorded during exercise performance tests using a Kingcycle air-braked cycle ergometer when compared with an SRM powermeter. *International Journal of Sports Medicine* **21(3)**, 195-199.

Banister, E.W. & Jackson, R.C. (1967). The effect of speed and load changes on oxygen intake for equivalent power outputs during bicycle ergometry. *Arbeitsphysiology* **24(4)**, 284-290.

Beaver, W.L., Wasserman, K., & Whipp, B.J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology* **60(6)**, 2020-2027.

- Belli, A., Avela, J., & Komi, P.V. (1993). Mechanical energy assessment with different methods during running. *International Journal of Sports Medicine* **14**(5), 252-256.
- Bentley, D.J., Millet, G.P., Vleck, V.E., & McNaughton, L.R. (2002). Specific aspects of contemporary triathlon. *Sports Medicine* **32**(7), 1-15.
- Bergh, U., Sjödin, B., Forsberg, A., & Svedenhag, J. (1991). The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **23**(2), 205-211.
- Bergmeyer, H.U. (1974). Methods of enzymatic analysis. *Academic Press, New York*, 1300.
- Bernard, T., Vercruyssen, F., Grego, F., Hausswirth, C., Lepers, R., Vallier, J-M. & Brisswalter, J. (2003). Effect of cycling cadence on subsequent 3 km running performance in well trained triathletes. *British Journal of Sports Medicine* **37**(2), 154-158.
- Billat, V.L., Slawinski, J., Danel, M., Koralsztein, J.P. (2001). Effect of free versus constant pace on performance and oxygen kinetics in running. *Medicine Science in Sports and Exercise* **33**(12), 2082-2088.
- Bobbert, A.C. (1960). Physiological comparison of three types of ergometry. *Journal of Applied Physiology* **15**, 1007-1014.
- Bohnert, B., Ward, S.A., & Whipp, B.J. (1998). Effects of prior arm exercise on pulmonary gas exchange kinetics during high-intensity leg exercise in humans. *Experimental Physiology* **83**(4), 557-570.
- Boone, T. & Kreider, R.B. (1986). Bicycle exercise before running : effect on performance. *Annals of Sports Medicine* **3**(1), 25-29.
- Böning, D., Gönen, Y., & Maassen, N. (1984). Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness. *International Journal of Sports Medicine* **5**(2), 92-97.
- Borg, G.A. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation and Medicine* **2**(2), 92-98.
- Bourdin, M., Pastene, J., Germain, M., & Lacour, J.R. (1993). Influence of training, sex, age and body mass on the energy cost of running. *European Journal of Applied Physiology* **66**(5), 439-444.
- Bourdin, M., Belli, A., Arsac, L.M., Bosco, C. & Lacour, J.R. (1995). Effect of vertical loading on energy cost and kinematics of running in trained male subjects. *Journal of Applied Physiology* **79**(6), 2078-2085.

Brisswalter, J., Hausswirth, C., Smith, D., Vercruyssen, F., & Vallier, J-M. (2000). Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during cycling: effect of exercise duration. *International Journal of Sports Medicine* **21(1)**, 60-64.

Brueckner, J.C., Atchou, G., Capelli, C., Duvallet, A., Barrault, D., Jousselin, E., Rieu, M., & di Prampero, P.E. (1991). The energy cost of running increases with the distance covered. *European Journal of Applied Physiology* **62**, 385-389.

Bunc, V., & Dlouha, R. (1997). Energy cost of treadmill walking. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* **37(2)**, 103-109.

Butts, N.K., Henry, B.A., & McLean, D. (1991). Correlations between $\dot{V}O_{2\max}$ and performance times of recreational triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* **31(3)**, 339-344.

Calbet, J.A., Chavarren, J., & Dorado, C. (2001). Running economy and delayed onset muscle soreness. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* **41**: 18-26.

Caltin, M.J., Dressendorfer, R.H. (1979). The effect of shoe weight on the energy cost of running. *Medicine and Science in Sports* **11**, 80.

Capelli, C., Rosa, G., Butti, F., Ferretti, G., Veicsteinas, A., & di Prampero, P.E. (1993). Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles. *European Journal of Applied Physiology* **67(2)**, 144-149.

Capelli, C., Schena, F., Zamparo, P., Dal Monte, A., Faina, M., & di Prampero, P.E. (1998). Energetics of best performances in track cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **30(4)**, 614-624.

Cavagna, G.A. (1977). Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. *Exercise in Sport Science* **5**, 89-129.

Cavagna, G.A., & Kaneko, M. (1977). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *Journal of Physiology* **268(2)**, 467-481.

Cavanagh, P.R., Pollock, M.J., & Landa, J. (1977). A biomechanical comparison of elite and good distance runners. *Annals of the New York Academy of Science* **301**, 328-345.

Cavanagh, P.R., & Williams, K.R. (1982). The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **14(1)**, 30-35.

Cavanagh, P.R. & Kram, R. (1985). Mechanical and muscular factors affecting the efficiency of human movement. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **17(3)**, 326-331.

Chavarren, J., & Calbet, J.A. (1999). Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *European Journal of Applied Physiology* **80**(6), 555-563.

Coast, J.R. & Welch, H.G. (1985). Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology* **53**(4), 339-342.

Costill, D.L. (1972). Physiology of marathon running. *Journal of American Medical Association* **221**(9), 1024-1029.

Costill, D.L., Thomason, H., & Roberts, E. (1973). Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **5**(4), 248-252.

Coyle, E.F., Coggan, A.R., Hopper, M.K., & Walters, T.J. (1988). Determinants of endurance in well-trained cyclists. *Journal of Applied Physiology* **64**(6), 2622-2630.

Coyle, E.F., Feltner, M.E., Kautz, S.A., Hamilton, M.T., Montain, S.J., Baylor, A.M., Abraham, L.D., & Petrek, G.W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **23**(1), 93-107.

Coyle, E.F., Sidossis, L.S., Horowitz, J.F., & Beltz, J.D. (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibres. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **24**(7), 780-782.

Coyle, E.F. (1995). Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exercise in Sport Science* **23**, 25-63.

Craig, M.W., Mitchell, V.A., Fields, K.B., Cooper, T.R., Hopewell, R., & Morgan, D.W. (1996). The association between flexibility and running economy in sub-elite male distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **28**(6), 737-743.

Crow, M.T., & Kushmerick, M.J. (1982). Chemical energetics of slow-and-fast twitch muscles of the mouse. *Journal of General Physiology* **79**(1), 147-166.

Daniels, J.T. (1985). A physiologist's view of running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **17**(3), 332-338.

Danner, T., & Plowman, S.A. (1995). Running economy following an intense cycling bout in female duathletes and triathletes. *Women in Sport and Physical Activity Journal* **3**, 29-39.

Davies, C.T. (1980). Influence of air flow and skin temperature on sweating at the onset, during and following exercise. *Ergonomics* **23**(6), 559-569.

Davis, J.A. (1985). Anaerobic threshold : review of the concept and directions for future research. *Medicine and Science in Sports* **17**, 6-21.

De Koning, J.J., Bobbert, M.F., & Foster, C.(1999). Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *Journal of science and medicine in sport* **2(3)**, 266-277.

Dengel, D.R., Flynn, M.G., Costill, D.L., & Kirwan, J.P. (1989). Determinants of success during triathlon competition. *Research Quarterly* **60(3)**, 234-238.

Dennis, S.C, & Noakes, T.D. (1999). Advantages of a smaller bodymass in humans when distance-running in warm, humid conditions. *European Journal of Applied Physiology* **79(3)**, 280-284.

De vito, G., Bernardi, M., Sproviero, E., & Figura, F. (1995). Decrease of endurance performance during olympic triathlon. *International Journal of Sports Medicine* **16(1)**, 24-28.

Di Prampero, P.E., Cortili, G., Mognoni, P., & Saibene, F. (1976). Energy cost of speed skating and efficiency of work against air resistance. *Journal of Applied Physiology* **40(4)**, 584-591.

Di Prampero, P.E., Cortili, G., Mognoni, P., & Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *Journal of Applied Physiology* **47(1)**, 201-206.

Di Prampero, P.E. (1986). The energy cost of locomotion on land and in water. *International Journal of Sports Medicine* **7(2)**, 55-72.

Dill, D.B. (1965). Oxygen used in horizontal and grade walking and running on the treadmill. *Journal of Applied Physiology* **20**, 19-22.

Duc S, Betik AC, & Grappe F. (2005) EMG activity does not change during a time trial in competitive cyclists. *International Journal of Sports Medicine* **26**, 145-50.

Durnin, J.V., & Rahaman, M.M. (1967). The assessment of the amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness. *British Journal of Nutrition* **21(3)**, 681-689.

Epstein, Y., Stroschein, L.A., & Pandolf, K.B. (1987). Predicting metabolic cost of running with and without backpack loads. *European Journal of Applied Physiology* **56(5)**, 495-500.

Ericson, M.O., Nisell, R., Arborelius, U.P., & Ekholm, J. (1985). Muscular activity during ergometer cycling. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine* **17(2)**, 53-61.

Ericson, M.O., Bratt, A., Nisell, R., Arborelius, U.P., Ekholm, J. (1986). Power output and work in different muscle groups during ergometer cycling. *European Journal of Applied Physiology* **55(3)**, 229-235.

Faria, I.E. (1992). Energy expenditure, aerodynamics and medical problems in cycling : an update. *Sports Medicine* **14(1)**, 43-63.

Fitts, R.H., Costill, D.L., & Gardetto, P.R. (1989). Effect of swim exercise training on human muscle fiber function. *Journal of Applied Physiology* **66(1)**, 465-475.

Foley, J.P., Bird, S.R., & White, J.A. (1989). Anthropometric comparisons of cyclists from different events. *British Journal of Sports Medicine* **23**, 30-33.

Foster, C., Snyder, A.C., Thompson, N.N., Green, M.A., Foley, M., Schragar, M. (1993). Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **25(3)**, 383-388.

Francescato, M.P., Girardis, M., di Prampero, P.E. (1995). Oxygen cost of internal work during cycling. *European Journal of Applied Physiology* **72(1-2)**, 51-57.

Gaesser, G.A. & Brooks, G.A. (1975). Muscular efficiency during steady-rate exercise : effects of speed and work rate. *Journal of Applied Physiology* **38(6)**, 1132-1139.

Garside, I. & Doran, D.A. (2000). Effects of bicycle frame ergonomics on triathlon 10-km running performance. *Journal of Sports Sciences* **18(10)**, 833.

Gausche, M.A., Harmon, T., Lamarra, N., & Whipp, B.J. (1989). Pulmonary O₂ uptake kinetics in humans are speeded by a bout of prior exercise above, but not below, the lactate threshold. *Journal of Physiology* **417**, 138.

Gerbino, A., Ward, S.A., & Whipp, B.J. (1996). Effects of prior exercise on pulmonary gas-exchange kinetics during high-intensity exercise in humans. *Journal of Applied Physiology* **80(1)**, 99-107.

Givoni, B., & Goldman, R.F. (1971). Predicting metabolic energy cost. *Journal of Applied Physiology* **30(3)**, 429-433.

Gnehm, P., Reichenbach, S., Altpeter, E., Widmer, H., & Hoppeler, H. (1997). Influence of different racing positions on metabolic cost in elite cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **29(6)**, 818-823.

Goldman, R.F., & Iampietro, P.F. (1962). Energy cost of load carriage. *Journal of Applied Physiology* **17**, 675-676.

Gotshall, R.W., Bauer, T.A., & Fahmer, S.L. (1996). Cycling cadence alters exercise hemodynamics. *International Journal of Sports Medicine* **17**(1), 17-21.

Gottschall, J.S. & Palmer, B.M. (2002). The acute effects of prior cycling cadence on running performance and kinematics. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **34**(9), 1518-1522.

Grappe, F., Candau, R.B., Belli, A., & Rouillon, J.D. (1997). Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics* **40**(12), 1299-1311.

Grappe, F., Candau, R.B., Busso, T., & Rouillon, J.D. (1998). Effect of cycling position on ventilatory and metabolic variables. *International Journal of Sports Medicine* **19**(5), 336-341.

Grappe, F., Candau, R.B., Barbier, B., Hoffman, M.D., Belli, A., & Rouillon, J.D. (1999). Influence of tire pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and simulated cycling performance. *Ergonomics* **10**, 1361-1371.

Guézennec, C.Y., Vallier, J.-M., Bigard, A.X., & Durey, A. (1996). Increase in energy cost of running at the end of a triathlon. *European Journal of Applied Physiology* **73**(5), 440-445.

Hagberg, J., & McCole, S. (1996). Energy expenditure during bicycling. In: Burke, E.R. (Ed). *High tech cycling. Champaign, IL: Human Kinetics*, 167-184.

Hamley, E.J., & Thomas, V. (1967). Physiological and postural factors in the calibration of the bicycle ergometer. *Journal of Applied Physiology* **19**(2), 55P-56P.

Hauswirth, C., Bigard, A.X., Berthelot, M., Thomaïdis, M., & Guézennec, C.Y. (1996). Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *International Journal of Sports Medicine* **17**(8), 572-579.

Hauswirth, C., Bigard, A.X., & Guézennec, C.Y. (1997a). Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *International Journal of Sports Medicine* **18**(5), 330-339.

Hauswirth, C., Bigard, A.X., & Le Chevalier, J.M. (1997b). The cosmed K4 telemetry system as an accurate device for oxygen uptake measurements during exercise. *International Journal of Sports Medicine* **18**(6), 449-453.

Hauswirth, C. & Brisswalter, J. (1999). Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée : étude des paramètres d'influence. *Sciences et Sports* **14**, 59-70.

Hauswirth, C., Lehénaff, D., Dréano, P., & Savonen, K. (1999). Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **31**(4), 599-604.

Hauswirth, C. & Lehénaff, D. (2001). Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Medicine* **31**(9), 679-689.

Hauswirth, C., Vallier, J-M., Lehénaff, D., Brisswalter, J., Smith, D., Millet, G., & Dreano, P. (2001). Effect of two drafting modalities in cycling on running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **33**(3), 1-8.

Heil, D.P., Wilcox, A.R., & Quinn, C.M. (1995). Cardiorespiratory responses to seat-tube angle variation during steady-state cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **27**(5), 730-735.

Heil, D.P., Derrick, T.R., & Whittlesey, S. (1997). The relationship between preferred and optimal positioning during submaximal cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology* **75**(2), 160-165.

Hinrichs, R.N. (1990). Upper extremity function in distance running. In: Cavanagh, P.R. editor. *Biomechanics of distance running Champaign (IL): Human Kinetics*, 107-134.

Holly, R.G., Barnard, R.J., Rosenthal, M., Applegate, E., & Pritikin, N. (1986). Triathlete characterization and response to prolonged strenuous competition. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **18**(1), 123-127.

Holt, K.G., Hamill, J., & Andres, R.O. (1991). Predicting the minimal energy cost of human walking. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **23**(4), 491-498.

Horowitz, J.F., Sidossis, L.S., & Coyle, E.F. (1994). High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *International Journal of Sports Medicine* **15**(3), 152-157.

Howley, E.T., Basset, D.R. Jr., & Welch, H.G. (1995). Criteria for maximal oxygen uptake review and commentary. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **27**(9), 1292-1301.

Hue, O., Le Gallais, D., Chollet, D., Boussana, A., & Préfaut, C. (1998). The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes. *European Journal of Applied Physiology* **77**(1-2), 98-105.

Hue, O., Le Gallais, D., Boussana, A., Chollet, D., & Préfaut, C. (1999). Ventilatory responses during experimental cycle-run transition in triathletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **31**(10), 1422-1428.

Hue, O., Le Gallais, D., Chollet, D., & Préfaut, C. (2000). Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake in present triathletes. *Canadian Journal of Applied Physiology* **25**(2), 102-113.

Inbar, O., Dotan, R., Trousil, T., & Dvir, Z. (1983). The effect of bicycle crank-length variation upon power performance. *Ergonomics* **26**(12), 1139-1146.

Iuliano, S., Naughton, G., Collier, G., & Carlson, J. (1998). Examination of the self selected fluid intake practices by junior athletes during a simulated duathlon event. *International Journal of Sport Nutrition* **8**, 10-23.

Jones, B.H., Toner, M.M., Daniels, W.L., & Knapik, J.J. (1984). The energy cost and heart-rate response of trained and untrained subjects walking and running in shoes and boots. *Ergonomics* **27**(8), 895-902.

Jones, S.M., & Passfield, L. (1998). The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. In: *The Engineering of Sports*, S.J. Haake Sj (Ed). Oxford: Blackwell Science, 265-274.

Kaneko, M., Matsumoto, M., Ito, A., & Fuchimoto, T. (1987). Optimum step frequency in constant speed running. *Biomechanics X-B (Edited by Jonsson, B.)*, pp. 803-807. Human Kinetics Publishers, Champaign.

Kaneko, M. (1990). Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. *Journal of Biomechanics* **23**(suppl 1), 57-63.

Kohrt, W.M., Morgan, D.W., Bates, B., & Skinner, J.S. (1987a). Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling, and running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **19**(1), 51-55.

Kohrt, W.M., O'Connor, J.S., & Skinner, J.S. (1987b). Effects of reduced training on the physiological profiles of triathletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **19**(S48), 285.

Kohrt, W.M., O'Connor, J.S., & Skinner, J.S. (1989). Longitudinal assessment of responses by triathletes to swimming, cycling, and running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **21**(5), 569-575.

Kreider, R.B., Boone, T., Thompson, W.R., Burkes, S., & Cortes, C.W. (1988a). Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **20**(4), 385-390.

Kreider, R.B., Cundiff, D. J., Hammet, J.B., Cortes, C.W., & Williams, K.W (1988b). Effects of cycling on running performance in triathletes. *Annals of Sports Medicine* **3**, 220-225.

Kyle, C.R. (1979). Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners travelling in groups. *Ergonomics* **22**(4), 387-397.

Kyle, C.R., & Caiozzo, V.J. (1981). "Experiments in Human Ergometry", *Transactions, first international human-powered vehicle scientific symposium, Allan Abbott, ed. Anaheim, Calif*, **21**, 65-78.

Kyle, C.R., & Burke, E. (1984). Improving the racing bicycle. *Mechanical Engineering* **109**, 35-4.

Kyle, C.R., & Caiozzo, V.J. (1986). The effect of athletic clothing aerodynamics upon running speed. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **18(5)**, 509-515.

Kyle, C.R. (1988). The mechanics and aerodynamics of cycling. In Burke, E.R. (Ed): *Medical and scientific aspects of cycling, Human Kinetics Books, Champaign, III*, 235-251.

Lacour, J.R., Bouvat, E., & Barthelemy, J.C. (1990). Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *European Journal of Applied Physiology* **61(3-4)**, 172-176.

Lacour, J.R. (1996). Influence of body dimensions, sex and training on the energy cost of running. In: Marconnet, P., Saltin, B., Komi, P., & Poortmans, J. (Eds). *Human muscular function during dynamic exercise. Karger, Basel, Switzerland*, 32-43.

Lamarra, N., Whipp, B.J., Ward, S.A., & Wasserman, K. (1987). Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. *Journal of Applied Physiology* **62(5)**, 2003-2012.

Landers, G.J., Blanksby, B.A., Ackland, T.R., & Smith, D. (2000). Morphology and performance of world championship triathletes. *Annals of Human Biology* **27(4)**, 387-400.

Laurenson, N.M., Fulcher, K.Y. & Korkia, P. (1993). Physiological characteristics of elite and club level female during running. *International Journal of Sports Medicine* **14(8)**, 445-449.

Laursen, P.B., Rhodes, E.C., & Langill, R.H. (2000). The effects of 3000-m swimming on subsequent 3-h cycling performance : implications for ultraendurance triathletes. *European Journal of Applied Physiology* **83(1)**, 28-33.

Léger, L.A., & Ferguson, R.J. (1974). Effect of pacing on oxygen uptake and peak lactate for a mile run. *European Journal of Applied Physiology* **32**, 251-257.

Léger, L., & Mercier, D. (1984). Gross energy cost of horizontal treadmill and track running. *Sports Medicine* **1(4)**, 270-277.

Lepers, R., Bigard, A.X., Hausswirth, C., & Guézennec, C.Y. (1995). Modélisation de l'enchaînement natation-cyclisme d'un triathlon en laboratoire. Influence sur la cinétique de la lactatémie. *Science et Sports* **10**, 131-139.

- Lepers, R., & Hausswirth, C. (1997). Altération des performances neuro-musculaires après un exercice physique prolongé. Analyse comparée d'une épreuve de marathon et de triathlon. *Science et motricité* **34**, 37-43.
- Lepers, R., Hausswirth, C., Maffiuletti, N.A., Brisswalter, J., & Van Hoecke, J. (2000). Evidence of neuromuscular fatigue after prolonged cycling exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **32(11)**, 1880-1886.
- Lepers, R., Millet, G.Y., Maffiuletti, N.A., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2001). Effect of pedalling rates on physiological response during endurance cycling. *European Journal of Applied Physiology* **85(3-4)**, 392-395.
- Liedl, M.A., Swain, D.P., & Branch, J.D. (1999). Physiological effects of constant versus variable power during endurance cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **31(10)**, 1472-1477.
- Magel, J.R. (1970). Propelling force measured during tethered swimming in the four competitive swimming styles. *Research Quarterly for Exercise and Sport* **41(1)**, 68-74.
- Margaria, R., Cerretelli, P., Aghemo, P., & Sassi, G. (1963). Energy cost of running. *Journal of Applied Physiology* **18**, 367-370.
- Margaria, R., Aghemo, P., & Sassi, G. (1971). Lactic acid production in supra-maximal exercise. *Pflugers Archives : European Journal of Physiology* **326(2)**, 152-161.
- Margaritis, I. (1996). Facteurs limitants de la performance en triathlon. *Canadian Journal of Applied Physiology* **21(1)**, 1-15.
- Marino, F.E., Mbambo, Z., Kortekaas, E., Wilson, G., Lambert, M.I., Noakes, T.D., & Dennis, S.C. (2000). Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflugers Archiv : European Journal of Physiology* **441 (2-3)**, 359-367.
- Maron, M.B., Horvath, S.M., & Wilkerson, J.E. (1975). Acute blood biochemical alterations in response to marathon running. *European Journal of Applied Physiology* **34(3)**, 173-181.
- Marsh, A.P. & Martin, P.E. (1993). The association between cycling experience and preferred and most economical cadences. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **25(11)**, 1269-1274.
- Marsh, A.P., & Martin, P.E. (1995). The relationship between cadence and lower extremity EMG in cyclists and noncyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **27(2)**, 217-225.

Marsh, A.P. & Martin, P.E. (1997). Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **29**(9), 1225-1232.

Martin, P.E., Heise, G.D., & Morgan, D.W. (1993). Interrelationships between mechanical power, energy transfers, and walking and running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **25**(4), 508-515.

Martin, J.C., & Spirduso, W.W. (2001). Determinants of maximal cycling power: crank length, pedaling rate and pedal speed. *European Journal of Applied Physiology* **84**(5), 413-418.

McCole, S.D., Claney, K., Conte, J.C., Anderson, R., & Hagberg, J.M. (1990). Energy expenditure during bicycling. *Journal of Applied Physiology* **68**(2), 748-753.

McGruer, G., Montgomery, D.E., & McGill, D. (1988). Inclined treadmill running economy and uphill running performance. *Canadian Journal of Applied Physiology* **13**, 67-68.

McLaughlin, J.E, King, G.A., Howley, E.T., Bassett, D.R., & Ainsworth, B. (2001). Validation of the Cosmed K4 b2 portable metabolic system. *International Journal of Sports Medicine* **22**(4), 280-284.

Medbø, J.I., Mohn, A.C., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O., & Sejersted, O.M. (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *Journal of Applied Physiology* **64**(1), 50-60.

Ménard, M., Blanche, C., & Niepceron, G. (1990). Contribution à l'amélioration des performances du coureur cycliste. *Rapport Institution Aérotechnique de Saint-Cyr, Paris*, 288.

Millet, G.P., Millet, G.Y., Hofmann, M.D., & Candau, R.B. (2000). Alterations in running economy and mechanics after maximal cycling in triathletes : influence of performance level. *International Journal of Sports Medicine* **21**(2), 127-132.

Millet, G.P. & Vleck, V.E. (2000). Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run transition in Olympic triathlon: review and practical recommendations for training. *British Journal of Sports Medicine* **34**(5), 384-390.

Millet, G.P., Millet, G.Y., & Candau, R.B. (2001). Duration and seriousness of running mechanics alterations after maximal cycling in triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* **41**(2), 147-153.

Millet, G.P., & Candau, R.B. (2002). Facteurs mécaniques du coût énergétique dans trois locomotions humaines. *Science & Sports* **17**, 166-176.

- Millet, G.P., Tronche, C., Fuster, N., & Candau, R.B. (2002). Level ground and uphill cycling efficiency in seated and standing positions. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **34(10)**, 1645-1652.
- Minetti, A.E., Ardigo, L.P., & Saibene, F. (1994). Mechanical determinants of the minimum energy cost of gradient running in humans. *Journal of Experimental Biology* **195**, 211-225.
- Miura, H., Kitagawa, K., & Ishiko, T. (1997). Economy during a simulated laboratory test triathlon is highly related to Olympic distance triathlon. *International Journal of Sports Medicine* **18(4)**, 276-280.
- Miura, H., Kitagawa, K., & Ishiko, T. (1999). Characteristic feature of oxygen cost at simulated laboratory triathlon test in trained triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* **39(2)**, 101-106.
- Monod, H., & Flandrois, R. (1997). *Physiologie du sport*. Ed. Masson, 182-189.
- Naughton, G.A., Carlson, J.S., Iuliano, S., Gibbs, M., & Snow, R.J. (1998). Cardiorespiratory responses and circulating metabolite concentrations in male and female adolescents during a simulated duathlon. *International Journal of Sports Medicine* **19**, 303-309.
- Neptune, R.R., Kautz, S.A., & Hull, M.L. (1997). The effect of pedalling rate on coordination in cycling. *Journal of Biomechanics* **30(10)**, 1051-1058.
- Neptune, R.R. & Van den Bogert, A.J. (1998). Standard mechanical energy analyses do not correlate with muscle work in cycling. *Journal of Biomechanics* **31(3)**, 239-245.
- Neptune, R.R. & Hull, M.L. (1999). A theoretical analysis of preferred pedaling rate selection in endurance cycling. *Journal of Biomechanics* **32(4)**, 409-415.
- Nordeen-Snyder, K.S. (1977). The effect of bicycle seat height variation upon oxygen consumption and lower limb kinematics. *Medicine and Science in Sports* **9(2)**, 113-117.
- O'Toole, M.L., Hiller, D.B., Crosby, L.O., & Douglas, P.S. (1987). The ultraendurance triathlete: a physiological profile. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **19(1)**, 45-50.
- O'Toole, M.L. & Douglas, P.S. (1995). Applied physiology of a triathlon. *Sports Medicine* **19**, 251-267.
- O'Toole, M.L., Douglas, P.S., Laird, R.H. & Hiller, D.B. (1995) Fluid and electrolyte status in athletes receiving medical care at an ultradistance triathlon. *Clinical Journal of Sport Medicine* **5(2)**, 116-122.

Padilla, S., Mujika, I., Cuesta, G., & Goiriena, J. (1999). Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **31**(6), 878-885.

Palmer, G.S., Noakes, T.D., & Hawley, J.A. (1997). Effects of steady-state versus stochastic exercise on subsequent cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **29**(5), 684-687.

Palmer, G.S., Borghouts, L.B., Noakes, T., & Hawley, J.A. (1999). Metabolic and performance responses to constant-load vs. variable-intensity exercise in trained cyclists. *Journal of Applied Physiology* **87**, 1186-1196.

Pate, R.R., Macera, C.A., Bailey, S.P., Bartoli, W.P., & Powell, K.E. (1992). Physiological, anthropometric, and training correlates of running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **24**(10), **1128-1133**.

Patterson, R.P. & Moreno, M.I. (1990). Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **22**(4), 512-516.

Perrey, S., & Candau, R. (2002). Déterminants des différentes phases de la cinétique de la consommation d'oxygène chez l'homme. *Science et Sports* **17**, 220-233.

Pierrynowski, M.R., Winter, D.A., & Norman, R.W. (1980). Transfers of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency during treadmill walking. *Ergonomics* **23**(2), 147-156.

Poole, D.C., & Richardson, R.S. (1997). Determinants of oxygen uptake. Implications for exercise testing. *Sports Medicine* **24**(5), 308-320.

Pugh, L.G. (1971). The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *Journal of Physiology* **213**, 255-276.

Pugh, L.G. (1974). The relation of oxygen intake and speed in competition cycling and comparative observations on the bicycle ergometer. *Journal of Physiology* **241**, 795-808.

Pyne, D., Boston, T., Martin, D., & Logan, A. (2000). Evaluation of the lactate Pro blood lactate analyser. *European Journal of Applied Physiology* **82**, 112-116.

Quigley, E.J., & Richards, J.G. (1996). The effects of cycling on running mechanics. *Journal of Applied Biomechanics* **12**, 470-479.

Raasch, C.C., Zajac, F.E., Ma, B., & Levine, W.S. (1997). Muscle coordination of maximum-speed pedaling. *Journal of Biomechanics* **30**(6), 595-602.

Ramsay, R.L., DAVIES, P.D., & SHARP, N.C.C. (2001). The effect of variable power output during cycling on subsequent run performance in triathletes. *Medicine Science in Sports Exercice* **(33S)**, S341.

Rowell, L.B., Brengelmann, G.L., Murray, J.A., Kraning, K.K. 2nd, & Kusumi, F. (1969). Human metabolic responses to hyperthermia during mild to maximal exercise. *Journal of Applied Physiology* **26(4)**, 395-402.

Ryschon, T.W., & Stray-Gundersen, J. (1991). The effect of body position on the energy cost of cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **23(8)**, 949-953.

Ryschon, T.W., & Stray-Gundersen, J. (1993). The effect of tyre pressure on the economy of cycling. *Ergonomics* **36(6)**, 661-666.

Sargent, R. (1926). The relation between oxygen requirement and speed running. *Proc. of the royal society of London* **100**, 10-22.

Sargeant, A.J. & Dolan, P. (1987). Effect of prior exercise on maximal short-term power output in humans. *Journal of Applied Physiology* **63(4)**, 1475-1480.

Sargeant, A.J. (1994). Human power output and muscle fatigue. *International Journal of Sports Medicine* **15(3)**, 116-121.

Saltin, B., & Stenberg, J. (1964). Circulatory response to prolonged severe exercise. *Journal of Applied Physiology* **19**, 833-838.

Schabort, E.J., Hawley, J.A., Hopkins, W.G., Mujika, I., & Noakes, T.D. (1998). A new reliable laboratory test of endurance performance for road cyclists. *Medicine Science in Sports Exercice* **30 (12)**, 1744-1750.

Schneider, D.A., Lacroix, G.R., Atkinson, P.J., Troped, P.J., & Pollack, J. (1990). Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake during cycling and running in triathletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **22(2)**, **257-264**.

Schneider, D.A., & Pollack, J. (1991). Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake during cycling and running in female triathletes. *International Journal of Sports Medicine* **12(4)**, 379-383.

Seabury, J.J., Adams, W.C., & Ramey, M.R. (1977). Influence of pedalling rate and power output on energy expenditure during bicycle ergometry. *Ergonomics* **20(5)**, 491-498.

Sidossis, L.S., Horowitz, J.F., & Coyle, E.F. (1992). Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency. *International Journal of Sports Medicine* **13(5)**, 407-411.

Siler, W.L.(1993). Is running style and economy affected by wearing respiratory apparatus? *Medicine and Science in Sports Exercise* **25(2)**, 260-264.

Sleivert, G.G. & Wenger, H.A. (1993). Physiological predictors of short-course triathlon performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **25(7)**, 871-876.

Sleivert, G.G. & Rowlands, D.S. (1996). Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. *Sports Medicine* **22(1)**, 8-18.

Smith, D., Lee, H., & Pickard, R. (1999). Power demands of the cycle leg during elite triathlon competition. *2nd International Congress on triathlon, INSEP Paris* **30**.

Soule, R.G., Pandolf, K.B., & Goldman, R.F. (1978). Energy expenditure of heavy load carriage. *Ergonomics* **21(5)**, 373-381.

Sproule, J. (1998). Running economy deteriorates following 60 min of exercise at 80% $\dot{V}O_{2max}$. *European Journal of Applied Physiology* **77**, 366-371.

Staab, J.S., Agnew, J.W., & Siconolfi, S.F. (1992). Metabolic and performance responses to uphill and downhill running in distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **24**, 124-127.

Stainsby, W.N., Gladden, L.B., Barclay, J.K., Wilson, J.K. (1980). Exercise efficiency: validity of base-line substractions. *Journal of Applied Physiology* **48**, 518-522.

Swain, D.P. (1994). The influence of body mass in endurance bicycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **26(1)**, 58-63.

Swain, D.P. (1997). A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and in wind. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **29(8)**, 1104-1108.

Takaishi, T., Yasuda, Y., & Moritani, T. (1994). Neuromuscular fatigue during prolonged pedalling exercise at different pedalling rates. *European Journal of Applied Physiology* **69(2)**, 154-158.

Takaishi, T., Yasuda, Y., Ono, T., & Moritani, T. (1996). Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **28(12)**, 1492-1497.

Takaishi, T., Yamamoto, T., Ono, T., Ito, T., & Moritani, T. (1998). Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **30(3)**, 442-449.

Tanaka, H., Bassett, D.J., Best, S., & Baker, K. (1996). Seated versus standing cycling in competitive road cyclists: uphill climbing and maximal oxygen uptake. *Canadian Journal of Applied Physiology* **21**(2), 149-154.

Taylor, H.L., Buskirk, E., & Henschel, A. (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *Journal of Applied Physiology* **8**(1), 73-80.

Thorstensson, A., Nilsson, J., Carlson, H., & Zomlefer, M.R. (1984). Trunk movements in human locomotion. *Acta Physiologica Scandinavica* **121**(1), 9-22.

Trappe, T.A., Pease, D.L., Trappe, D.W., Troup, J.P., & Burke, E.R. (1996). Physiological responses to swimming while wearing a wet suit. *International Journal of Sports Medicine* **17**(2), 111-114.

Van der Walt, W.H., & Wyndham, C.H. (1973). An equation for prediction of energy expenditure of walking and running. *Journal of Applied Physiology* **34**(5), 559-563.

Van Ingen Schenau, G.J. & Cavanagh, P.R. (1990). Power equations in endurance sports. *Journal of Biomechanics* **23**(9), 865-881.

Vercruyssen, F., Hausswirth, C., Smith, D., & Brisswalter, J. (2001). Effet de la durée de l'exercice sur le choix d'une cadence optimale de pédalage chez des triathlètes. *Canadian Journal of Applied Physiology* **26**(1), 44-54.

Vercruyssen, F., Brisswalter, J., Hausswirth, C., Bernard, T., Bernard, O., & Vallier, J-M. (2002). Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **34**(3), 530-536.

Vercruyssen, F., Suriano, R., Bishop, D., & Brisswalter, J. (2005). Cadence selection affects metabolic responses during cycling and subsequent running time to fatigue. *British Journal of Sports Medicine* **39**, 267-272.

Wasserman, K., Whipp, B.J., Koyal, S.N., & Beaver, W.L. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of Applied Physiology* **35**(2), 236-243.

Whipp, B.J. & Wasserman, K. (1969). Efficiency of muscular work. *Journal of Applied Physiology* **26**(5), 644-648.

Widrick, J.J., Freedson, P.S., & Hamill, J. (1992). Effect of internal work on the calculation of optimal pedaling rates. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **24**(3), 376-382.

Williams, K.R., & Cavanagh, P.R. (1983). A model for the calculation of mechanical power during distance running. *Journal of biomechanics* **16**(2), 115-128.

Williams, K.R., & Cavanagh, P.R. (1986). Biomechanical correlates with running economy in elite distance runners. *Proceedings of the North American Congress on Biomechanics* 287-288.

Williams, K.R., & Cavanagh, P.R. (1987). Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology* **63**, 1236-1246.

Willis, W.T. & Jackman, MR.. (1994). Mitochondrial function during heavy exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **26(11)**, 1347-1354.

Winter, D.A. (1979). A new definition of mechanical work done in human movement. *Journal of Applied Physiology* **46(1)**, 79-83.

Winter, D.A. (1990). Mechanical work, energy, and power. In: *Winter, D.A. (Ed) Biomechanics and motor control of human movement*. Wiley, New York, 103-139.

Zhang, S., Meng, G., Wang, Y., & Li, J. (1992). Study of the relationships between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distance runners. *International journal of biometeorology* **36(2)**, 63-68.

Zhou, S., Robson, S.J., King, M.J., & Davie, A.J. (1997). Correlations between short-course triathlon performance and physiological variables determined in laboratory cycle and treadmill tests. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* **37(2)**, 122-130.

Zinkgraf, S.A., Jones, C.J., Warren, B., & Krebs, P.S. (1986). An empirical investigation of triathlon performance. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* **26**, 350-356.

GLOSSAIRE

UNITES

bpm	battements par minute
cm	centimètre
g	gramme
Hp	chevaux de puissance
Hz	hertz
J	Joule
kHz	kilohertz
km	kilomètre
kPa	kilo pascal
L	litre
m	mètre
mL	millilitre
mm	millimètre
mmHg	millimètre de mercure
mmol	milli mole
ms	milliseconde
mV	millivolt
N	Newton
Ω	Ohm
RPM	rotations par minute
T	température (°K)
W	Watt
μ L	micro litre

ABREVIATIONS

A	Surface frontale (m ²)
AP	<i>Aerodynamic Position</i>
AT	<i>Anaerobic Threshold</i>
ATP	Adénosine Tri Phosphate
BDC	<i>Bottom Dead Centre</i>
BF	<i>Biceps Femoris</i>
BS	Surface corporelle (m ²)
CàpI	Course à pied isolée
CàpT	Course à pied d'un triathlon
CàpD	Course à pied d'un duathlon
Ccin	Coût Cinétique (J.kg ⁻¹ .m ⁻¹)
CE	Coût Energétique (mL.m ⁻¹ .kg ⁻¹ ; J.m ⁻¹ .kg ⁻¹)
CEO	Cadence Energétiquement Optimale (RPM)
CG	Centre de Gravité
CL	Cadence Librement Choisie (RPM)
Clm	Contre la montre
Cméca	Coût Mécanique (J.kg ⁻¹ .m ⁻¹)
CMO	Cadence Mécaniquement Optimale (RPM)
CNO	Cadence Neuromusculaire Optimale (RPM)
CP1	1 ^{ère} Course à pied du duathlon
CP2	2 ^{ème} Course à pied du duathlon
CPTri	Course à pied du triathlon
CPC	Course à pied Contrôle
Cpot	Coût Potentiel (J.kg ⁻¹ .m ⁻¹)
Cr	<i>Running Cost</i> (mL d'O ₂ .kg ⁻¹ .m ⁻¹ ou mL.d'O ₂ .km ⁻¹ .kg ⁻¹)
CR	Coefficient de Roulement
Cx	Coefficient de forme
d	Rayon de la terre (km)
DE	<i>Delta Efficiency</i> (%)
Δ50	Delta 50
ΔP	Variation du volume plasmatique
DP	<i>Dropped Position</i>
È	Débit d'énergie (mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹)

E1	Dépense énergétique métabolique totale (J)
E2	Dépense énergétique de repos (J)
E3	Energie métabolique nécessaire au pédalage à vide (J)
Ela	Equivalent énergétique du lactate (kJ / L d'O ₂)
EMG	Electromyogramme
EMGi	Electromyogramme intégré
$\dot{E} \dot{M} \dot{G} i$	Débit d'EMGi
EO ₂	Equivalent énergétique de l'oxygène (mL d'O ₂ .mmol.L ⁻¹)
FC	Fréquence Cardiaque (bpm)
FCmax	Fréquence Cardiaque maximale (bpm)
Fe	Force effective (Newton)
FF	Fréquence de Foulée
FG	Force gravitationnelle (Newton)
FIO ₂	Fraction d'O ₂ dans l'air inspiré (L d'O ₂ .L ⁻¹)
FMVI	Force Maximale Volontaire Isométrique (Newton)
Fr	Force résultante appliquée sur les manivelles (Newton)
FR	Fréquence respiratoire (respirations.min ⁻¹ ou cycles.min ⁻¹)
g	Accélération gravitationnelle (m.s ⁻²)
G	Constante gravitationnelle (m ³ .kg ⁻¹ .s ⁻²)
GAS	<i>Gastrocnemius</i>
GE	<i>Gross Efficiency (%)</i>
GM	<i>Gluteus maximus</i>
H	Hauteur moyenne du centre de gravité (m)
H1	Pourcentage d'hématocrite du début d'exercice
H2	Pourcentage d'hématocrite du fin d'exercice
h	Déplacement vertical (m)
HAM	<i>Hamstrings</i>
L	Charge additionnelle (kg)
LA _s	Concentration sanguine en lactate (mmol.L ⁻¹)
LF	Longueur de Foulée (m)
LT	<i>Lactate Threshold</i>
M	Dépense énergétique de la locomotion pédestre (kcal.h ⁻¹)
m	Masse considéré (kg)
m'	Masse de la Terre (kg)
m*	Masse du couple cycliste – bicyclette (kg)

NE	<i>Net Efficiency (%)</i>
NS	Non Significatif
P	Pente du terrain (%)
PB	Pression Barométrique (Torr; mmHg)
PC	Phosphocréatine
PIO ₂	Pression d'O ₂ dans l'air inspiré (Torr; mmHg)
PMA	Puissance Maximale Aérobie (Watts)
Pmax	Puissance Maximale (Watts)
PSF	<i>Preferred Stride Frequency</i>
QR	Quotient Respiratoire
Ra	Résistance de l'air (Newton)
RER	Respiratory Exchange Ratio
RF	<i>Rectus femoris</i>
RPE	<i>Rate of Perceived Exertion</i>
Rr	Résistance de roulement (Newton)
R _T	Résistances totales (Newton)
S	Surface de projection frontale (m ²)
SB	<i>Semimembranosus</i>
SOL	<i>Soleus</i>
SS	<i>Steady State</i>
ST	Semitendinosus
SV	Seuil Ventilatoire
SVp	Puissance atteintes au seuil ventilatoire
SVv	Vitesse atteintes au seuil ventilatoire
SV2	Seuil Ventilatoire 2
TA	<i>Tibialis anterior</i>
TDC	<i>Top Dead Centre</i>
UP	<i>Upright Position</i>
v	Vitesse de déplacement (m.min ⁻¹ ; km.h ⁻¹)
V	Vitesse de marche (m.min ⁻¹ ; km.h ⁻¹)
Vc	Volume courant (L)
$\dot{V} \text{ CO}_2$	Débit volumique de CO ₂ (mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹ ; L.min ⁻¹)
$\dot{V} \text{ E}$	Débit ventilatoire (L.min ⁻¹)
VI	<i>Variable Intensity</i>
VL	<i>Vastus lateralis</i>

VM	<i>Vastus medialis</i>
VMA	Vitesse Maximale Aérobie (m.min ⁻¹ ; km.h ⁻¹)
V _{max}	Vitesse associée au dernier palier d'un test incrémenté
$\dot{V} O_2$	Débit volumique d'oxygène (mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹ ; L.min ⁻¹)
$\dot{V} O_{2max}$	Débit volumique maximal d'O ₂ (mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹ ; L.min ⁻¹)
$\dot{V} O_{2R}$	Débit volumique d'O ₂ de repos (mL.km ⁻¹ .min ⁻¹)
$\dot{V} O_{2SC}$ $\dot{V} O_{2slow component}$	(mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹ ; L.min ⁻¹)
VT	<i>Ventilatory Threshold</i>
WE	<i>Work Efficiency</i> (%)
W _g	Travail mécanique induit par F _g (J)
η	Type de surface
ρ	Masse volumique de l'air (kg.m ⁻³)
ρ ₀	Masse volumique de l'air en conditions standards (kg.m ⁻³)

RESUME

RESUME

Notre **étude** présente deux objectifs principaux. Le premier objectif est d'évaluer les réponses métaboliques chez des triathlètes entraînés lors d'un enchaînement cyclisme – course à pied au cours duquel l'épreuve de cyclisme est réalisée, soit à puissance constante, soit à puissance variable. Le deuxième objectif de cette expérimentation est d'analyser l'influence de ces conditions de pédalage sur la performance lors de l'épreuve de 5 km de course à pied.. Dans cette perspective, 8 triathlètes de bon niveau de pratique et habitués aux situations d'enchaînement cyclisme-Course à pied, ont participé à cette étude. L'épreuve de 20 km de cyclisme était réalisée soit à allure libre, soit à allure constante, soit avec des variations d'intensité. Les 5 km de course à pied qui suivaient chacune des situations de cyclisme, étaient réalisées sans consignes fixes, où le seul but était la recherche de performance sur cette distance et pour l'ensemble des conditions de terrain. **Les résultats** montrent une performance en course à pied d'autant plus performante que le cyclisme a été réalisé à allure constante. En l'absence de différence significative sur les paramètres cardiorespiratoires, l'hypothèse avancée est une fatigue musculaire plus importante engendrée par les variations d'intensité en cyclisme.

Ces résultats soulignent que la stratégie, le niveau d'expertise des sujets, l'intensité et la durée du cyclisme sont des facteurs influençant la performance lors de la course à pied subséquente. Des travaux ultérieurs intégrant l'épreuve de natation permettraient d'étendre toutes ces conclusions à l'épreuve de triathlon dans son ensemble.

Mots clés : triathlon, duathlon, coût énergétique, haut niveau de performance, puissance variable