



DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

**APPROCHES PHYSIOLOGIQUES ET BIOMECANIQUES DES DEUX
ENCHAINEMENTS EN TRIATHLON.**

Dossier Scientifique présenté par

Christophe HAUSSWIRTH¹,

Collaborateurs scientifiques : J. BRISSWALTER²,

Collaborateurs fédéraux : P. FATTORI³, P. DREANO³

7 Publications scientifiques liées au projet :

1. Vercruyssen et al. (2002). *Med Sci Sports Exerc* 34 :530-536
2. Delextrat et al. (2003a). *Can J Appl Physiol* 28 :356-369
3. Delextrat et al. (2003b). *Science & Sports* 18 :188-195
4. Delextrat et al. (2003c). *Med Sci Sports Exerc* 35 :1612-1619
5. Delextrat et al. (2003d). *Percept Mot Skills* 96 :604-606
6. Vallier et al. (2003). *Can J Appl Physiol* 28:673-684
7. Bernard et al. (2003). *Bri J Sports Sci* 37 :154-159

Travail effectué par

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie - INSEP¹

En collaboration avec

Université de Toulon-Var, Laboratoire d'Ergonomie Sportive et Performance²

Fédération Française de Triathlon³

1- Introduction

L'adaptation physiologique lors d'enchaînements d'exercices comme en Triathlon a fait l'objet de nombreuses expérimentations. Les travaux les plus récents, qui ont analysé plus particulièrement l'effet des enchaînements d'exercices sur la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) (pour revue : *Xu et Rhodes, 1999*), ont montré que $\dot{V}O_2$ pouvait être affectée par deux paramètres principaux : d'une part, la masse musculaire recrutée lors de l'exercice préalable (*Bohnert et coll., 1998*) et d'autre part, la charge métabolique de cet exercice (*Gerbino et coll., 1996*). Dans ce cadre, la sollicitation préalable de masses musculaires spécifiquement impliquées lors de l'exercice suivant entraîne une moindre augmentation de $\dot{V}O_2$ au cours de cet exercice, par rapport à la sollicitation préalable de masses musculaires différentes ou à l'absence de sollicitation préalable (*Bohnert et coll., 1998*). Par ailleurs, *Gerbino et coll. (1996)* ont mis en évidence que la cinétique de $\dot{V}O_2$ lors d'un exercice était significativement accélérée par la réalisation d'une épreuve préalable d'intensité élevée (*i.e.* supérieure au seuil anaérobie), tandis qu'aucune modification significative n'était observée à la suite d'une épreuve d'intensité plus faible (*i.e.* inférieure au seuil anaérobie).

Ces différentes études ont notamment trouvé un champ d'application dans les nouvelles activités physiques d'endurance dites *multivariées*, qui consistent à enchaîner diverses disciplines. Parmi ces activités physiques, le triathlon, réalisation successive d'épreuves de natation, cyclisme et course à pied connaît aujourd'hui une réelle expansion, notamment depuis sa participation aux Jeux Olympiques de Sidney en 2000. Comme dans les autres activités de longue durée, la performance en triathlon 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 (*di Prampero, 1986 ; Hausswirth et Lehénaff, 2001 ; O'Toole et Douglas, 1995*). En effet, des corrélations

significatives ont été mises en évidence entre la performance en triathlon et le coût énergétique de la partie cycliste, dont la durée représente plus de 50% de la durée totale du triathlon (*Miura et coll., 1997 ; Schabort et coll., 2000*). Dans une perspective d'optimisation de la performance en triathlon, ce résultat soulève deux interrogations, l'une relative à l'influence de l'exercice préalable de natation sur la dépense énergétique en cyclisme, et l'autre concernant l'effet des conditions dans lesquelles la partie natation est réalisée sur la modification éventuelle de la charge métabolique du cyclisme.

Plusieurs auteurs ont suggéré que le coût énergétique du cyclisme pouvait être affecté par les effets résiduels de l'épreuve de natation, étant donné les valeurs élevées de lactatémie observées immédiatement après la partie natation relativement aux parties cyclisme et course à pied (*Bentley et coll., 2002 ; Farber et coll., 1991 ; Margaritis, 1996 ; Millet et Vleck, 2000*). Peu de travaux expérimentaux ont étudié cet effet mais les résultats disponibles montrent que contrairement aux épreuves d'endurance (3000 m, *Laurson et coll., 2000*), la partie natation de triathlons sprints (750 m) dont l'intensité relative est supérieure peut entraîner une altération de la performance lors du cyclisme subséquent. Celle-ci se traduit soit par une réduction de la puissance moyenne soutenue (*Kreider et coll., 1988a*), soit par une augmentation du coût énergétique (*Hausswirth et coll., 1999*).

Enfin, parmi les facteurs qui affectent le coût énergétique du cyclisme, il est clairement établi que la variation de la cadence de pédalage permet de mettre en évidence une cadence énergétiquement optimale (*i.e.* associée à la valeur minimale du coût énergétique : CEO, environ 75 rév.min⁻¹, *Vercruyssen et coll., 2002*) qui diffère significativement de la cadence spontanément adoptée par les triathlètes en compétition (CL, environ 90 rév.min⁻¹, *Hausswirth et coll., 1999*).

2- Influence de la natation sur l'adaptation du triathlète en cyclisme

A notre connaissance peu de travaux se sont intéressés aux effets d'un exercice préalable de natation sur la performance en cyclisme et les résultats semblent contradictoires. Récemment, Laursen et al. (2000) n'ont observé aucun effet d'une épreuve de 3000 m de natation sur la dépense énergétique en cyclisme. A l'inverse, d'autres auteurs ont montré une réduction significative du rendement mécanique du cyclisme à la suite de l'épreuve de natation d'un triathlon de courte distance (Hauswirth et al., 1999 ; Kreider et al., 1988). Par ses caractéristiques l'épreuve de natation (Delextrat et al., 2003) se rapproche de celles d'Hauswirth et al. (1999) et de Kreider et al. (1988) (distances de 750 m dans notre étude et de 750 m et 800 m, respectivement pour Hauswirth et al., 1999 et Kreider et al., 1988). Lors de l'épreuve sans combinaison (NSC) (cf. Delextrat et al., 2003) les résultats précédemment décrits indiquent une diminution du rendement mécanique du cyclisme après une épreuve de natation. Par contre les résultats de cette étude ne révèlent aucune différence significative entre les valeurs de $\dot{V}O_2$ et $[La^-]$ mesurées dans la condition contrôle (CTRL) et la condition de nage avec combinaison (NAC) en début d'épreuve cyclisme. Seules les valeurs de $[La^-]$ de fin d'exercice de cyclisme diffèrent entre les deux épreuves. La contribution plus importante du métabolisme anaérobie entre les condition NAC et CTRL pourrait être expliquée par l'exercice préalable sur ergocycle qui met en jeu pendant une durée équivalente à la nage les muscles locomoteurs spécifiques de ce type d'effort. En effet, Bohnert et al. (1998) ont montré qu'une sollicitation préalable des membres inférieurs se traduisait par des valeurs plus faibles de $[La^-]$ et de $\dot{V}O_2$ lors d'un exercice sous-maximal de cyclisme, par rapport à une sollicitation préalable des membres supérieurs ($P < 0.05$). Bien que les mécanismes sous-jacents à cet effet restent mal définis, l'hypothèse principale suggère l'influence de facteurs hémodynamiques sur la vitesse et l'amplitude de la consommation d'oxygène et/ou sur

l'acidose musculaire (Bohnert et al., 1998). Ces auteurs indiquent que la réalisation d'un exercice préalable de même type (i.e. cyclisme-cyclisme) améliore la perfusion vasculaire dans les membres actifs au début du second exercice, augmentant ainsi la disponibilité en oxygène. En conclusion, tous ces résultats supportent donc l'hypothèse évoquée par Margaritis (1996) selon laquelle le niveau métabolique induit par l'épreuve de natation peut avoir une influence non négligeable sur la performance en triathlon. Ces observations permettent également de mettre en évidence l'importance de l'intensité à laquelle l'épreuve de natation est réalisée sur la dépense énergétique de l'exercice de cyclisme. Par ailleurs ces travaux soulignent l'intérêt du port d'une combinaison intégrale lors de la partie natation d'un triathlon sprint. Des travaux ultérieurs étudiant l'effet de la variation de l'intensité relative de nage sur la performance totale d'un triathlon seraient nécessaires afin de préciser l'influence de cette discipline sur la performance en triathlon.

Les études qui ont analysé l'influence d'un exercice préalable de natation sur l'adaptation physiologique en cyclisme ont montré que, contrairement à une épreuve de longue durée (3000 m de natation suivis de 3 h de cyclisme, *Laursen et coll., 2000*), l'épreuve de natation d'un triathlon sprint (750 m et 800 m pour *Hausswirth et coll., 1999* et *Kreider et coll., 1988*, respectivement) pouvait entraîner une altération de la performance lors du cyclisme subséquent. Cette altération de la performance peut se traduire soit par une diminution de la puissance moyenne développée (-17%) au cours d'un exercice de 75 min sur ergocycle (*Kreider et coll., 1988*), soit par une diminution de l'efficacité entre le début et la fin de la partie cycliste d'un triathlon sprint (*Hausswirth et coll., 1999*). Ces résultats soulignent l'influence des conditions dans lesquelles la natation est réalisée sur la dépense énergétique en cyclisme. Au cours d'enchaînements d'exercices, l'adaptation physiologique semble dépendre de deux facteurs principaux : d'une part la masse musculaire mise en jeu lors de l'exercice préalable, et d'autre part l'intensité relative de cet exercice (*Bohnert et coll.,*

1998 ; Gerbino et coll., 1996). Concernant l'influence de la masse musculaire sollicitée, Bohnert et coll. (1998) ont mis en évidence une moindre augmentation de $\dot{V}O_2$ et de la lactatémie lors d'un exercice de cyclisme d'intensité élevée (50% delta seuil lactique- $\dot{V}O_{2max}$) lorsque celui-ci était précédé d'un exercice de cyclisme d'intensité identique par rapport à un exercice de pédalage des bras de mêmes durée et intensité.

Les principaux résultats de l'étude de Delextrat et al. (2003) montrent une diminution significative du rendement mécanique global du cyclisme (-15,5%) lors de l'enchaînement natation-cyclisme comparativement à un exercice de cyclisme réalisé isolément. Par ailleurs, le fait de solliciter exclusivement les bras lors de la natation préalable n'entraîne aucune variation significative des principaux paramètres physiologiques mesurés en cyclisme ($\dot{V}O_2$, lactatémie, FC, $\dot{V}E$, lactatémie) comparativement à la sollicitation préalable de l'ensemble des masses musculaires des bras et des jambes. Ces résultats confirment la dégradation de la performance préalablement évoquée dans la littérature lors de l'enchaînement natation-cyclisme de triathlons sprints (Hauswirth et coll., 1999 ; Kreider et coll., 1988). Ces auteurs suggèrent que cette dégradation est principalement liée à l'intensité de l'exercice de natation, qui est plus élevée lors d'épreuves sprints par rapport aux épreuves d'endurance. Dans ce cadre, on peut noter des différences importantes entre les valeurs de lactatémie mesurées à la fin des 750 m de natation (Delextrat et coll., 2003) par rapport à celles enregistrées immédiatement après une épreuve de natation de 3000 m réalisée à allure de compétition (respectivement 9,1 vs. 5,5 mmol.L⁻¹ pour l'étude de Delextrat et coll. (2003) et celle de Laursen et coll., 2000).

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer l'altération de la performance au cours des enchaînements du triathlon, dont certaines peuvent être spécifiques à la sollicitation

physiologique engendrée par un exercice de natation. Une première hypothèse, évoquée par Kreider et coll. (1988), est basée sur la mise en jeu des phénomènes de thermorégulation. Selon ces auteurs, l'augmentation de la fréquence cardiaque observée lors de la partie cycliste d'un triathlon sprint peut être partiellement liée à l'élévation de la température rectale de 0,72°C observée au cours de la partie natation. Les effets résiduels de la natation sur le cyclisme subséquent peuvent également être expliqués par le patron respiratoire spécifique à la natation, caractérisé par une augmentation du travail respiratoire liée aux pressions élevées exercées sur la cage thoracique (*Holmer, 1972 ; Mador et Acevedo, 1991*). En faveur de cette hypothèse, Mador et Acevedo (1991) ont mis en évidence que l'induction d'un état de fatigue des muscles respiratoires préalablement à un exercice de cyclisme se traduisait par une hyperventilation et une augmentation du coût de la ventilation lors de cet exercice. Ces deux hypothèses permettent d'expliquer les valeurs élevées de FC et de $\dot{V}E$ mises en évidence à la suite de l'enchaînement natation-cyclisme, qui peuvent contribuer à diminuer le rendement mécanique du cyclisme.

L'influence de la sollicitation de différentes masses musculaires en natation sur la dépense énergétique en cyclisme a été analysée à l'INSEP à partir de la comparaison de trois modalités de nage consistant à nager soit uniquement avec les bras (condition NB), soit uniquement avec les jambes (condition NJ), soit avec les bras et les jambes (condition NC). La comparaison des conditions NB et NJ montre que la distance parcourue ainsi que la vitesse adoptée en natation sont significativement inférieures lorsque les jambes seules sont sollicitées par rapport à une sollicitation exclusive des bras. Ce résultat, en accord avec ceux de la littérature (*Deschodt et coll., 1999 ; Hollander et coll., 1988 ; Ohkuwa et coll., 1992*) ne nous permet pas de tester l'influence d'une sollicitation unique des jambes sur l'adaptation en cyclisme et limite donc l'interprétation des données concernant cette condition de nage.

L'absence de différence significative entre les conditions NB et NC est en contradiction avec les travaux de Bohnert et coll. (1998), qui observent une diminution des valeurs de lactatémie lors d'un exercice de cyclisme lorsque celui-ci est précédé d'un exercice réalisé avec les jambes par rapport à un exercice préalable sollicitant les bras. La principale hypothèse explicative évoquée par ces auteurs est qu'une activation préalable des jambes améliorerait la perfusion vasculaire au niveau des muscles actifs au début de l'exercice de cyclisme, augmentant ainsi la disponibilité en oxygène. Cependant, une différence non négligeable entre les travaux de Delextrat et coll. (2003) et ceux de Bohnert est que la sollicitation préalable des jambes est induite par des battements de crawl (*vs.* un exercice de cyclisme dans l'étude de Bohnert), qui ne sollicitent pas les mêmes muscles qu'un exercice de cyclisme. Cependant, on peut émettre l'hypothèse selon laquelle les battements de jambes, dont le rythme n'était pas contrôlé, n'étaient pas suffisamment intenses pour induire une amélioration de la perfusion vasculaire dans les muscles des membres inférieurs. En effet, les triathlètes utilisent classiquement deux types de battements (à deux temps ou à six temps) en compétition. Dans ce contexte, des travaux ultérieurs pourraient s'orienter vers la comparaison des battements à deux *vs.* à six temps et notamment sur l'influence des battements à six temps, réalisés soit pendant toute la course, soit dans sa dernière moitié sur l'adaptation physiologique lors du cyclisme subséquent.

Les résultats de ces études scientifiques suggèrent que la manipulation de la masse musculaire sollicitée en natation n'entraîne aucune variation de la dépense énergétique lors d'un enchaînement natation-cyclisme. Le deuxième facteur de variation de l'adaptation physiologique lors d'enchaînements d'exercices est l'intensité de l'exercice préalable. Dans ce contexte, Gerbino et coll. (1996) ont étudié l'influence d'un exercice préalable de cyclisme réalisé soit à intensité élevée (*i.e.* supérieure au seuil anaérobie), soit à intensité faible (*i.e.*

inférieure au seuil anaérobie) sur l'adaptation physiologique lors d'un exercice subséquent de cyclisme d'intensité élevée. Ils ont montré que la cinétique de $\dot{V}O_2$ lors du deuxième exercice était significativement modifiée à la suite de l'exercice d'intensité élevée, tandis qu'aucun effet n'était observé à la suite de l'exercice réalisé à une intensité plus faible. Dans le contexte du triathlon, ces résultats suggèrent qu'une diminution de l'intensité relative de la natation pourrait atténuer les effets négatifs de cette épreuve sur le cyclisme subséquent reportés dans la littérature pour des triathlons sprints. La dépense énergétique en natation semble largement affectée par les résistances hydrodynamiques qui s'opposent à l'avancement (*Lavoie et Montpetit, 1986 ; Chatard et Millet, 1996*). En triathlon, ces résistances peuvent être diminuées par deux moyens : d'une part le port d'une combinaison en néoprène, et d'autre part le drafting, stratégie consistant à nager dans l'aspiration d'un autre nageur.

Les différentes expérimentations élaborées dans ce travail ont pour objectif d'une part, d'analyser l'influence des caractéristiques d'un exercice préalable de natation (masse musculaire recrutée et charge métabolique) sur l'adaptation physiologique en cyclisme et d'autre part, d'étudier les variations de coût énergétique liées à la cadence de pédalage adoptée lors d'un enchaînement natation-cyclisme.

METHODES

Sujets

Dix triathlètes masculins de niveau inter-régional à national (âge: 27 ± 5 ans, taille: 179 ± 6 cm, poids: 71 ± 9 kg, masse grasse: $11 \pm 3\%$) ont participé à cette étude. Au cours des deux mois précédant les tests, leur volume d'entraînement hebdomadaire comprenait en moyenne 7,2 km

en natation, 113 km en cyclisme et 34 km en course à pied, ce qui représentait environ 144 min, 233 min et 147 min, respectivement dans ces 3 disciplines.

Tous les sujets étaient habitués aux épreuves sur ergocycle en laboratoire. Ils ont rempli un consentement écrit après avoir été informés en détail des procédures de l'expérimentation et cette étude a été agréée par le comité d'éthique pour la protection des individus (Saint-Germain en Laye, France).

Protocole expérimental

Test progressif maximal

La première épreuve réalisée par tous les sujets était un test progressif maximal de détermination de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) réalisé sur ergocycle. Après un échauffement de 6 min à 100 W, l'intensité mécanique était augmentée de 30 W par minute, jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus maintenir la puissance imposée. Les critères d'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ étaient les suivants : un plateau de $\dot{V}O_2$ malgré l'augmentation de la puissance, une fréquence cardiaque (FC) supérieure à 90% de la FCmax théorique et un quotient respiratoire (QR) supérieur à 1,15 [16]. A partir des valeurs de débit ventilatoire ($\dot{V}E$), de consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et de production de dioxyde de carbone ($\dot{V}CO_2$) le seuil ventilatoire (SV) était déterminé selon la méthode décrite par Wasserman et al. [30].

Tests sous-maximaux

Chaque triathlète a participé à 4 sessions sous-maximales présentées dans un ordre aléatoire et séparées au minimum par 48 heures. Le protocole expérimental est décrit dans la figure 1. Ces sessions comprenaient trois enchaînements natation-cyclisme durant lesquels l'épreuve de natation était réalisée soit avec les bras et les jambes (notée NC), soit uniquement avec les bras (notée NB), soit

uniquement avec les jambes (notée NJ). Durant ces trois épreuves, les sujets nageaient pendant la même durée à une allure de compétition sur 750-m. La quatrième session était une épreuve de cyclisme isolée (épreuve contrôle, notée C).

L'épreuve NC consistait à réaliser 750 m de natation complète (en utilisant les bras et les jambes) à allure de compétition, puis à enchaîner une épreuve de 15 min sur ergocycle à la cadence spontanément adoptée par les sujets (CL) et à une intensité correspondant à SV+5%. Cette intensité a été choisie parce qu'elle est représentative de l'allure adoptée par des triathlètes de même niveau dans la partie cyclisme de triathlons sprints [13]. Par ailleurs, elle est comparable aux intensités utilisées lors de travaux récents étudiant la transition cyclisme-course à pied chez des triathlètes entraînés (*e.g.* [29]). Pendant l'épreuve NB, les sujets nageaient en utilisant uniquement les bras, puis réalisaient l'épreuve de 15 min sur ergocycle à une intensité correspondant à SV+5%. L'épreuve NJ consistait à nager en utilisant uniquement les jambes, puis à enchaîner la même épreuve sur ergocycle décrite précédemment. Pendant l'épreuve NB, les sujets portaient un pull-boy fixé entre leurs cuisses afin d'éviter les battements de jambes. Le même pull-boy servait à supporter leurs bras lors de l'épreuve NJ. Enfin, la dernière épreuve sous-maximale était uniquement composée de l'exercice de 15 min sur ergocycle à SV+5%., précédé d'un échauffement à une puissance de 30% de PMA pendant la même durée que les épreuves de natation.

Matériel et mesures

Epreuves de natation

Tous les tests de natation se déroulaient dans le bassin extérieur de la piscine de Hyères (Var, France) où les températures moyennes extérieure et de l'eau étaient respectivement de 14°C et 28°C. Durant chaque épreuve, la performance finale ainsi que les temps réalisés à chaque

50 m étaient relevés. La fréquence gestuelle des bras, exprimée comme le nombre de cycles de bras complets réalisés par min, était mesurée pour chaque 50 m sur une distance de 20 m située au milieu du bassin.

Mesure de la lactatémie

Un échantillon de sang capillarisé était recueilli au lobe de l'oreille immédiatement après l'épreuve de natation (L1) et à la 5^{ème} et à la 15^{ème} min de cyclisme (L2 et L3). A partir de ces échantillons, une mesure de la lactatémie (LA, mmol.L⁻¹) était obtenue grâce à l'analyseur Lactate Pro, validé par Pyne et al. [27].

Mesure des paramètres ventilatoires et gazeux

La fréquence cardiaque était enregistrée en continu au cours des épreuves de natation et de cyclisme grâce à un cardiofréquence-mètre (POLAR vantage, Finlande).

Pendant les épreuves sur ergocycle, la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), la fréquence cardiaque (FC) ainsi que les paramètres respiratoires (débit ventilatoire : \dot{V}_E , fréquence respiratoire : FR) étaient enregistrés en continu par un système d'analyse télémétrique de type Cosmed K4b² (Rome, Italie) validé par Mc Laughlin et al. [25]. Pour chaque paramètre, une valeur de la moyenne et de l'écartype étaient calculées entre la 3^{ème} et la 15^{ème} minute d'exercice.

Le rendement mécanique global du cyclisme (η , en %) était calculé comme le rapport entre le travail mécanique accompli par min (i.e., watts convertis en kJ.min⁻¹) et l'énergie métabolique dépensée par min (kJ.min⁻¹, [6]). L'intensité des exercices sur ergocycle étant supérieure au seuil ventilatoire (SV+5%), l'énergie métabolique a été calculée à partir des équivalents énergétiques de l'oxygène (en fonction de la valeur de quotient respiratoire) et du lactate (63 J.kg⁻¹.mM⁻¹), [10].

Cadence de pédalage

Toutes les épreuves de cyclisme se déroulaient sur un ergocycle à résistance électromagnétique de type SRM (Jülich, Welldorf, Allemagne) situé dans une pièce proche du bassin afin que la durée des transitions natation-cyclisme puisse être standardisée (3 min). Cet ergocycle était équipé avec les propres pédales des triathlètes et pouvaient s'ajuster précisément à leurs caractéristiques anthropométriques grâce à un réglage horizontal et vertical de la selle et du cintre. Son mode de fonctionnement permettait la production d'une puissance constante indépendamment de la cadence de pédalage naturellement adoptée par les sujets [18]. La cadence de pédalage (rév.min⁻¹) était enregistrée en continu pendant toute la durée des épreuves.

Analyse statistique

Pour chaque variable, la valeur moyenne et l'écart-type étaient calculés. L'influence des caractéristiques de l'exercice préalable (*i.e.* conditions NC, NB, NJ et C) sur les différents indices physiologiques et la cadence de pédalage était analysée par une analyse de variance (MANOVA). Puis les différences entre les conditions expérimentales étaient déterminées par un test post-hoc de type Newman-Keuls. Le seuil de signification était fixé à $P < 0.05$.

RESULTATS

Test progressif maximal

Les caractéristiques physiologiques des sujets mesurées lors du test maximal sont présentées dans le tableau 1. Les résultats montrent que les valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ obtenues dans cette étude sont comparables à celles obtenues précédemment chez de triathlètes de niveau comparable [4, 29].

Tests sous-maximaux

Epreuves de natation

Performance

Aucune différence significative n'est observée entre les durées des trois épreuves de natation (durées respectives pour NC, NB et NJ: 709 ± 60 s, 709 ± 64 s, and 710 ± 64 s, $P>0.05$). Lors des épreuves NB et NJ, les sujets ont parcouru en moyenne 709 ± 38 m et 489 ± 65 m, respectivement. Ainsi, tandis que les vitesses moyennes des épreuves NC et NB ne sont pas significativement différentes, l'épreuve NJ était réalisée à une vitesse moyenne significativement inférieure par rapport aux épreuves NC et NB (vitesses moyennes de $0,69$ m.s⁻¹ vs. $1,07$ m.s⁻¹ and $1,00$ m.s⁻¹, respectivement pour NJ, NC et NB, $P<0.05$). De plus, la fréquence gestuelle des bras n'est pas significativement différente entre les épreuves NC et NB (fréquence gestuelle moyenne de $33,9\pm 1,0$ cycle.min⁻¹ vs. $33,7\pm 0,6$ cycle.min⁻¹, respectivement pour NC et NB, $P>0.05$).

Paramètres physiologiques

Les principaux résultats montrent que les valeurs de lactatémie mesurées immédiatement après la natation sont significativement inférieures dans la situation NJ par rapport aux situations NB et NC ($5,4\pm 2,3$ mmol.L⁻¹ vs. $9,0\pm 2,0$ mmol.L⁻¹ et $9,3\pm 2,3$ mmol.L⁻¹, respectivement pour NJ, NB et NC, $P<0.05$). Par ailleurs, toutes ces valeurs sont significativement supérieures à celles mesurées juste après l'échauffement sur ergocycle ($1,1\pm 0,3$ mmol.L⁻¹, $P<0.05$). La figure 2 montre l'évolution des valeurs de FC enregistrées lors des trois épreuves de natation chez un sujet représentatif. L'épreuve NJ est caractérisée par des valeurs de FC inférieures par rapport aux épreuves NB et NC.

Epreuves de cyclisme

Paramètres physiologiques

L'influence des caractéristiques de l'exercice préalable sur les différents paramètres mesurés est présentée dans le tableau 2. Aucune variation significative de la masse des sujets n'est mise en évidence entre les différentes conditions expérimentales ($P > 0.05$).

L'analyse statistique montre que tous les paramètres physiologiques ($\dot{V}O_2$, lactatémie, FC, $\dot{V}E$ et FR) sont significativement supérieurs dans les conditions NC et NB par rapport aux conditions C et NJ (Table 2, $P < 0.05$). Par conséquent, le rendement mécanique global du cyclisme est significativement inférieur à la suite des épreuves de natation des conditions NC et NB par rapport aux conditions C et NJ (Table 2, $P < 0.05$). Bien que la FR soit significativement supérieure dans la condition NC par rapport à NB (Table 2, $P < 0.05$), aucune différence significative n'est observée pour tous les autres paramètres physiologiques entre ces deux conditions (Table 2, $P > 0.05$). Enfin aucune différence d'efficacité énergétique du cyclisme n'est relevé en NJ et C malgré des valeurs de FC et de FR significativement supérieures dans la condition NJ par rapport à C (Table 2, $P < 0.05$).

Cadence de pédalage

Aucune variation significative de la cadence de pédalage n'est observée entre les quatre conditions expérimentales (Table 2, $P > 0.05$).

FIGURE 1

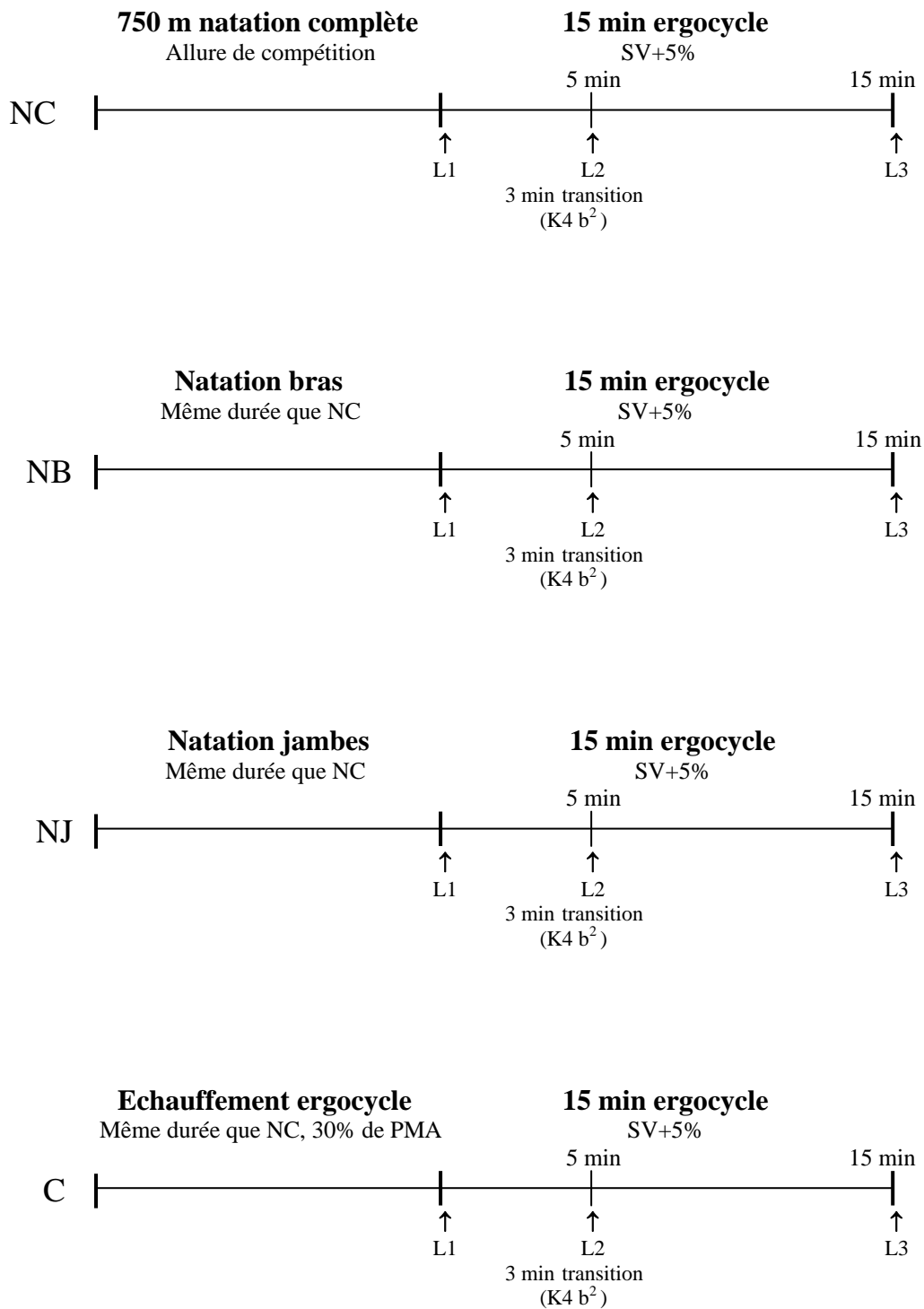


FIGURE 2

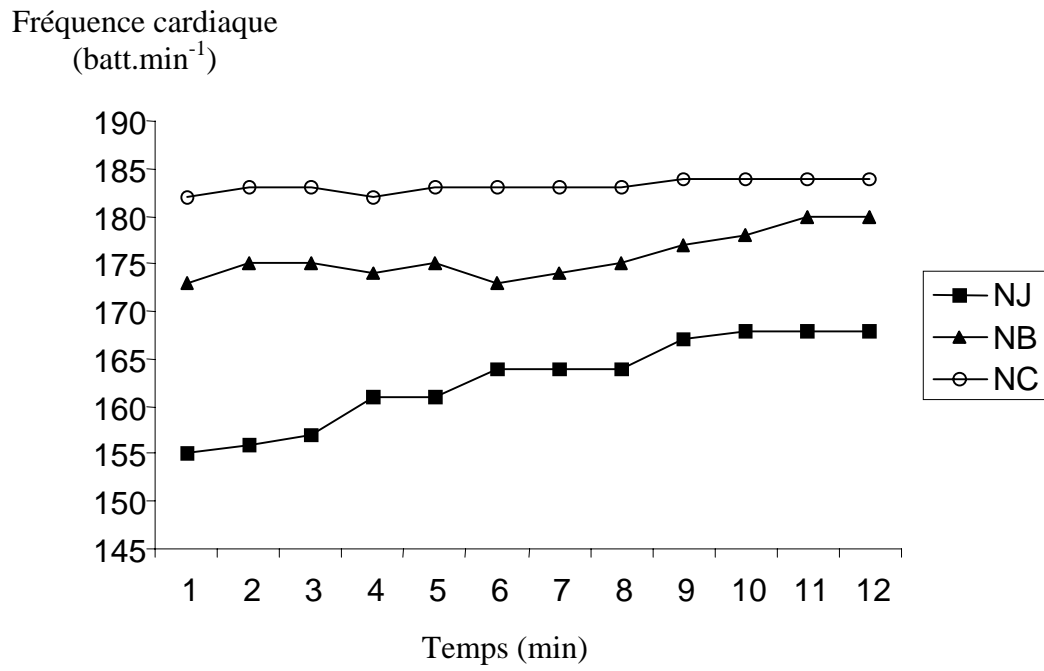


TABLEAU I : Caractéristiques physiologiques des sujets au cours de l'épreuve triangulaire.

$\dot{V} O_{2max}$: consommation maximale d'oxygène; PMA: puissance maximale aérobie; FCmax: fréquence cardiaque maximale; QRmax: quotient respiratoire maximal puissance à SV: puissance correspondant au seuil ventilatoire.

$\dot{V} O_{2max}$ (mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	PMA (W)	75% de PMA (W)	FCmax (batt.min ⁻¹)	QRmax	Puissance à SV (W)
71,7± 8,7	382± 37	287± 26	190± 13	1,11± 0,07	256± 25

TABEAU II: Effet des caractéristiques de l'exercice préalable sur les paramètres physiologiques et la cadence de pédalage enregistrés en cyclisme: consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), lactatémie (LA), rendement mécanique global (η), fréquence cardiaque (FC), débit ventilatoire ($\dot{V}E$), fréquence respiratoire (FR), cadence de pédalage spontanément adoptée (CL).

	C	NJ	NB	NC
$\dot{V}O_2$ (Lmin ⁻¹)	4,06 ± 0,48	4,08 ± 0,43	4,28 ± 0,47 ^{a,b}	4,28 ± 0,45 ^{a,b}
$\dot{V}O_2$ (% de $\dot{V}O_{2max}$)	79,9 ± 6,1	80,6 ± 7,1	84,9 ± 6,3 ^{a,b}	84,8 ± 7,5 ^{a,b}
LA 5 min (mmolL ⁻¹)	4,5 ± 2,0	5,7 ± 3,0	8,8 ± 3,3 ^{a,b}	9,1 ± 3,1 ^{a,b}
15 min	5,5 ± 2,7	6,5 ± 3,0	8,6 ± 4,1 ^{a,b}	8,0 ± 3,6 ^{a,b}
η (%)	15,5 ± 2,8	14,7 ± 2,8	12,9 ± 2,3 ^{ab}	13,1 ± 2,8 ^{ab}
FC (battmin ⁻¹)	165 ± 16	171 ± 15 ^a	175 ± 15 ^a	178 ± 15 ^{ab}
$\dot{V}E$ (Lmin ⁻¹)	103,4 ± 16,0	108,7 ± 16,7	121,4 ± 17,6 ^{a,b}	127,8 ± 17,2 ^{a,b}
FR (cyclemin ⁻¹)	35,2 ± 6,3	40,4 ± 7,2 ^a	41,6 ± 8,1 ^a	46,8 ± 7,7 ^{a,b,c}
CL (révmin ⁻¹)	86,7 ± 8,4	88,2 ± 10,6	87,1 ± 12,5	81,6 ± 12,0

^a : significativement différent de C, P<0.05.

^b : significativement différent de NJ, P<0.05.

^c : significativement différent de NB, P<0.05.

Discussion

Deux résultats principaux sont mis en évidence dans cette étude. Le premier résultat est qu'une épreuve de natation réalisée à allure de compétition entraîne une altération de l'efficacité énergétique au cours d'un exercice suivant de cyclisme comparé à un exercice réalisé dans des conditions isolées. Le deuxième résultat est le rendement global du cyclisme est identique à la suite d'une épreuve de natation réalisée avec les bras et les jambes et à la suite d'une épreuve de natation similaire (i.e. même durée et même vitesse) réalisée uniquement avec les bras.

L'évolution des paramètres physiologiques au cours des épreuves de cyclisme réalisées à la même puissance montre que l'influence d'un exercice préalable de natation se traduit par une diminution significative du rendement mécanique global du cyclisme (-15,5%) par rapport à une épreuve préalable de cyclisme de même durée et de même intensité (Table 2, $P < 0.05$).

Ces résultats sont en accord avec ceux précédemment décrits dans la littérature pour des épreuves de durée et d'intensité similaires. Kreider et al. [20] ont observé des diminutions significatives de la puissance soutenue (-17%) et de l'efficacité (-8,8%) en cyclisme lors d'un triathlon sprint simulé en laboratoire (800 m de natation, 40 km de cyclisme, 10 km de course à pied) par rapport à une épreuve de cyclisme isolée. Dans ce cadre, les divergences avec l'étude de Laursen et al. [22] peuvent s'expliquer principalement par les caractéristiques des épreuves proposées dans ces différentes études. D'une part, les sujets de l'étude de Laursen et al. [22] ont nagé 3000 m (en 52 min 29 s \pm 1 min 48 s) et enchaîné 3 h de cyclisme, tandis que nos sujets ont nagé 750 m (en 11 min 49 s \pm 1 min 00 s) et enchaîné 15 min de cyclisme. D'autre part, l'intensité des épreuves de natation et de cyclisme était supérieure dans notre étude par rapport à celle de Laursen et al. [22]. En effet, les valeurs de lactatémie mesurées immédiatement après la natation indiquent une sollicitation du métabolisme anaérobie plus importante pendant le 750 m par rapport au 3000 m (lactatémies post-natation de 9,1 mmol.L

¹ vs. 5,5 mmol.L⁻¹, respectivement pour notre étude et celle de Laursen et al. [22]), et les épreuves de cyclisme étaient réalisées à des puissances représentant 84,8% de $\dot{V}O_{2max}$ et 66,1% de $\dot{V}O_{2max}$, respectivement dans notre étude et celle de Laursen et al. [22]. Ainsi, nous suggérons que l'influence d'un exercice de natation sur la performance lors d'une épreuve suivante de cyclisme dépend principalement de l'intensité relative de l'exercice préalable de natation.

Dans ce cadre, Burnley et al. [5] ont comparé l'effet d'un exercice préalable de cyclisme réalisé soit à faible intensité (i.e., inférieure au seuil anaérobie), soit à intensité élevée (i.e., supérieure au seuil anaérobie) sur l'adaptation physiologique au cours d'un exercice subséquent de cyclisme d'intensité élevée. Ils ont observé que la cinétique de $\dot{V}O_2$ était significativement affectée par un exercice d'intensité élevée tandis qu'aucun effet significatif n'a été mis en évidence à la suite d'un exercice de cyclisme de faible intensité. Par ailleurs, Rieu et al. [28] ont montré que l'enchaînement de quatre sprints de 45 s en course à pied séparés par 9 min de repos entraînait d'une part une augmentation progressive de la lactatémie mais aussi une diminution de son accumulation (delta lactate). Nos résultats sont en accord avec ces différentes observations. Des valeurs significativement plus élevées de $\dot{V}O_2$ sont observées à la suite des deux épreuves préalables les plus intenses (NB et NC) par rapport à l'épreuve de cyclisme isolée (C) alors qu'aucune différence significative n'est mise en évidence entre les valeurs de $\dot{V}O_2$ des conditions NJ et C. Par ailleurs les valeurs de lactatémie relevées dans cette étude, qui sont significativement supérieures après les épreuves de natation par rapport à l'épreuve de cyclisme isolée (par exemple 9,3 mmol.L⁻¹ vs. 1,1 mmol.L⁻¹, respectivement pour les conditions NC et C, P<0.05) ont tendance à diminuer au cours du cyclisme lorsqu'il est précédé de natation (lactate de -1,1 mmol.L⁻¹ vs. +1,0 mmol.L⁻¹ pour les conditions NC et C, respectivement, Table 2).

Dans le contexte du triathlon, l'influence d'un exercice préalable sur la performance au cours d'un exercice suivant a été principalement étudiée au cours de l'enchaînement cyclisme-course à pied comparé à une épreuve de course à pied isolée. Dans les premiers travaux sur cette thématique, Kreider et al. [21] ont observé des augmentations significatives de $\dot{V}O_2$ (+11,7%), FC (+7,1%) et $\dot{V}E$ (+5,6%) après 10-min de course à pied lorsque cet exercice était précédé de 60 min de cyclisme réalisés à une intensité de 70% de $\dot{V}O_{2max}$, par rapport à un exercice contrôle de course à pied de même intensité. Ces résultats ont été confirmés par l'étude de Hue et al. [17] qui ont mis en évidence que 40 km de cyclisme entraînaient une augmentation significative des paramètres physiologiques ($\dot{V}O_2$, FC et $\dot{V}E$) mesurés au cours des 10 km suivants de course à pied, par rapport à un exercice de course à pied isolé de même durée.

Différents paramètres biomécaniques, ventilatoires ou métaboliques ont été évoqués dans la littérature pour expliquer l'altération de la dépense énergétique au cours des enchaînements du triathlon. Parmi ceux ci, certains peuvent être spécifiques à la natation. Par exemple, Kreider et al. [20] évoquent les effets de thermorégulation spécifiques à la natation sur l'adaptation en cyclisme. Dans ce cadre ils ont suggéré que l'augmentation de la température rectale de 0,72°C après 800 m de natation pouvait être responsable des différences de fréquence cardiaque enregistrées lors du cyclisme subséquent. Ainsi dans notre étude, les ajustements thermorégulateurs pourraient expliquer en partie l'augmentation de la dépense énergétique observée dans cette étude dans les épreuves NC et NB par rapport à l'épreuve C, d'autant plus que la température de l'eau dans laquelle se déroulaient les épreuves de natation était relativement élevée (28°C en moyenne). Un deuxième facteur permettant d'expliquer l'augmentation de la dépense énergétique lors d'un enchaînement natation-cyclisme est relatif au développement d'un état de fatigue des muscles respiratoires lié à la ventilation propre à l'activité aquatique. La natation est caractérisée par une augmentation du travail respiratoire

par rapport aux activités terrestres, notamment à cause des pressions élevées exercées par l'eau sur la cage thoracique [14, 23]. Dans ce cadre, Mador et Acevedo [23] ont mis en évidence que l'induction d'un état de fatigue des muscles respiratoires avant un exercice de cyclisme entraînait une hyperventilation lors de cet exercice et ainsi une augmentation du coût de la ventilation [7]. Dans cette étude, nous observons des valeurs de $\dot{V}E$ et de FR systématiquement plus élevées en cyclisme à la suite d'une épreuve de natation par rapport à l'épreuve de cyclisme isolé (+23,6% et +33,0%, respectivement pour $\dot{V}E$ et de FR, pour NC vs. C, Table 2, $P < 0.05$). Il est à remarquer que ces augmentations sont supérieures à celles relevées lors d'enchaînements cyclisme-course à pied (augmentation de $\dot{V}E$ de 5,3% relevée en course à pied après 60 min de cyclisme à 70% de $\dot{V}O_{2max}$ [21]). Ainsi, nous suggérons que le patron respiratoire adopté en natation, et particulièrement les valeurs élevées de FR peuvent entraîner une dépense énergétique supplémentaire et une fatigue des muscles respiratoires préalable à l'épreuve de cyclisme.

Une troisième hypothèse relie ces perturbations à la nature de la masse musculaire sollicitée pendant l'exercice préalable [3]. Dans notre travail trois conditions ont été testées (nage complète : NC, bras seuls : NB et jambes seules : NJ). Aucune différence de performance n'est observée entre NB et NC. Par contre la condition NJ se caractérise par une distance et une vitesse de nage significativement inférieures aux deux autres conditions, ce qui ne nous permet pas de tester l'influence d'une sollicitation unique des jambes sur l'adaptation en cyclisme. Cette différence de vitesse dans la condition NJ est conforme à la littérature qui montre que les vitesses atteintes en nageant uniquement avec des battements de jambes sont significativement inférieures (-27%) à celles atteintes en nageant le crawl uniquement avec les bras ou avec les bras et les jambes [15]. Aussi dans notre étude la seule comparaison concernant l'influence des masses musculaires préalablement activées ne peut être réalisée qu'entre NB et NC. Peu d'études se sont intéressées aux effets de l'activation préalable de

différentes masses musculaires sur l'évolution des paramètres physiologiques mesurés lors d'un exercice subséquent [3, 19]. Bohnert et al. [3] ont montré que l'activation préalable des jambes se traduisait par une diminution des valeurs de lactatémie lors d'un exercice sous-maximal de cyclisme, par rapport à une activation préalable des bras ($P < 0.05$). La sollicitation préalable des muscles des jambes améliorerait la perfusion vasculaire dans les membres actifs au début de l'exercice de cyclisme, augmentant ainsi la disponibilité en oxygène. Les résultats de notre étude en natation diffèrent de celles de ce travail puisque aucune différence de $\dot{V} O_2$ ou de lactatémie n'est observée entre les deux conditions NB et NC. Cependant, la différence majeure entre ces deux études la différence dans la nature de la sollicitation préalable des jambes. Le travail de Bohnert et al. [3] comparait un exercice préalable de pédalage en cyclisme avec un exercice sur ergocycle à bras alors que dans notre étude la sollicitation des membres inférieurs est celle spécifique aux battements de jambes en crawl. En crawl le rôle des jambes est de maintenir une position horizontale par un trajet des battements de jambes qui s'effectue de bas en haut, limitant ainsi leur action propulsive [9]. Dans ce cadre nous n'observons pas de différences de performance entre NB et NC ce qui est comparable aux résultats rapportés dans la littérature. En effet, plusieurs auteurs ont observé qu'ajouter des battements de jambes à un exercice de natation réalisé uniquement avec les bras n'entraînait aucune amélioration significative de la vitesse de nage au cours de sprints de 25 m [9]. Par ailleurs dans notre étude aucune différence de sollicitation physiologique n'est observée entre NB et NC. Aussi dans une perspective d'amélioration de la performance en triathlon nos résultats semblent indiquer le rôle mineur des battements de jambes sur l'épreuve de cyclisme subséquente et ainsi suggèrent indirectement l'absence d'un effet sur l'adaptation physiologique en cyclisme des différentes stratégies de battements (2 vs. 6 battements) utilisées par les triathlètes [1].

CONCLUSION

En conclusion, les résultats de cette étude confirment et précisent l'hypothèse émise dans les revues de question sur le triathlon selon laquelle l'épreuve de natation d'un triathlon affecte significativement l'efficacité énergétique du cyclisme [1, 24, 26]. D'une part cet effet paraît être spécifique aux triathlons de type « sprint ». D'autre part, il semble que l'adaptation physiologique en cyclisme ne soit pas influencée par la nature de la masse musculaire sollicitée lors de la natation préalable. Des travaux ultérieurs sur la transition natation-cyclisme centrés sur l'effet du niveau d'intensité en natation sur l'adaptation physiologique en cyclisme sont nécessaires pour étudier l'effet possible des stratégies de course dans la partie natation sur la performance totale en triathlon.

3- Influence du cyclisme sur l'adaptation du triathlète en course à pied

De nombreux travaux ont analysé les caractéristiques de l'enchaînement cyclisme-course à pied chez des triathlètes, indiquant l'apparition de multiples altérations physiologiques et biomécaniques lors de la course à pied enchaînée ou subséquente (CàpT) (Danner et Plowman, 1995 ; Gottschall et Palmer, 2000 ; Guézennec *et coll.*, 1996 ; Hausswirth *et coll.*, 1996, 1997a ; Hue *et coll.*, 1998 ; Kreider *et coll.*, 1988a, 1988b ; Millet *et coll.*, 2000, 2001). La plupart des modifications de CàpT ont été identifiées lors de la comparaison avec une course à pied isolée (CàpI) réalisée à la même vitesse de course.

Les premiers résultats de Boone et Kreider (1986) mettent en évidence une augmentation du coût énergétique (CE) lors d'une course à pied (5 min à 9,6 km.h⁻¹) réalisée après un exercice de pédalage de 3 min (80 % de FC_{max}), comparativement à la condition CàpI. A la suite de ce travail précurseur, les nombreux travaux qui ont étudié l'enchaînement cyclisme-course à pied ont permis de dissocier deux catégories d'altération : l'une

concernant les modifications induites par l'influence de la durée de l'exercice et la seconde directement liée aux effets de la transition.

Influence de la durée d'exercice

Au cours d'un triathlon proche de la distance olympique (800 m natation, 40 km cyclisme, 10 km course à pied), Kreider *et coll.* (1988a) indiquent chez 9 sujets une augmentation de la fraction de $\dot{V}O_{2\max}$ (+ 9 %), du débit ventilatoire (\dot{V}_E ; + 14 %), de la fréquence cardiaque (FC ; + 8 %), et de la différence artérioveineuse en oxygène (+ 12 %) lors de C \grave{a} pT comparée à la condition C \grave{a} pI. Ces auteurs associent les modifications cardio-respiratoires observées lors de C \grave{a} pT à la déshydratation ou à l'altération du processus de thermorégulation qui se manifeste avec la durée de l'exercice. Ces trois dernières études ont été réalisées en laboratoire et limitent ainsi les interprétations concernant les éventuelles modifications liées au contexte réel de l'activité (Boone et Kreider, 1986 ; Kreider *et coll.*, 1988a, 1988b).

Au cours de la dernière décennie, la caractérisation de l'adaptation du triathlète lors de l'enchaînement cyclisme-course à pied a pu être envisagée en condition réelle de pratique à partir de l'utilisation d'appareils télémétriques (Cosmed K2 et K4 ; Guézennec *et coll.*, 1996 ; Hausswirth *et coll.*, 1996, 1999, 2001). Dans ce contexte expérimental, Guézennec *et coll.* (1996) confirment les résultats précédemment décrits en laboratoire et indiquent une augmentation de CE, $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E et FC lors de C \grave{a} pT en comparaison avec les valeurs relevées lors de C \grave{a} pI. Dans cette étude, les valeurs de CE sont significativement plus importantes lors de la course à pied enchaînée du triathlon (199 et 215 mlO₂. kg⁻¹.km⁻¹, respectivement pour les conditions C \grave{a} pI et C \grave{a} pT). Les auteurs relient l'augmentation de C en fin de triathlon à plusieurs hypothèses explicatives. Parmi celles-ci, la perturbation des

paramètres biomécaniques (*i.e.* combinaison longueur-fréquence de foulée), la modification du patron de recrutement des fibres musculaires (*i.e.* recrutement additionnel des unités motrices) ou encore l'augmentation de la concentration des acides gras plasmatiques sont principalement décrites.

Par la suite, dans des conditions expérimentales similaires, les résultats de Hauswirth et coll. (1996) ont confirmé l'augmentation de CE lors de la condition C \dot{a} pT vs. C \dot{a} pI (224 vs. 207 mlO₂. kg⁻¹.km⁻¹) d'un triathlon simulé (30 min natation / 60 min cyclisme / 45 min course à pied) chez des sujets moyennement entraînés. Ces auteurs suggèrent que les facteurs responsables de CE lors de C \dot{a} pT peuvent être mis en relation avec ceux qui prévalent lors des épreuves de longue durée telles que l'augmentation de la concentration des acides gras plasmatiques, l'élévation de la température corporelle ou encore l'hypovolémie (*i.e.* diminution du volume plasmatique) associée à une diminution du poids corporel (*e.g.* Melun *et coll.*, 1980). En accord avec ces études, les résultats de Hue et coll. (1998) indiquent également une augmentation de $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E et FC lors de la condition C \dot{a} pT (10 km) à la suite d'une épreuve de cyclisme de 40 km chez des triathlètes entraînés. L'altération de C lors de C \dot{a} pT a été confirmée chez un groupe de triathlètes et de duathlètes féminines après un exercice de cyclisme de 45 min réalisé à 70 % de $\dot{V}O_{2max}$ (Danner et Plowman, 1995).

Par ailleurs, la modification des variables cinématiques serait également à l'origine de l'élévation de CE lors de C \dot{a} pT, se traduisant par exemple par une réduction de la hauteur maximale de la hanche lors de C \dot{a} pT, en comparaison avec la condition C \dot{a} pI (Hauswirth *et coll.*, 1997a). Ces auteurs indiquent que cette variation cinématique pourrait être associée à une fatigue locale du *biceps femoris* (muscle bi-articulaire intervenant lors de l'extension de la hanche) pendant le cyclisme.

Influence de la transition cyclisme – course à pied

La transition cyclisme-course à pied se caractérise par l'intervalle de temps entre le dernier kilomètre de l'épreuve cyclisme et le premier kilomètre de la course à pied subséquente (Millet et Vleck, 2000). Cette phase de la compétition peut être déterminante pour la performance totale chez une population de triathlètes élités (Landers *et coll.*, 2000 ; Millet et Vleck, 2000). L'adaptation du triathlète, quel que soit son niveau de pratique, est modifiée lors de cette transition et peut se traduire par des altérations d'ordre physiologique, biomécanique ou encore posturale (Hauswirth *et coll.*, 1997a ; Hue *et coll.*, 1998 ; Millet et Vleck, 2000).

Ces modifications *transitionnelles* constituent une des spécificités du triathlon et posent alors plusieurs questions concernant l'identification des facteurs permettant de les réduire.

Dans cette perspective, Hauswirth *et coll.* (1997a) rapportent, lors de la condition C \hat{a} T (45 min), des variations cinématiques comme l'angle plus élevé du tronc (par rapport à l'axe vertical) à la pose du talon et la diminution de la longueur de foulée observés immédiatement après une épreuve de cyclisme (60 min), en comparaison avec la session C \hat{a} I. L'inclinaison plus importante du tronc vers l'avant serait attribuée aux changements posturaux (*i.e.* passage d'une position assise en cyclisme à une position debout en C \hat{a}), induisant un recentrage des afférences sensitives pendant la course à pied enchaînée et pouvant être associé à une demande en énergie plus importante (Hauswirth *et coll.*, 1997a). D'autre part, les valeurs de la longueur de foulée diminuent significativement lors des 5 premières minutes de C \hat{a} T et augmentent au cours de l'exercice jusqu'à l'atteinte des valeurs de longueur de foulée relevées lors de la condition C \hat{a} I. Par conséquent, ces résultats indiquent que le choix spontané de la longueur de foulée, immédiatement après l'épreuve de cyclisme, ne correspond pas à la longueur de foulée qui minimise la dépense

énergétique (en comparaison avec les valeurs de C_{àI}) et pourrait contribuer à l'augmentation de C au début de C_{àT}. Par la suite, des données complémentaires ont confirmé les résultats du travail précédent et mettent en évidence une diminution de la longueur de foulée seulement les premières minutes *post-transition* (Gottschall et Palmer, 2000 ; Hue *et coll.*, 1998).

Ces modifications biomécaniques observées immédiatement après l'épreuve de cyclisme peuvent être reliées à des variations importantes de l'activité musculaire (Millet et Vleck, 2000). L'hypothèse de la fatigue musculaire est souvent citée pour expliquer les altérations survenues lors de C_{àT}. Cependant, peu d'études ont analysé véritablement l'activité de différents muscles au cours de l'enchaînement cyclisme-course à pied (*e.g.* Hausswirth *et coll.*, 2000 ; Witt, 1993). Dans ce cadre, Witt (1993) met en évidence que le passage d'une contraction musculaire à dominante concentrique (*i.e.* cyclisme) à une contraction excentrique (*i.e.* course à pied) s'accompagne d'une modification de l'activité EMG du *vastus lateralis*, *tibialis anterior* et du *tensor fascia latae* qui est interprétée comme une altération du recrutement des unités motrices. Ces modifications neuromusculaires, pouvant être induites lors du cyclisme, pourraient contribuer à la modification des paramètres biomécaniques lors de C_{àT} (Witt, 1993). Ces résultats semblent être contradictoires avec ceux de Hausswirth et coll. (2000) qui ne montrent aucune différence significative de l'activité EMG du *vastus lateralis* entre la condition C_{àT} (45 min) réalisée après 60 min de cyclisme et la condition C_{àI} (45 min) chez des triathlètes moyennement entraînés. Etant donné l'inconsistance des données expérimentales dans ce domaine, des travaux ultérieurs sont nécessaires pour étudier la relation entre les paramètres biomécaniques et musculaires lors d'un enchaînement cyclisme-course à pied.

Si la plupart des études précédentes indiquent une variation significative de la combinaison longueur-fréquence de foulée *post-transition*, il est à noter que ces altérations biomécaniques ne sont pas systématiques. Quigley et Richards (1996) n'observent aucune différence des paramètres biomécaniques de la course à pied réalisée après un exercice de pédalage de 30 min et suggèrent que la « sensation d'inconfort » qui se manifeste lors de la transition n'est pas reliée à l'altération des variables biomécaniques. Ces données sont en accord avec les résultats de Millet et coll. (2001) qui ne montrent pas de variations significatives de la longueur de foulée, chez des triathlètes moyennement entraînés (n=18) et élites (n=8), lors d'une course à pied de 7 min (14-18,5 km.h⁻¹) réalisée à la suite d'un exercice de pédalage menant à l'épuisement (test progressif pour atteindre PMA + temps limite à 80% de PMA). Dans cette étude, si aucune modification de la longueur de foulée n'a été observée après le cyclisme, des résultats complémentaires indiquent que les valeurs du coût mécanique, qui représente le ratio entre le travail externe (travail potentiel + travail cinétique) et la longueur de foulée, sont plus importantes lors de la première minute post-cyclisme chez les triathlètes non-experts. Pour cette population, Millet *et coll.* (2001) associent l'augmentation du coût mécanique *post-cyclisme* de 7% à une diminution de la raideur neuromusculaire ou à la réduction de la capacité de l'athlète à ré-utiliser l'énergie élastique (stockée lors de la contraction excentrique) au cours de la contraction concentrique subséquente (Candau *et coll.*, 1998). La diminution de la raideur neuromusculaire est souvent rapportée à des oscillations verticales plus importantes du centre de gravité à la pose du pied (Belli *et coll.*, 1993 ; Candau *et coll.*, 1998). L'altération de la coordination musculaire pourrait alors expliquer partiellement la « sensation d'inconfort » post-cyclisme citée préalablement par Quigley et Richards (1996).

Les travaux présentés dans ce paragraphe mettent en évidence principalement les effets de la transition sur l'adaptation biomécanique lors de la course à pied enchaînée. Cependant, d'autres études montrent que la transition cyclisme-course à pied influence également les réponses ventilatoires lors de la condition C \dot{a} pT. En effet, Hue *et coll.* (1998) indiquent une influence négative du cyclisme sur l'efficacité ventilatoire lors d'une épreuve de course à pied (10-km) réalisée immédiatement après 40-km de cyclisme, se traduisant par une augmentation des valeurs de \dot{V}_E , de la fréquence respiratoire ou encore des ratios $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ et $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$. Ces auteurs ajoutent que l'altération de l'efficacité ventilatoire est plus accentuée immédiatement après la transition (lors des premières minutes de C \dot{a} pT) et suggèrent une apparition de la fatigue des muscles respiratoires qui peut se caractériser par une hypoxémie relative induite lors de l'épreuve cyclisme (*i.e.* altération de la capacité de diffusion de l'O $_2$ au niveau de la barrière alvéolo-capillaire, inégalité de la distribution du rapport ventilation alvéolaire-perfusion).

L'ensemble des modifications biomécaniques et physiologiques survenues lors de la course à pied enchaînée traduisent les effets de la durée de l'exercice et de la transition cyclisme-course à pied lors d'un triathlon. Situé dans une perspective d'optimisation de la performance, le dernier paragraphe présente les paramètres qui sont susceptibles de réduire les altérations multifactorielles observées lors de la course à pied subséquente.

Facteurs d'optimisation lors de l'enchaînement cyclisme-course à pied

Peu d'études se sont intéressées aux facteurs permettant de réduire les altérations de la course à pied d'un triathlon et d'améliorer la performance lors de cette épreuve déterminante (Bentley *et coll.*, 2002 ; Garside et Doran, 2000 ; Hausswirth *et coll.*, 1999, 2001 ; Millet *et coll.*, 2001 ; Millet et Vleck, 2000). Dans une revue de questions sur le

sujet, Millet et Vleck (2000) proposent plusieurs facteurs d'optimisation tels que l'entraînement multivarié basé sur les enchaînements entre les activités (*i.e. back-to-back training*), la composante *drafting* ou encore la combinaison puissance de sortie-cadence de pédalage.

Dans ce contexte, Millet et collaborateurs soulignent l'importance pour le triathlète de pratiquer à l'entraînement des enchaînements entre les modes de locomotion (Millet *et coll.*, 2001 ; Millet et Vleck, 2000). En s'appuyant sur les modalités d'adaptation induites chez des triathlètes élites, ces auteurs suggèrent que l'entraînement multivarié limiterait, pour une part, les altérations biomécaniques de la course à pied d'un triathlon. Cependant, aucune donnée n'est disponible dans la littérature concernant la relation entre l'entraînement et la réduction des variables biomécaniques et/ou physiologiques lors d'un triathlon simulé.

Par ailleurs, le triathlon a été considéré pendant de nombreuses années comme une activité *multivariée* relevant de la capacité de performance de l'athlète dans les trois disciplines. L'intégration du *drafting* dans certaines compétitions nationales et internationales a amené d'une part, les entraîneurs à modifier les programmes d'entraînement (*i.e.* considérant la course à pied comme la plus importante) et d'autre part, les scientifiques à s'interroger sur les aspects bénéfiques de cette composante au niveau physiologique. Le *drafting* peut se définir comme un processus d'aspiration ou de réduction des résistances frontales à l'avancement chez un cycliste qui se positionne derrière un autre cycliste. Les premières données expérimentales concernant l'influence du *drafting* dans un contexte de triathlon sont celles de Hausswirth *et coll.* (1999) qui observent, au cours d'un triathlon sprint, une réduction des valeurs de $\dot{V}O_2$, FC, \dot{V}_E et de la lactatémie lors de la condition *drafting* comparativement à l'épreuve de cyclisme réalisée sans *drafting*. Dans la condition

drafting, la réduction de la *charge métabolique* s'accompagne d'une amélioration de la performance en course à pied de 40 secondes (s) comparativement à la condition sans *drafting*. Néanmoins, les valeurs chronométriques relevées en condition *drafting* sont significativement plus importantes que celles de la course à pied isolée (5-km), suggérant une altération de la performance lors de la course à pied réalisée à la suite d'une épreuve de cyclisme, quelle que soit la modalité préalable (avec ou sans *drafting*).

Dans une étude complémentaire sur le sujet, Hausswirth *et coll.* (2001) rapportent, lors d'un triathlon sprint, un effet bénéfique du *drafting continu* (*i.e.* aucune variation de position entre les 2 sujets) qui se caractérise par une réduction de la charge métabolique en cyclisme (*i.e.* diminution de $\dot{V}O_2$, FC, \dot{V}_E et de la lactatémie) et une amélioration de la performance lors de la course à pied subséquente. Cet effet positif n'a pas été observé lors de la condition réalisée en *drafting alterné* (*i.e.* alternance du positionnement exposé vs. abrité des deux cyclistes). Les résultats de ces deux dernières études caractérisent l'adaptation physiologique de l'athlète en cyclisme lorsque le *drafting* est autorisé et les éventuelles stratégies à adopter lors de cette épreuve pour optimiser la performance lors de la course à pied. Si la composante *drafting* est considérée comme un facteur pouvant améliorer la performance en triathlon, la gestion de la partie cyclisme, à partir du choix de la combinaison *puissance de sortie-cadence de pédalage*, peut être également déterminante sur la performance totale.

L'hypothèse de la combinaison *puissance-cadence de pédalage* est souvent citée lors des études de terrain pour interpréter la variation des réponses physiologiques induites par l'athlète au cours de la course à pied (*e.g.* Bentley *et coll.*, 2002 ; Hausswirth *et coll.*, 1999, 2001 ; Millet *et coll.*, 2001 ; Millet et Vleck, 2000 ; Smith *et coll.*, 1999). Cependant, très

peu d'études ont analysé véritablement l'influence de ces paramètres dans un contexte de triathlon. A partir d'un système de pédalier de type *SRM* permettant d'enregistrer les valeurs de puissances et de cadences en condition extérieure, les résultats de Smith *et coll.* (1999) montrent lors de la partie cyclisme d'un triathlon courte distance (avec *drafting*), une grande variation de ces variables au cours de cette épreuve chez 3 triathlètes élites ($238,3 \pm 167$ W et $76,3 \pm 28,3$ rpm respectivement pour la puissance et la cadence). Ces auteurs indiquent d'une part, que la grande variation de ces paramètres (*e.g.* valeurs d'écart-type importantes) est fonction du parcours et du positionnement de l'athlète dans les pelotons de course et d'autre part, que cet effort de nature stochastique peut altérer la performance lors de la course à pied subséquente.

En cyclisme, il a été montré qu'un exercice réalisé en condition stochastique (*i.e.* variation importante de la puissance au cours de l'exercice) était négatif sur la performance (Palmer *et coll.*, 1997). Dans cette étude, 6 cyclistes entraînés ont été évalués lors d'une course en *contre-la-montre* de 20-km réalisée soit, à la suite d'un exercice stochastique (ES) de 150 min à 58 % de PMA avec des variations de puissances fixées à ± 12.2 % de PMA, soit à la suite d'un exercice à puissance constante (EC, 58 % de PMA). Le principal résultat montre que la condition ES réduit significativement la performance sur 20-km comparativement à la condition EC (respectivement, 26,32 et 28,08 min). Le même groupe de recherche a mis en évidence également dans un protocole similaire, une influence de la condition ES vs. EC sur la déplétion glycogénique des fibres de type II et sur l'oxydation des glucides au cours de la performance subséquente réalisée sur 20-km (Palmer *et coll.*, 1999).

Seule l'étude de Ramsay *et coll.* (2001) s'est intéressée aux caractéristiques d'un effort stochastique dans le contexte d'un enchaînement cyclisme-course à pied. Dans ce travail, aucun effet de l'épreuve cyclisme réalisée en condition ES ($\pm 20-40$ % de la puissance de sortie moyenne) n'a été observé sur la performance en course à pied (10-km),

comparativement à l'épreuve de cyclisme réalisée à une puissance de sortie constante. Des études ultérieures proches du contexte du triathlon sont nécessaires pour évaluer l'influence réelle d'une épreuve de cyclisme effectuée en condition stochastique sur la performance et l'adaptation physiologique des sujets lors de la course à pied subséquente. Ces informations seraient utiles pour des triathlètes qui ne peuvent pas bénéficier de la composante *drafting* lors des compétitions.

Enfin, la cadence de pédalage est également un facteur potentiel à prendre en considération lors de cette activité (Bentley *et coll.*, 2002 ; Hausswirth *et coll.*, 1999, 2001 ; Millet et Vleck, 2000). Dans ce cadre, Hausswirth *et coll.* (1999) montrent indirectement une influence de la cadence de pédalage sur la performance en course à pied lors d'un triathlon sprint chez des triathlètes élités. Lors de cette étude, les sujets ont adopté une cadence de 95 rpm lors de l'épreuve cyclisme réalisée en condition *drafting* et une cadence de 89 rpm en condition *sans drafting*. Ces données suggèrent que pour une cadence de 95 rpm, la réduction de la force appliquée sur les pédales associée à un recrutement d'un plus grand pourcentage de fibres de type I (Takaishi *et coll.*, 1996) peuvent contribuer à l'amélioration de la performance en course à pied. En triathlon, les seules données disponibles dans la littérature scientifique concernent la relation entre le choix de la cadence et l'adaptation des triathlètes lors d'une épreuve de cyclisme prolongée (Brisswalter *et coll.*, 1999 ; Lepers *et coll.*, 2000b, 2001a). Les résultats observés chez des triathlètes de niveau régional montrent une diminution de la cadence librement choisie après 2-h d'exercice (de 87 à 69 rpm ; Lepers *et coll.*, 2000b). D'autre part, les données de Brisswalter *et coll.* (1999) indiquent une relation étroite entre la cadence librement choisie et la cadence la plus économique après 30 minutes d'exercice chez des triathlètes de niveau régional. Ces observations qui mettent en évidence des modifications du geste au cours de l'exercice, posent une question principale concernant le choix de la cadence de pédalage chez des triathlètes et l'influence de ce choix sur la performance en

course à pied. A notre connaissance, seule une étude récente de Vercruyssen *et coll.* (2002) a pu mettre en relation ces deux composantes. Le résultat principal de cette étude indique un effet significatif du choix de la cadence de pédalage sur la variabilité de la consommation d'oxygène avec la durée d'exercice en cyclisme et les épreuves de course à pied réalisées en enchaînement cyclisme-course à pied. L'une des données les plus intéressante de cette étude est l'observation d'une augmentation continue de $\dot{V}O_2$ pendant les 15 minutes de course à pied effectuées après des épreuves cyclistes où les cadences étaient élevées (90 rpm et 81 rpm, durées de 30 minutes). Ces cadences en cyclisme contribuent à l'apparition d'une composante lente de $\dot{V}O_2$ lors de la course réalisée en enchaînement. Cependant, il a été également montré par ces auteurs que l'adoption de la cadence librement choisie en cyclisme tend à réduire le coût énergétique de la locomotion conjointement en cyclisme et lors de la course à pied consécutive à cette transition. Ce résultat peut alors être rapproché d'une stratégie possible à adopter lors de la partie cyclisme d'un triathlon dans la perspective d'une meilleure performance en course à pied (*i.e.* partie finale du triathlon).

Matériel, Méthodes et Résultats

(Cf. Articles « Effect of cycling..... in well trained triathletes », Bernard *et coll.* (2003) ; « Influence of cycling ... running performance in triathletes », Vercruyssen *et coll.* (2002)).

Discussion générale

Il est classiquement admis que l'adaptation en course à pied dépend principalement des conditions physiologiques dans lesquelles le triathlète termine l'épreuve de cyclisme (*e.g.* Hauswirth *et Brisswalter*, 1999). Dans ce cadre, de nombreux travaux montrent une augmentation du coût énergétique, du débit ventilatoire, de la fréquence cardiaque ou encore une altération des paramètres du mouvement (*i.e.* longueur de foulée, variables cinématiques)

lors de la dernière épreuve du triathlon (*e.g. Bentley et coll., 2002 ; Millet et Vleck, 2000*). Comparativement à une course contrôle, ces observations montrent un effet négatif et systématique du cyclisme sur les réponses adaptatives du sujet en course à pied. Lors d'une étude antérieure (Vercruyssen *et coll.*, 2001), nous avons montré une tendance des sujets à réduire la dépense énergétique en fin d'épreuve pourrait alors réduire les altérations classiquement relevées lors de la course à pied. Dans cette perspective, en fonction de son niveau de pratique, le triathlète, doit-il adopter dès le début de l'exercice une cadence de pédalage qui minimise les paramètres énergétiques ou au contraire adopter une cadence de pédalage qui réduit les paramètres biomécaniques et musculaires indépendamment de la dépense énergétique associée ?

Par conséquent, l'objectif de notre second travail expérimental était de s'intéresser à l'adaptation physiologique de l'athlète lors de la course à pied après un exercice prolongé de cyclisme réalisé soit à la cadence énergétiquement optimale (72 rpm), soit à la cadence librement choisie (81 rpm) ou à une cadence de 90 rpm. Cette dernière cadence correspondait d'une part, à la CL de la condition pré-exercice de notre première étude et d'autre part, à l'optimum mécanique théorique déterminé par Neptune et Hull (1999). Cette seconde étude a permis de mettre en évidence plusieurs résultats qui font l'objet de nombreuses hypothèses explicatives :

- Le décalage entre CL et CEO en début d'exercice (respectivement, 81 et 72 rpm) confirme les données de la plupart des travaux (*e.g. Marsh et Martin, 1993, 1997 ; Takaishi et coll., 1996*). Plusieurs suggestions sont avancées dans la littérature pour expliquer ce décalage systématique. Parmi celles-ci, l'hypothèse de Takaishi et coll. (1998) semble être l'une des plus attractives et nécessite d'être validée dans une étude ultérieure. Ces auteurs suggèrent que le choix d'une cadence élevée, chez des sujets pratiquant le

cyclisme depuis de nombreuses années, est associé au développement d'une habileté de pédalage induit par un processus d'apprentissage. En l'état actuel des connaissances, des travaux futurs sont nécessaires pour étudier l'influence réelle d'une procédure d'apprentissage sur le choix de la cadence de pédalage, en proposant à des sujets novices un programme d'entraînement basé soit sur l'adoption d'une cadence proche de l'optimum énergétique, soit sur l'adoption d'une cadence correspondant à l'optimum neuromusculaire ou mécanique. Par ailleurs, dans notre étude, la CEO qui était imposée au cours de l'exercice prolongé ne permet pas de conclure à un décalage entre CEO et CL après 30 min d'exercice. Cet argument est à mettre en relation avec les résultats de Brisswalter et coll. (2000) qui montrent une augmentation de CEO de 16 rpm après 30 min d'exercice.

- Une augmentation de $\dot{V}O_2$ lors de la course à pied enchaînée a été observée quelle que soit la cadence de pédalage préalable, comparativement à la course à pied isolée. Ces résultats confirment l'influence négative de l'épreuve cyclisme sur les réponses ventilatoires de la course à pied subséquente. Des données complémentaires indiquent cependant un effet significatif du choix de la cadence sur ces modifications physiologiques. L'adoption de CEO induit une réduction de $\dot{V}O_2$ au cours des activités cyclisme et course à pied alors que l'adoption d'une cadence plus élevée (> 80 rpm) est associée à une diminution de l'efficacité énergétique au cours de ces deux activités chez des triathlètes de niveau régional. Plusieurs hypothèses sont émises pour interpréter cet effet différencié de la cadence sur l'adaptation du sujet en fonction de la durée de l'exercice. Parmi celles-ci, la modification du patron de recrutement des fibres musculaires et les variations hémodynamiques pourraient expliquer partiellement les variations de $\dot{V}O_2$ au cours des enchaînements.

Dans ce contexte, nos résultats suggèrent que le développement d'une fatigue préalable et les différences de perfusion musculaire entre le cyclisme et la course à pied (*i.e.* condition isolée de même durée) sont accentués lorsque le sujet adopte des cadences de pédalage plus élevées que CEO. Ces modifications physiologiques seraient responsables des variations de la cinétique de $\dot{V}O_2$ lors de la course à pied. Cependant, le manque de données et d'analyse de certains paramètres, tels que le débit sanguin musculaire (*i.e.* niveau de perfusion), l'activité musculaire ou les différentes phases de la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours des épreuves de cyclisme et de course à pied, constituent les principales limites de ce travail. L'ensemble de nos résultats nécessite donc la réalisation d'études ultérieures sur un plus large intervalle de cadences de pédalage (de 50 à 110 rpm) afin de valider les hypothèses musculaire et hémodynamique.

A partir de cette étude, nous pouvons émettre l'hypothèse selon laquelle l'adoption de CEO, associée à une réduction de $\dot{V}O_2$ au cours de l'épreuve cyclisme, influence positivement les réponses adaptatives de l'athlète en course à pied mais ne permet pas de conclure aux différentes stratégies de course à adopter lors de la partie cyclisme. Ces observations posent une question plus *pragmatique* concernant les conséquences du choix de la cadence sur la performance en course à pied. Dans ces conditions, Millet et Vleck (2000) indiquent dans une revue de questions, que les triathlètes de haut niveau préfèrent adopter des cadences élevées (*i.e.* $>$ CEO) avant la transition afin d'optimiser le déroulement de la course à pied subséquente. Cette stratégie se caractérise le plus souvent par une augmentation de la vitesse de course lors du premier kilomètre de la course à pied enchaînée. Récemment, Hausswirth (2002) a étudié l'influence de 3 types de stratégie, immédiatement après le cyclisme, sur la performance lors de la course à pied (10 km) d'un triathlon courte distance, en comparaison avec une épreuve de course à pied isolée (CàPI ;

10-km). Dans ce travail, le premier kilomètre de la course à pied du triathlon était réalisé soit à 5 % au dessus de la vitesse moyenne de course obtenue lors du premier kilomètre de C \grave{a} pI (*i.e.* 200s), soit à 5 ou 10 % au dessous de la vitesse moyenne de C \grave{a} pI. Sur la base de la performance réalisée lors de la condition C \grave{a} p I (*i.e.* 33 min 20s), les principaux résultats indiquent que la stratégie qui permet d'améliorer la performance lors de la course à pied du triathlon consiste à adopter une vitesse de course qui se situe à 5 % au dessous de la vitesse de C \grave{a} pI (temps au 10 km : 33 min 48s). Ces données suggèrent l'importance pour les triathlètes d'augmenter la vitesse de course progressivement après le cyclisme d'une part, pour réduire les effets négatifs de cette épreuve et d'autre part, pour améliorer la performance totale.

Situé dans le contexte de la performance en triathlon, l'objectif de notre dernière étude était de s'intéresser à l'influence de 3 cadences de pédalage (60, 80 et 100 rpm), pouvant être utilisées en compétition, sur l'adaptation des triathlètes en course à pied tant au niveau des réponses métaboliques et cinématiques qu'au niveau de la performance. Contrairement aux *anecdotes* issues de la pratique, nos résultats ne montrent pas de relation entre l'augmentation de la cadence de pédalage (*i.e.* 100 rpm) et l'amélioration de la performance en course à pied. Les données de cette étude associées à celles du précédent travail indiquent l'influence positive d'une cadence de pédalage plus faible (60 et 72 rpm, respectivement) sur les réponses ventilatoires lors de la course à pied.

Enfin, l'un des résultats intéressants de ce travail est lié à la capacité des triathlètes à mobiliser une plus grande fraction de $\dot{V}O_{2max}$ ($F\dot{V}O_{2max}$) après l'adoption d'une cadence de 60 rpm, suggérant une contribution plus importante du métabolisme aérobie (Brandon, 1995). Malgré l'absence d'effet de la cadence sur la performance en course à pied, ces données peuvent être rapportées à l'étude de Hausswirth et coll. (1999) qui montrent, lors

d'un triathlon sprint, une relation entre l'amélioration de la performance en course à pied après la condition *drafting* et l'augmentation de $\dot{V}O_{2max}$ lors de cette dernière épreuve. Dans ce cadre, cette tendance des sujets à augmenter $\dot{V}O_{2max}$ lors de la course à pied en fonction de l'épreuve de cyclisme préalable (*i.e.* 60 rpm) pourrait avoir des effets positifs sur la performance sur de plus longues distances (*i.e.* triathlon sprint ou courte distance) et réduirait ainsi l'écart avec la performance réalisée en course à pied isolée.

En conclusion, les critères de choix de la cadence de pédalage et/ou les facteurs qui déterminent la performance en course à pied sont multiples et semblent dépendre d'une interaction particulière entre les contraintes de l'activité et le niveau d'expertise de l'athlète.

Afin de valider certaines hypothèses émises à la suite de nos travaux, des études ultérieures proches des distances « longues distances » sont nécessaires pour évaluer l'importance du choix de la cadence de pédalage lors de l'enchaînement cyclisme-course à pied. Il serait également intéressant de considérer le problème du choix de la cadence dans un contexte global de l'activité (*i.e.* intégration de la partie natation) afin de se rapprocher véritablement des conditions de compétition de l'activité triathlon.

Références bibliographiques (natation-cyclisme)

- 1 Bentley DJ, Millet GP, Vleck VE, McNaughton LR. Specific aspects of contemporary triathlon. *Sports Med* 2002; 32: 1-15.
- 2 Bogdanis GC, Nevill ME, Lakomy, HKA. Effects of previous dynamic arm exercise on power output during repeated maximal sprint cycling. *J Sports Sci* 1994; 12: 363-370.
- 3 Bohnert B, Ward SA, Whipp BJ. Effects of prior arm exercise on pulmonary gas exchange kinetics during high-intensity leg exercise in humans. *Exp Physiol* 1998; 83:57-570.
- 4 Brisswalter J, Hausswirth C, Smith D, Vercruyssen F, Vallier JM. Energetically optimal cadence vs Freely-chosen cadence during cycling: effect of exercise duration. *Int J Sports Med* 2000; 21: 60-64.
- 5 Burnley M, Doust JH, Carter H, Jones AM. Effects of prior exercise and recovery duration on oxygen uptake kinetics during heavy exercise in humans. *Exp Physiol* 2001; 86: 417-425.
- 6 Chavarren J, Calbet JAL. Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *Eur J Appl Physiol* 1999; 80: 555-563.
- 7 Coast JR, Krause KM. Relationship of oxygen consumption and cardiac output to work of breathing. *Med Sci Sports Exerc* 1993; 25: 335-340.
- 8 Dengel DR, Flynn MG, Costill DL, Kirwan JP. Determinants of success during triathlon competition. *Res Quarter Exerc Sport* 1989; 60 : 234-238.
- 9 Deschodt VJ, Arsac LM, Rouard AH. Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25-m sprint front-crawl swimming. *Eur J Appl Physiol* 1999; 80: 192-199.
- 10 Di Prampero PE. Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 1981; 89: 143-223.
- 11 Farber HW, Schaefer EJ, Franey R, Grimaldi R, Hill NS. The endurance triathlon: metabolic changes after each event and during recovery. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 23: 959-965.
- 12 Hausswirth C, Brisswalter J. Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée: étude des paramètres d'influence. *Science & sports* 1999 ; 14 : 59-70.

- 13 Hausswirth C, Lehénaff D, Dréano P, Savonen K. Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31: 599-604.
- 14 Højlmer I. Oxygen uptake during swimming in man. *J Appl Physiol* 1972; 33:502-509.
- 15 Holmer I. Energy cost of arm stroke, leg kick, and the whole stroke in competitive swimming. *Eur J Appl Physiol* 1974 ; 33: 105-118.
- 16 Howley ET, Basset DR, Welch HG. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 1995; 27: 1292-1301.
- 17 Hue O, Le Gallais D, Chollet D, Boussana A, Préfaut C. The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes *Eur J Appl Physiol* 1998; 77: 98-105.
- 18 Jones SM, Passfield L. The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. In: Haake Sj (ed). *The engineering of sport*. Oxford: Blackwell Science, 1998: 265-274.
- 19 Karlsson J, Bonde-Petersen F, Henriksson J, Knuttgen HG. Effects of previous exercise with arms or legs on metabolism and performance in exhaustive exercise. *J Appl Physiol* 1975; 38: 763-767.
- 20 Kreider RB, Boone T, Thompson WR, Burkes S, Cortes CW. Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Med Sci Sports Exerc* 1988a; 20: 385-390.
- 21 Kreider RB, Cundiff DE, Hammett JB, Cortes CW, Williams KW. Effects of cycling on running performance in triathletes. *Annals Sports Med* 1988b; 3: 220-225.
- 22 Laursen PB, Rhodes EC, Langill RH. The effects of 3000-m swimming on subsequent 3-h cycling performance: implications for ultraendurance triathletes. *Eur J Appl Physiol* 2000; 83: 28-33.
- 23 Mador MJ, Acevedo FA. Effect of respiratory muscle fatigue on subsequent exercise performance. *J Appl Physiol* 1991; 70: 2059-2065.
- 24 Margaritis I. Facteurs limitants de la performance en triathlon. *Can J Appl Physiol* 1996; 21: 1-15.
- 25 McLaughlin JE, King GA, Howley ET, Basset DR Jr, Ainsworth BE. Validation of the Cosmed K4 b2 portable metabolic system. *Int J Sports Med* 2001; 22: 280-284.

- 26 Millet GP, Vleck VE. Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run transition in Olympic triathlon: review and practical recommendations for training Br J Sports Med 2001; 34: 384-390.
- 27 Pyne DB, Boston T, Martin DT, Logan A. Evaluation of the Lactate Pro blood lactate analyser. Eur J Appl Physiol 2000; 82:112-116.
- 28 Rieu M, Duvallet A, Scharapan L, Thieulart L, Ferry A. Blood lactate accumulation in intermittent supramaximal exercise. Eur J Appl Physiol 1988; 57: 235-242.
- 29 Vercruyssen F, Brisswalter J, Hausswirth C, Bernard T, Bernard O, Vallier JM. Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes. Med Sci Sports Exerc 2002; 34: 530-536.
- 30 Wasserman K, Whipp BJ, Koyal SN, Beaver WL. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise J Appl Physiol 1973; 35: 236-243.
- 31 Xu F, Rhodes EC. Oxygen uptake kinetics during exercise. Sports Med 1999; 27: 313-327.

Références bibliographiques (cyclisme-course à pied)

- Ahlquist L.E., Basset D.R., Sufit R., Nagle F.J., Thomas P. (1992)
The effects of pedaling frequency on glycogen depletion rates in type I and II quadriceps muscle fibers during submaximal cycling exercise. *Eur.J.Appl.Physiol.*, 65: 360-364
- Armstrong D.F., Peterson D.F. (1981)
Patterns of glycogen loss in muscle fibers: response to arterial occlusion during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 51: 552-556
- Balmer J., Davison R.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.
Int. J. Sports Med., 21: 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.
Arbeitsphysiologie, 24: 284-290
- Barany M. (1967)
ATPase activity of myosin correlated with speed of muscle shortening.
J. Gen. Physiol., 50: 197-216

- Barstow T.J., Jones A.M., Nguyen P.H., Casaburi R. (1996)
Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise.
J.Appl.Physiol., 81: 1642-1650
- Basset F.A., Boulay M.R. (1999)
Specificity of treadmill and cycle ergometer tests in triathletes, runners and cyclists.
Eur.J.Appl.Physiol., 81: 214-221
- Belli A., Avela J., Komi P.V. (1993)
Mechanical energy assessment with different methods during running.
Int.J.Sports.Med., 14: 252-256
- Belluye N., Cid M. (2000)
Approche biomécanique du cyclisme moderne, données de la littérature
Science et Sports, 16: 71-87
- Bentley DJ, Millet GP, Vleck VE, McNaughton LR (2002)
Specific aspects of contemporary triathlon: implications for physiological analysis and performance.
Sports Med., 32: 345-359
- Bergmeyer H.U. (1974)
Methods of enzymatic analysis.
New York: Academi Press
- Bigland-ritchie B., Johanson R., Lippold O.C., Woods J.J. (1983)
Contractile speed and EMG changes during fatigue of sustained maximal contractions.
J. Neurophysiol., 50: 313-324
- Bigland-ritchie B., Woods J.J. (1984)
Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue.
Muscle & Nerve, 7: 691-699
- Boning D., Gonen Y., Maasen N. (1984)
Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness.
Sports Med., 5: 92-97
- Boone T., Kreider R.B. (1986)
Bicycle exercise before running: effect on performance.
Annals of Sports Med., 3: 25-29
- Borg G. (1970)
Perceived exertion as an indicator of somatic stress.
Scand. J. Rehab. Med., 2: 92-98
- Bouisset S., Maton B. (1995)

Muscles, postures et mouvements.

Bases et applications de la méthode électromyographique. Edition des sciences et des arts.

Brandon L.J. (1995)

Physiological factors associated with middle distance running performance

Sports Med 95: 268-277

Brisswalter J., Fougeron B., Legros P. (1996)

Effect of three hours race walk on energy cost, cardiorespiratory parameters and stride duration in elite race walkers.

Int.J.Sports.Med., 3: 182-186

Brisswalter J., Mottet D. (1996)

Energy cost and stride duration at preferred transition gait speed between walking and running.

Can. J. Appl. Physiol., 21:471-480

Brisswalter J., Hausswirth C., Smith D., Vercruyssen F., Vallier J.M. (2000)

Energetically optimal cadence versus freely-chosen cadence during cycling: effect of exercise duration.

Int.J.Sports. Med., 20: 1-5

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.

Eur.J.Appl.Physiol., 62: 385-389

Butts N.K., Henry B.A., McLean D. (1991)

Correlations between VO_{2max} and performance times of recreational triathletes.

J. Sports Med. Phys. Fitness., 31: 339-344

Candau R., Belli A., Millet G.Y., Georges D., Barbier B., Rouillon J.D. (1998)

Energy cost and running mechanics during a treadmill run to voluntary exhaustion in humans.

Eur.J.Appl.Physiol., 77: 479-485

Cavagna G.A., Kaneko M. (1977)

Mechanical work and efficiency in level walking and running.

J.Physiol., 268: 467-481

Cavanagh P.R., Williams K.R. (1982)

The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running.

Med.Sci.Sports.Exerc., 14: 30-35

Chavarren J., Calbet J.A.L. (1999)

Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists.

Eur.J.Appl.Physiol., 80: 555-563

- Citterio G., Agostini E. (1984)
Selective activation of quadriceps muscle fibers according to bicycling rate.
J.Appl.Physiol., 37: 371-379
- Coast J.R., Cox R.H., Welch H.G., (1986)
Optimal pedalling rate in prolonged bouts of cycle ergometry.
Med.Sci.Sport.Exerc., 18: 225-230
- Coast J.R., Welch, H.G. (1985)
Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry.
Eur.J.Appl.Physiol., 53: 339-342
- Costill D.L. (1972)
Physiology of marathon running.
J. Am. Med. Ass., 221: 1024-1029
- Costill D.L., Thomason H., Roberts E. (1973)
Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running.
Med.Sci.Sport.Exerc., 5: 248-252
- Conley D., Krahenbuhl G. (1980)
Running economy and distance running performance in highly trained athletes.
Med.Sci.Sports.Exerc., 12 : 357-360
- Coyle E.F., Coggan A.R., Hopper M.K., Walters T.J. (1988)
Determinants of endurance in well-trained cyclists.
J.Appl.Physiol., 64: 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.
Med.Sci.Sports.Exerc., 23: 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 fibers.
Med.Sci.Sports.Exerc., 24: 782-788
- Croissant P.T., Boileau R.A. (1984)
Effect of pedal rate, brake load and power on metabolic responses to bicycle ergometer work.
Ergonomics, 27: 691-700
- Crow M.T., Kushmerick M.J. (1982)
Chemical energetics of slow-and-fast twitch muscles of the mouse.
J.Gen.Physiol., 79: 147-166
- Daniels J.T. (1985)
A physiologist's view of running economy.

Med.Sci.Sports.Exerc., 3: 332-338

Danner T., Plowman S.A. (1995)
Running velocity following an intense cycling bout in female duathletes and triathletes.
Women in Sport and Physical Activity Journal, 4: 29-39

Davies C.T.M., Thompson M.W. (1986)
Physiological responses to prolonged exercise in ultramarathon athletes.
J.Appl.Physiol., 61: 611-617

Dengel D.R., Flynn M.G., Costill D.L., Kirwan J.P. (1989)
Determinants of success during Triathlon competition.
Res. Quart. Exerc. Sports, 60: 234-238

De vito, G. Bernardi M., Sproviero E., Figura F (1995)
Decrease of endurance performance during olympic triathlon.
Int.J.Sports.Med., 16: 24-28

di Prampero P.E. (1981)
Energetics of muscular exercise.
Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol., 89: 144-222

di Prampero P.E. (1986)
The energy cost of human locomotion on land and in water.
Int.J.Sports.Med., 7: 55-72

Dickinson S. (1929)
The efficiency of bicycle-peddalling, as affected by speed and load.
J. Physiol., 242-255

Duchateau J., Le Bozec S., Hainaut K. (1986)
Contributions of slow and fast muscles of triceps surae to a cyclic movement.
Eur.J.Appl.Physiol., 55: 476-481

Eckermann P., Millahn H.P. (1967)
Der einfluß der drehzahl auf die herzfrequenz und die sauerstoffaufnahme bei konstanter leistung am fahrradergometer.
In Z Angrew Physiol [einschlArbeitsphysiol] 23: 340-344

Edwards, R.H.T. (1981)
Human muscle function and fatigue.
In Human muscle fatigue: Physiological Mechanisms, edited by R. Porter and J. Whelan.
London: Pitman, 1-18

Ericson M.O., Nisell R., Arborelius U.P., Ekholm J. (1985)
Muscular activity during ergometer cycling.
Scand J Rehab Med, 17: 53-61

- Falola J.M., Brisswalter J., Delpech N. (1999)
Effet du port d'une charge sur le tronc sur la détermination d'une vitesse de marche optimale.
Sciences et Sports, 14: 201-204
- Faria I.E. (1992)
Energy expenditure, aerodynamics and medical problems in cycling : an update.
Sports med, 14: 43-63
- Fenn W.O. (1930)
Work against gravity and work due to velocity changes in running.
Am. J. Physiol. 93: 433-462
- Foster C., Hector L.L., Welsh R., Schragger M., Green M.A., Snyder A.C. (1995)
Effects of specific versus cross-training on running performance.
Eur.J.Appl.Physiol., 70: 367-372
- Francescato M.P., Girardis M., di Prampero P.E. (1995)
Oxygen cost of internal work during cycling.
Eur.J.Appl.Physiol., 72: 51-57
- Fuglevand A., Zachowski K., Huey K., Enoka R.
Impairment of neuromuscular propagation during human fatiguing contractions at submaximal forces.
J.Physiol. (Lond.), 460: 549-572
- Gaesser G.A., Brooks G.A. (1975)
Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate.
J.Appl.Physiol., 38: 1132-1139
- Garside I., Doran D. (2000)
Effects of bicycle frame ergonomics on triathlon 10-km running performance.
J. Sports Sci., 18: 825-833
- Gibbs C.L., Gibson, W.R. (1972)
Energy production of the rat soleus muscle.
Am. J. Physiol. 223: 864-871
- Goldspink G. (1978)
Energy turnover during contraction of different types of muscles.
In: Asmussen E, Jorgenson K (eds) Biomechanics VI-A. University Park, Baltimore, 27-39
- Gollnick P.D., Piehl K., Saltin B. (1974)
Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates.
J.Physiol., 47-57
- Goto S., Toyoshima S., Hoshikawa T. (1976)
Study of the integrated EMG of leg muscles during pedaling at various loads, frequency, and equivalent power. *In : Biomechanics V-A.E. Asmussen and K. Jorgensen (Eds). Baltimore, MD: University Pak Press: 246-252*

Gotshall R.W., Bauer T.A., Fahmer S.L. (1996)
Cycling cadence alters exercise hemodynamics.
Int.J.Sports.Med., 17: 17-21

Gottschall J.S., Palmer B.M. (2000)
Acute effects of cycling on running step length and step frequency.
J. Strength Conditioning Research, 14: 97-101

Gregor R.J., Broker J.P., Ryan M.M. (1991)
The biomechanics of cycling.
Exerc. Sci. Review, 9: 127-168

Guezennec C.Y., Vallier J.M., Bigard A.X., Durey A. (1996)
Increase in energy cost of running at the end of a triathlon.
Eur.J.Appl.Physiol., 73: 440-445

Hagan R.D., Weis S.E., Raven P.B. (1992)
Effect of pedal rate on cardiorespiratory responses during continuous exercise.
Med. Sci. Sport. Exerc., 24: 1088-1095

Hagberg J.M., Mullin J.P., Giese M.D., Spitznagel E. (1981)
Effect of pedaling rate on submaximal exercise responses of competitive cyclists.
J.Appl.Physiol., 51: 447-451

Hagberg J.M., Mullin J.P., Nagle F.J. (1978)
Oxygen consumption during constant-load exercise.
J.Appl.Physiol., 45 : 381-384

Hanon C., Thépaut-Mathieu C., Hausswirth C., Le Chevalier J. M. (1998)
Electromyogram as an indicator of neuromuscular fatigue during incremental exercise.
Eur.J.Appl.Physiol., 78: 315-323

Hausswirth C., Bigard A.X., Berthelot M., Thomaidis M., Guezennec C.Y. (1996)
Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon.
Int.J.Sports.Med., 17: 572-579

Hausswirth C., Bigard A.X., Guezennec C.Y. (1997a).
Relationships between mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon.
Int.J.Sports.Med., 18: 330-339

Hausswirth C., Bigard A.X., Le Chevalier J.M. (1997b)
The cosmed K4 telemetry system as an accurate device for oxygen uptake measurements during exercise.
Int.J.Sports.Med., 18: 449-453

Hausswirth C., Brisswalter J. (1999)
Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée: étude des paramètres

d'influence.

Science 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.

Med.Sci.Sports Med., 31: 599-604

Hauswirth C., Brisswalter J., Vallier J.M., Smith D., Lepers R. (2000)

Evolution of electromyographic signal, running economy and perceived exertion during different prolonged exercises.

Int.J.Sports.Med., 21: 429-436

Hauswirth C., Lehénaff D. (2001)

Physiological demands of running during long distance runs and triathlons.

Sports med, 31: 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.

Med.Sci.Sports Med., 33: 485-491

Hauswirth C. (2002)

Le point sur la course à pied en triathlon: du constat scientifique à l'application sur le terrain.

De Sydney à Athènes...et au delà, la nouvelle olympiade du triathlon

3^{ème} congrès international sur le Triathlon, INSEP, Paris.

Heglund N.C., Cavagna G.A. (1978)

Mechanical work, oxygen consumption, and efficiency in isolated frog and rat muscle

Am. J. Physiol., 253: 22-29

Hess P., Seusing J. (1963)

Der einfluß der trittfrequenz und des pedaldruckes auf die sauerstoffaufnahme bei

untersuchungen am ergometer.

In Z Angrew Physiol [einschlArbeitsphysiol] 19: 468-475

Hogberg P. (1952)

Length of stride, stride frequency, flight period and maximum distance between the feet during running with different speeds.

Arbeitsphysiologie, 14: 431-436

Holt K.G., Hamill J., Andres R.O. (1991)

Predicting the minimal energy costs of human walking.

Med.Sci.Sports Med., 23: 491-498

Holt K.G., Jeng S.F., Ratcliffe R., Hamill J. (1995)

Energetic cost and stability during human walking at the preferred stride frequency.
J. Mot. Behav., 27: 164-178

Horowitz J.F., Sidossis L.S., Coyle E.F. (1994)
High efficiency of type I muscle fibers improves performance.
Int.J.Sport.Med., 15: 152-157

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.
Eur.J.Appl.Physiol., 77: 98-105

Hue O., Le Gallais D., Chollet D., Préfaut C. (2000)
Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake in present triathletes.
Can.J.Appl.Physiol., 25: 102-113

Hull M.L., Gonzales H. (1988)
Bivariate optimization of pedalling rate and crank arm length in cycling .
J.Biomechanics, 21: 839-849

Hull M.L., Jorge M. (1985)
A method for biomechanical analysis of bicycle pedalling.
J.Biomechanics, 18: 631-644

Kaneko M. (1990)
Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency.
J.Biomechanics, 23: 57-63

Kaneko M., Yamazaki T. (1978)
Internal mechanical work due to velocity changes of the limb in working on a bicycle ergometer. In: Asmussen E., Jurgenson K. (eds) *Biomechanics VI-A*. University Park Press, Baltimore, Md: 86-92

Kelso J.A.S., Holt K.G., Rubin P., Kigler P.N. (1981)
Pattern of human interlimb coordination emerge from the properties of nonlinear limit cycle oscillatory processes: Theory and data
J. Mot. Behav., 13: 226-261

Kent-Braun J.A. (1999)
Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during sustained maximal effort.
Eur.J.Appl.Physiol., 80: 57-63

Kohrt W.M., Morgan D.W., Bates B., Skinner J.S. (1987)
Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling and running.

Med.Sci.Sports.Exerc., 19: 51-55

Kohrt W.M., O'Connor J.S., Skinner J.S. (1989)
Longitudinal assessment of responses by triathletes to swimming, cycling, and running.
Med.Sci.Sports.Exerc., 21: 569-575

Kreider R.B., Boone T., Thompson W.R., Burkes S., Cortes C.W. (1988a)
Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance.
Med.Sci.Sports.Exerc., 20: 385-390

Kreider R.B., Cundiff D.E., Hammett J.B., Cortes C.W., Williams K.W. (1988b)
Effect of cycling on running performance in triathletes.
Annals of Sports Med., 3: 220-225

Kushmerick M.J., Davies R.E. (1978)
The chemical energetics of muscle contraction. II. The chemistry, efficiency and power of maximally working sartorius muscle.
Proc R Soc Lond (Biol), 1174: 315-353

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

Lafortune M.A., Cavanagh P.R. (1983)
Effectiveness and efficiency during bicycle riding.
In Biomechanics VIII-B, Champaign, IL: Human Kinetics, 928-936

Lajoie C., Laurencelle L., Trudeau F. (2000)
Physiological responses to cycling for 60 minutes at maximal lactate steady state.
Can.J.Appl.Physiol., 25: 250-261

Landers G.J., Blanksby B.A., Ackland T.R., Smith D. (2000)
Morphology and performance of world championship triathletes.
Annals of Hum. Biol., 27: 387-400

Laurenson N.M., Fulcher K. Y., Korkia P. (1993)
Physiological characteristics of elite and club level female during running.
Int.J.Sport.Med., 14: 445-449

Lepers R., Pousson M.L., Maffiuletti N.A., Martin A., Van Hoecke J. (2000a)
The effects of a prolonged running exercise on strength characteristics.
Int.J.Sport.Med., 21: 275-280

Lepers R., Hausswirth C., Maffiuletti N.A., Brisswalter J., Van Hoecke J. (2000b)
Evidence of neuromuscular fatigue after prolonged cycling exercise.
Med.Sci.Sports.Exerc., 32 : 1880-1886

Lepers R., Millet G.Y., Maffiuletti N.A., Hausswirth C., Brisswalter J. (2001a)
Effect of pedalling rates on physiological response during an endurance cycling exercise.

Eur.J.Appl.Physiol., 85: 392-395

Lepers R., Maffiuletti N.A., Millet G.Y. (2001b)
Effect of cycling cadence on contractile and neural properties of knee extensors.
Med.Sci.Sports.Exerc., 33 : 1882-1888

Lepers R., Maffiuletti N.A., Rochette L., Brugniaux J., Millet G.Y. (2002)
Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise.
J.Appl.Physiol., 92: 1487-1493

Lewis S.F., Snell P.G., Taylor W.F. (1985)
Role of muscle mass and mode of contraction in circulatory responses to exercise.
J.Appl.Physiol., 58: 146-151

Löllgen H., Graham T., Sjogard G. (1980)
Muscle metabolites, force, and perceived exertion bicycling at varying pedal rates.
Med. Sci. Sports. Exerc., 12: 345-351

Lucia A., Pardo J., Durantez A., Hoyos J., Chicharro J.L. (1998)
Physiological differences between professional and elite road cyclists.
Int. J. Sport. Med., 19: 342-348

Lucia A, Hoyos J., Chicharro J.L. (2000)
The slow component of VO₂ in professional cyclists.
Br. J. Sports. Med., 34: 367-374

Lucia A., Hoyos J., Chicharro J.L. (2001)
Preferred pedalling cadence in professional cycling.
Med. Sci. Sports. Exerc., 33: 1361-66

MacIntosh B.R., Neptune R.R., Horton J.F. (2000)
Cadence, power and muscle activation in cycle ergometry.
Med. Sci.Sports.Exerc., 32: 1281-1287

McKay G.A., Banister E.W. (1976)
A comparison of maximum oxygen uptake determination by bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speeds.
Eur.J.Appl.Physiol., 35: 191-200

Margaritis I. (1996)
Facteurs limitants de la performance en triathlon.
Can.J.Appl.Physiol, 21: 1-15

Marsh A.P., Martin P.E. (1993)
The association between cycling experience and preferred and most economical cadences.
Med.Sci.Sports.Exerc., 25: 1269-1274

Marsh A.P., Martin P.E. (1995)
The relationship between cadence and lower extremity EMG in cyclists and noncyclists.

Med.Sci.Sports.Exerc., 27: 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.

Med.Sci.Sports.Exerc., 29: 1225-1232

Marsh A.P., Martin P.E. (1998)

Perceived exertion and the preferred cycling cadence.

Med.Sci.Sports.Exerc., 30 : 942-948

Marsh A. P., Martin P. E., Foley K.O. (2000a).

Effect of cadence, cycling experience, and aerobic power on delta efficiency during cycling.

Med.Sci.Sports.Exerc., 32: 1630-1634

Marsh, A. P., Martin P.E., Sanderson D.J. (2000b)

Is a joint moment-based cost function associated with preferred cycling cadence ?

J. Biomechanics, 33: 173-180

Martin P.E., Heise G.D., Morgan D.W. (1993)

Interrelationships between mechanical power, energy transfers, and walking and running economy .

Med.Sci.Sports.Exerc., 25: 508-515

Maton B. (1981)

Human motor unit activity during the onset of muscle fatigue in submaximal isometric isotonic contraction.

Eur.J.Appl.Physiol., 46: 271-281

Medbø J.L., Mohn A.C., Tabata I., Bahr R., Vaage O., Sejersted O.M. (1988)

Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit.

J.Appl.Physiol., 64: 50-60

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.

Int.J.Sport.Med., 21: 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.

Br. J. Sports. Med., 34: 384-390

Millet G.P., Millet G.Y., Candau R.B. (2001)

Duration and seriousness of running mechanics alterations after maximal cycling in triathletes. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 41: 147-153

Millet G.Y., Lepers R., Maffiuletti N.A., Babault N., Martin V., Lattier G. (2002) Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. *J. Appl. Physiol.*, 92: 486-492

Milner-Brown H.S., Stein R.B. (1975) The relation between the surface electromyogram and muscular force. *J. Physiol.*, 246 : 549-569

Miura H., Kitagawa K., Ishika T. (1997) Economy during a simulated laboratory test triathlon is highly related to olympic distance triathlon. *Int.J.Sports.Med.*, 18: 276-280

Morgan D.W., Martin P.E., Krahenbuhl G.S. (1989) Factors affecting running economy. *Sports Med.*, 7: 310-330

Moritani T., Nagata A., Muro M. (1982) Electromyographic manifestations of muscular fatigue. *Med.Sci.Sports.Exerc.*, 14: 198-202

Mutton D.L., Loy S.F., Rogers D.M., Holland G.J., Vincent W.J., Heng M. (1993) Effect of run vs combined cycle/run training on VO₂ max and running performance. *Med.Sci.Sports.Exerc.*, 12: 1393-1397

Neptune R.R., Kautz S.A., Hull M.L. (1997) The effect of pedaling rate on coordination in cycling. *J.Biomechanics*, 30: 1051-1058

Neptune R.R., Hull M.L. (1998) Evaluation of performance criteria for simulation of submaximal steady-state cycling using a forward dynamic model. *J. Biomech. Engineering*, 120: 334-341

Neptune R.R., Van den Bogert A. J. (1998) Standard mechanical energy analyses do not correlate with muscle work in cycling. *J. Biomechanics*, 31: 239-245

Neptune R.R., Herzog W. (1999) The association between negative muscle work and pedaling rate. *J. Biomechanics*, 32: 1021-1026

Neptune R.R., Hull M.L. (1999) A theoretical analysis of preferred pedaling rate selection in endurance cycling.

J. Biomechanics, 32: 409-415

Neptune R.R., Herzog W. (2000)

Adaptation of muscle coordination to altered task mechanics during steady-state cycling.

J. Biomechanics, 33: 165-172

Nickleberry B.L., Brooks G.A. (1996)

No effect of cycling experience on leg cycle ergometer efficiency.

Med.Sci.Sports.Exerc., 28: 1396-1401

Nicol C., Komi P.V., Marconnet P. (1991)

Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance. I. Changes in muscle in force and stiffness characteristics.

Scand. J. Med. Sci. Sports 1: 10-17

O'Toole M.L., Douglas P.S. (1995)

Applied Physiology of Triathlon.

Sports Med., 19: 251-267

O'Toole, M. L. Douglas P. S., Hiller W. D. B. (1989)

Lactate, oxygen uptake, and cycling performance in triathletes.

Int.J.Sports.Med., 10: 413-418

Padilla S., Mujika I., Cuesta G., Goirirna J.J. (1999)

Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling.

Med.Sci.Sports.Exerc., 31: 878-885

Palmer G. S., Noakes T.D., Hawley J.A. (1997)

Effects of steady-state versus stochastic exercise on subsequent cycling performance.

Med.Sci.Sports.Exerc., 29: 684-687

Palmer G.S., Borghouts L.B., Noakes T.D. (1999)

Metabolic and performance responses to constant-load vs. variable intensity exercise in trained cyclists.

J. Appl. Physiol., 87: 1186-1196

Pandolf K.B., Noble B.J. (1973)

The effect of pedaling speed and resistance changes on perceived exertion for equivalent power outputs on the bicycle ergometer.

Med.Sci.Sports.Exerc., 5: 132-136

Patterson R.P., Moreno M.I. (1990)

Bicycle pedalling forces as a function of pedaling rate and power output.

Med.Sci.Sports.Exerc., 22: 512-516

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: 147-156

Poole D.C., Richardson R.S. (1997)
Determinants of oxygen uptake.
Sports Med., 24: 308-320

Pyne D.B., Boston T., Martin D.T., Logan A. (2000)
Evaluation of the lactate pro blood lactate analyser.
Eur.J.Appl.Physiol., 82: 112-116

Quigley E.J., Richards J.G. (1996)
The effects of cycling on running mechanics.
J. Appl. Biomech., 12: 470-479

Raasch C.C., Zajac F.E., Ma B., Levine W.S. (1997)
Muscle coordination of maximum-speed pedaling.
J. Appl. Biomech., 30: 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.
Med.Sci.Sports.Exerc., 33S: S341

Redfield R., Hull M.L. (1986)
On the relation between joint moments and pedalling rates at constant power in bicycling
J. Biomech., 19: 317-329

Sahlin K., Seger J.Y. (1995)
Effects of prolonged exercise on the contractile properties of human quadriceps muscle.
Eur. J. Appl. Physiol., 71 : 180-186

St Clair Gibson A., Schabert E.J., Noakes T.D. (2001)
Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling.
Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol., 281: 187-196

Sanderson D.J. (1991)
The influence of cadence and power output on the biomechanics of force application during steady-rate cycling in competitive and recreational cyclists.
J. Sports Sci., 9: 191-203

Sanderson D.J., Hennig E.M., Black A.H. (2000)
The influence of cadence and power output on force application and in-shoe pressure distribution during cycling by competitive and recreational cyclists.
J. Sports Sci., 18 : 173-181

Sargeant A.J., Beelen A. (1993)
Human muscle fatigue in dynamic exercise

in: Sargeant A.J., Kernell D. Eds: *Neuromuscular fatigue (Academy series)*: 81-92

Sargeant, A.J. (1994)

Human power output and muscle fatigue.

Int.J.Sports.Med., 15: 116-121

Sargeant, A. J. (1996)

Human power output- Determinants of maximum performance.

in Marconnet, P., Saltin, B., Komi, P.V., Poortmans, J. : *Human muscular function during dynamic exercise. Med Sport Sci. Basel, Karger.*, 41: 10-20

Saunders M.J., Evans E. M. Arngrimsson S. A. Allison J. D. Warren G. L. Cureton K. J. (2000)

Muscle activation and the slow component rise in oxygen uptake during cycling.

Med.Sci.Sports.Exerc., 32: 2040-2045

Schabert E.J., Killian S.C., Gibson A.S., Hawley J.A., Noakes T.D. (2000)

Prediction of triathlon race time from laboratory testing in national triathletes.

Med.Sci.Sports.Exerc., 32: 844-849

Scheuermann B.W., Hoelting B.D., Noble M.L., Barstow T.J. (2001)

The slow component of O₂ uptake is not accompanied by changes in muscle EMG during repeated bouts of heavy exercise in humans.

J. Physiol., 531: 245-256

Seabury J.J., Adams W.C., Ramey M.R. (1977)

Influence of pedaling rate and power output on energy expenditure during bicycle ergometry.

Ergonomics, 20: 491-498

Shinohara M., Moritani T. (1992)

Increase in neuromuscular activity and oxygen uptake during heavy exercise.

Ann.Physiol.Anthrop., 11: 257-262

Sidossis L.S., Horowitz J.F., Coyle E.F. (1992)

Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency.

Int. J. Sports Med., 13: 407-411

Sleivert G.G., Wenger H.A. (1993)

Physiological predictors of short-course triathlon performance.

Med.Sci.Sports.Exerc., 25: 871-876

Sleivert G.G., Rowlands D.S. (1996)

Physical and physiological factors associated with success in the triathlon.

Sports Med., 22: 8-18

Smith D., Lee H., Pickard R. (1999)

Power demands of the cycle leg during elite triathlon competition.

2^{ème} congrès international sur le Triathlon, INSEP, Paris, 224-230.

- Sparrow W. A. (1983)
The efficiency of skilled performance.
J. Mot. Behav., 15: 237-261
- Stainsby W.N., Gladden L.B., Barclay J.K., Wilson J.K. (1980)
Exercise efficiency: validity of base-line subtractions.
J.Appl.Physiol., 48: 518-522
- Stuart K., Howley E.T., Gladden B., Cox R.H. (1981)
Efficiency of trained subjects differing in maximal oxygen-uptake and type of training.
J.Appl.Physiol., 50: 444-449
- Suzuki Y. (1979)
Mechanical efficiency of fast and slow twitch muscle fibers in man during cycling.
J.Appl.Physiol., 47: 263-267
- Takaishi T., Yasuda Y., Moritani T. (1994)
Neuromuscular fatigue during prolonged pedalling exercise at different pedalling rates.
Eur.J.Appl.Physiol., 69: 154-158
- Takaishi T., Yasuda Y., Ono T., Moritani T. (1996)
Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists.
Med.Sci.Sports.Exerc., 28: 1492-1497
- Takaishi T., Yamamoto T., Ono T., Ito T., Moritani T. (1998)
Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists.
Med.Sci.Sports.Exerc., 30: 442-449
- Tanaka, H. (1994)
Effects of cross training : transfer to training effects on VO₂ max between cycling, running and swimming.
Sports Med., 18: 330-339
- Van Ingen Schenau G.J., Cavanagh P.R. (1990)
Power equations in endurance sports.
J.Biomechanics, 23: 865-881
- Vitasalo J.T., Komi P.V., Jacobs I., Karlsson J. (1982)
Effects of prolonged cross-country skiing on neuromuscular performance.
In: Exercise and Sport Biology, International Series on Sport Sciences, Komi (Ed.)
Champaign, IL Human Kinetics Publishers, 12: 191-198
- Vollestad N.K., Blom P.S.C. (1985)
Effects of varying exercise intensity on glycogen depletion in human muscle fibres.
Acta.Physiol.Scand., 125: 395-495
- Wasserman K., Whipp B.J., Koyal S.N., Beaver W.L. (1973)
Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise.

J.Appl.Physiol., 35:236-243

Whipp B.J. (1994)

The slow component of O₂ uptake kinetics during heavy exercise.

Med.Sci.Sports.Exerc., 26: 1319-1326

Whipp B.J., Wasserman K. (1969)

Efficiency of muscular work.

J.Appl.Physiol., 26: 644-648

Widrick J.J., Freedson P.S., Hamill J. (1992)

Effect of internal work on the calculation of optimal pedaling rates.

Med.Sci.Sports.Exerc., 24: 376-382

Willis W.T., Jackman M.R. (1994)

Mitochondrial function during heavy exercise.

Med.Sci.Sports.Exerc., 26: 1347-1354

Winter D.A. (1979)

A new definition of mechanical work done in human movement.

J.Appl.Physiol., 46: 79-83

Winter D.A. (1990)

Mechanical work, energy, and power.

In: Winter DA (ed) Biomechanics and motor control of human movement.

Wiley, New York, 103-139

Witt M. (1993)

Co-ordination of leg muscles during cycling and running in triathlon.

XIVth Congress of International Society of Biomechanics, Paris, 1470-1471

Woledge R.C. (1998)

Possible effects of fatigue on muscle efficiency.

Acta.Physiol.Scand., 162: 267-273

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.

J.Sports.Med.Phys.Fitness, 37: 122-30

Résumé

Ce travail a pour objectif d'étudier les adaptations physiologiques et biomécaniques au cours des enchaînements natation-cyclisme et cyclisme-course à pied d'un triathlon. Dans ce contexte, plusieurs études ont été réalisées :

La première étude compare l'influence d'un 750 m de natation sollicitant soit les bras, soit les jambes, soit les bras et les jambes sur la dépense énergétique lors d'un exercice subséquent de 15 min de cyclisme. Le principal résultat montre que la sollicitation préalable des bras uniquement n'entraîne aucune variation significative des paramètres physiologiques mesurés en cyclisme comparativement à une sollicitation préalable des bras et des jambes.

La deuxième et la troisième étude s'intéressent à l'influence d'une diminution de l'intensité relative de la nage au cours d'un 750 m, soit par le port d'une combinaison (étude 2), soit grâce au drafting (étude 3) sur l'adaptation physiologique en cyclisme. Les résultats montrent d'une part que le port de combinaison permet d'améliorer le rendement mécanique du cyclisme de 12%, et d'autre part que les effets combinés du port de combinaison et du drafting entraînent une augmentation supplémentaire du rendement de 4,8%.

La quatrième étude a pour objectif d'analyser l'influence de la cadence de pédalage sur l'adaptation physiologique lors d'un enchaînement natation-cyclisme. Le principal résultat indique que la dépense énergétique en cyclisme est significativement inférieure lors d'un enchaînement natation-cyclisme (1500m-30min) réalisé à une cadence proche de la cadence énergétiquement optimale (75 ré.v.min⁻¹) comparativement à une cadence proche de la cadence classiquement adoptée par les triathlètes en compétition (95 ré.v.min⁻¹). Ces résultats soulignent l'influence d'une épreuve préalable de natation de courte distance sur la dépense énergétique en cyclisme. Des travaux ultérieurs intégrant une épreuve de course à pied seraient nécessaires afin d'analyser ces effets au cours d'un triathlon entier.

L'objectif de notre second travail lié à l'enchaînement cyclisme-course à pied était d'étudier, les critères qui déterminent le choix de la cadence de pédalage et les conséquences de ce choix sur *a)* l'adaptation en cyclisme avec la durée de l'exercice et *b)* l'adaptation en course à pied (Càp) lors d'un enchaînement cyclisme-course à pied. Notre principale expérimentation a étudié l'influence d'une épreuve de cyclisme réalisée à 3 cadences différentes (CL = 81 rpm ; CEO = 72 rpm ; 90 rpm = optimum mécanique théorique) sur l'adaptation lors de la Càp subséquente. Le principal résultat met en évidence que le choix d'une CEO induit une réduction de $\dot{V}O_2$ lors du cyclisme (30-min) et de la Càp (15-min) comparativement aux autres conditions expérimentales.

Suite à ces résultats, l'objectif de la troisième étude est d'analyser l'effet de 3 cadences différentes (60, 80 et 100 rpm) en cyclisme (20-min) sur la performance en Càp (3000 m). Le principal résultat ne montre aucune influence significative de la cadence sur la performance. Cependant, un effet différencié de la cadence est observé sur les réponses ventilatoires et cinématiques lors de la Càp subséquente.

Nos résultats suggèrent que le choix de la cadence en triathlon peut influencer l'adaptation physiologique du sujet lors de l'enchaînement cyclisme-Càp. Dans un contexte proche des contraintes de l'activité, des études ultérieures sont nécessaires pour évaluer la relation entre le choix d'une cadence de pédalage particulière et la performance en Càp.

Mots clés : triathlon – cadence – coût énergétique – enchaînement – lactates