

Biomécanique

- La fréquence de pédalage -

Sources : *Cyclisme et performance*, G.Haushalter, Chiron, Paris, 1990.
La biomécanique en cyclisme. Biologie et médecine du sport, FFC, Paris, 1994.
Physiologie du sport, Masson, 4^e édition, Paris, 1997.
Armstrong à la moulinette, G.Goetghebuer, in Sport et Vie n°79, Juil.-Août 2003.
Optimisation de la fréquence de pédalage en fonction des différentes conditions de course, F.Hintzy & F.Grappe, in F.Grappe, Cyclisme et optimisation de la performance, 2^e édition, De Boeck, Bruxelles, 2009.
Cyclisme & Science, Max Glaskin, Vigot, Paris, 2015.
Caractérisation du pattern mécanique et neuromusculaire du pédalage en cyclisme : effets de la cadence et de la fatigue au cours de l'exercice prolongé, G.Sarre, Thèse de doctorat, Dijon, 2004.

Deux composantes déterminent la puissance mécanique développée par le cycliste :

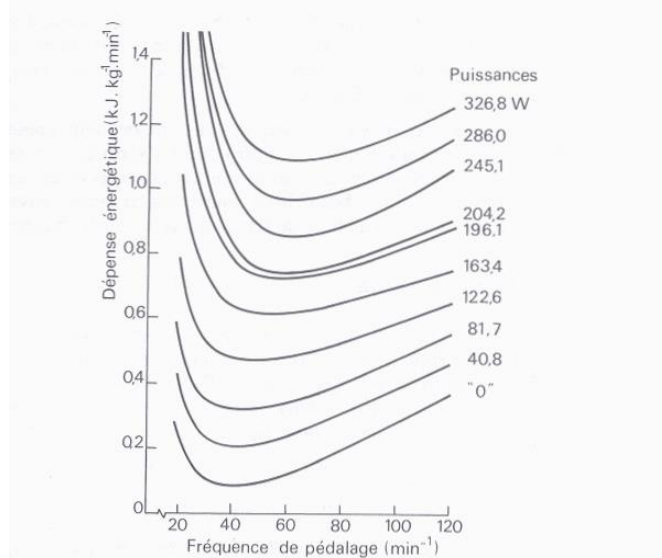
- la fréquence de pédalage ou nombre de rotations par minutes (exprimée en répétitions par minute : rpm),
- la force (couple moteur) à appliquer sur les pédales qui dépend du choix du braquet et de la longueur des manivelles.

Notons que deux combinaisons différentes de couple et de fréquence peuvent produire un même niveau de puissance, et que ces combinaisons sont soumises aux choix du cycliste, qui peut choisir de privilégier plutôt la force, plutôt la fréquence, ou les deux.

$$\text{Puissance} = \text{Couple} \times \text{Fréquence}$$

Comme la consommation d'oxygène pour une même puissance n'est pas forcément identique selon la combinaison couple-fréquence utilisée, il existe donc un couple et une fréquence optimale pour développer un certain niveau de puissance. **La question centrale est d'identifier cette fréquence optimale de pédalage, c'est à dire la fréquence pour laquelle, à vitesse de déplacement égale, la dépense énergétique est la plus faible.**

Selon Monod et Frandrois (1997), la fréquence optimale de pédalage pour des non spécialistes enregistrée en laboratoire se situe entre 40 et 50 tours par minute.



La dépense énergétique, pour chaque puissance d'exercice, varie avec la fréquence de pédalage et passe par une valeur minimale d'autant plus élevée que la puissance d'exercice est elle-même élevée.

(d'après Seabury et coll., Ergonomics, 1977, 20, 491-498).

Pourtant, les fréquences de pédalage adoptées par des coureurs professionnels sont sensiblement plus importantes, et oscillent entre 90 et 110 rpm sur le plat (parfois plus : par exemple Lance Armstrong). L'exemple le plus frappant pour illustrer la relation entre la fréquence de pédalage et la performance est le record du monde de l'heure :

Coureur	Année	Distance (km)	Braquet	Fréquence (rpm)
Coppi	1942	45,840	52 X 15	105,4
Anquetil	1956	46,169	52 X 15	105,9
Merckx	1972	49,432	52 X 14	103,9
Moser	1986	49,800	51 X 14	105,3
Indurain	1994	52,713	52 X 12 ?	100,8
Rominger	1994			102,2
Boardman	1996	56,375	52 X 13 ?	104,2
Wiggins	2015	54,526	58 X 14	108 (max)
Campenaerts	2019	55,089	61 X 14	99 (mini)

Concernant la fréquence de pédalage donc, les premières recherches en laboratoire et la pratique ne semblent pas être d'accord. D'autres études réalisées chez des cyclistes et des triathlètes confirment les observations de Seabury et coll. en révélant une différence significative entre les cadences librement choisies (85-95 rpm) et les cadences énergétiquement optimales (65-70 rpm). Le coureur, à l'entraînement ou en compétition, ne semble pas choisir des cadences économiques du point de vue de la dépense énergétique. Ce décalage n'existe pas en course à pied ou en marche, car dans ces pratiques, l'athlète adopte spontanément le patron de locomotion associé à un coût énergétique faible.

De nombreux auteurs ont montré pour chaque vitesse de course, allant de 9 à 16 km/h, des athlètes de bon niveau adoptent un rapport amplitude/fréquence de la foulée très proche d'un compromis idéal (Cavanagh et Williams, 1982 ; Hogberg, 1952, Kaneko et coll., 1987). C'est la preuve que l'activité de l'athlète de haut niveau est à la fois efficace et efficiente (notion d'économie) et qu'il existe chez le sportif un **processus d'optimisation de la performance**. Cavanagh et Williams ont notamment montré que la consommation excédentaire d'énergie, chez des coureurs de demi-fond de bon niveau, est inférieure de 0,5% à la dépense optimale lors d'une course à 14 km/h.

Marc Durand et coll. (1991) ont montré que le passage de la marche à la course est aussi marqué par un processus d'optimisation de la performance. Les auteurs ont observé que des sujets placés sur un tapis roulant dont la vitesse augmente ou diminue optent alternativement pour la course et la marche de manière à minimiser leur consommation d'oxygène : si on court à 3km/h, la dépense énergétique est plus importante que si l'on marche, et si l'on marche à 15 km/h, la dépense énergétique est supérieure à celle de la course. En d'autres termes, les sujets sont capables d'activer le programme moteur qui minimise la consommation d'oxygène.

On observe sur tapis roulant que l'individu se met à courir au point de croisement énergétique : il y a donc un processus d'optimisation, l'individu choisit le bon PMG selon la vitesse → une modification quantitative (ou de degré) provoque une modification qualitative (ou de nature).

Analyse de la tâche et étude des comportements de l'enfant en sport et en éducation physique. Thèse non publiée pour l'Habilitation à Diriger la Recherche, Montpellier, Université Montpellier I, 1991.

Récemment, pour répondre à la question de la fréquence de pédalage optimale, F.Hintzy & F.Grappe (2009) proposent de différencier trois grands types de conditions d'exercice :

- des exercices réalisés entre intensité légère et seuil ventilatoire 2 ou seuil anaérobie (I1 à I4),
- des exercices réalisés à intensité sur-critique (I5 et I6),
- des exercices réalisés à intensité maximale (I7).

I. Exercices réalisés entre intensité légère et seuil ventilatoire 2 (I1-I4)

Dans cette condition d'exercice, la dépense énergétique occasionnée par l'exercice est la variable essentielle à optimiser. Cette condition renvoie à 80% des efforts réalisés lors d'une course sur route et à 95% de l'effort d'un contre-la-montre (à I4). Il s'agit de dépenser le moins d'énergie possible pour réaliser l'exercice demandé avec comme source d'énergie principale la source aérobie glycolitique et/ou lipolytique.

Hintzy et al. (1999) ont montré, lors d'un test sous le seuil anaérobie (puissance mécanique = 150 W) réalisé sur bicyclette ergométrique en laboratoire que la fréquence optimale oscille entre 60 et 70 rpm (consommation d'oxygène la plus faible pour la même puissance développée). Toutefois, Grappe (2005) propose six variables qui sont susceptibles d'influencer cette fréquence de pédalage optimale :

1. Influence de la puissance développée : la fréquence de pédalage est d'autant plus élevée que la puissance imposée est elle-même élevée car d'un point de vue mécanique, il est logique d'augmenter la fréquence si la puissance augmente, de façon à diminuer la force à développer (une force très élevée oblige à relancer les pédales à chaque passage des zones de transition haute et basse). Cette relation puissance / fréquence de pédalage optimale explique en partie le décalage entre la fréquence naturellement choisie sur le terrain (élevée, vers 90-110 rpm) et la fréquence la plus rentable (faible, vers 60 rpm). Cependant, même si le test est réalisé à des puissances élevées, cette fréquence optimale ne dépasse pas 70 rpm et reste donc encore bien inférieure aux fréquences de 90-110 rpm relevées sur le terrain.
2. Influence de la durée de l'exercice : Brisswalter et coll. (2000) ont observé une augmentation de la fréquence de pédalage optimale de 70 à 86 rpm à la suite d'un exercice de pédalage d'une durée de 30 min.
3. Influence de la condition de terrain : les cyclistes ont tendance à réduire leur fréquence de pédalage en montée, en adoptant un braquet permettant d'augmenter le niveau de force développé sur la pédale. Des études récentes ont néanmoins montré qu'il était préférable de conserver une fréquence relativement élevée en montagne, ce que confirme l'évolution des fréquences de pédalage adoptés par les meilleurs coureurs (afin de diminuer la fatigue musculaire et d'améliorer la récupération musculaire d'après-course).
4. Influence des caractéristiques des cyclistes : à puissance comparable, des cyclistes entraînés dans leur spécialité ont des fréquences optimales de pédalage nettement supérieures à celles des sportifs non spécialistes, en raison d'une technique de pédalage plus efficace (amélioration de l'indice d'efficacité du pédalage à fréquence de pédalage élevée) et/ou d'une meilleure condition physique consécutives à l'entraînement.
5. Influence de la perception subjective de l'effort : le RPE (Rate of Perception Exertion) de Borg (1970) est un outil composé d'une échelle graduée de 06 à 20 permettant d'évaluer la perception par le sportif de la difficulté de l'exercice. Les fréquences de pédalage ressenties comme les moins pénibles par les cyclistes sont nettement supérieures à celles métaboliquement optimales, les cyclistes préfèrent donc pédaler à des fréquences élevées voisines de 70-80 rpm même s'ils dépensent plus d'énergie.

6. le coût énergétique : le coût énergétique du déplacement (di Prampero, 1986) est obtenu en divisant la consommation d'oxygène (ml d'O₂/Kg/s) par la vitesse de déplacement (m/s) :

$$CE = \text{VO}_2 / \text{vitesse}$$

Le coût énergétique renseigne donc sur l'économie du déplacement et a l'avantage de prendre en compte les contraintes réelles de l'exercice, c'est à dire la vitesse. Les résultats montrent que pédaler à des fréquences proches de 105-110 rpm permet d'optimiser le coût énergétique du déplacement (Belli et Hintzy, 2002) car l'augmentation de VO₂ pour le même niveau de puissance fournie est compensée par un gain de vitesse de déplacement. Ces fréquences correspondent à celles utilisées spontanément par le cycliste sur le plat en compétition. Optimiser le coût énergétique apparaît donc être la contrainte essentielle sur le terrain. Si l'on pédale à une fréquence supérieure à 60 rpm, on augmente effectivement son VO₂ pour un même niveau de puissance fourni, d'où un travail moins rentable. En revanche, pédaler plus vite entraîne en contre partie, un gain de vitesse.

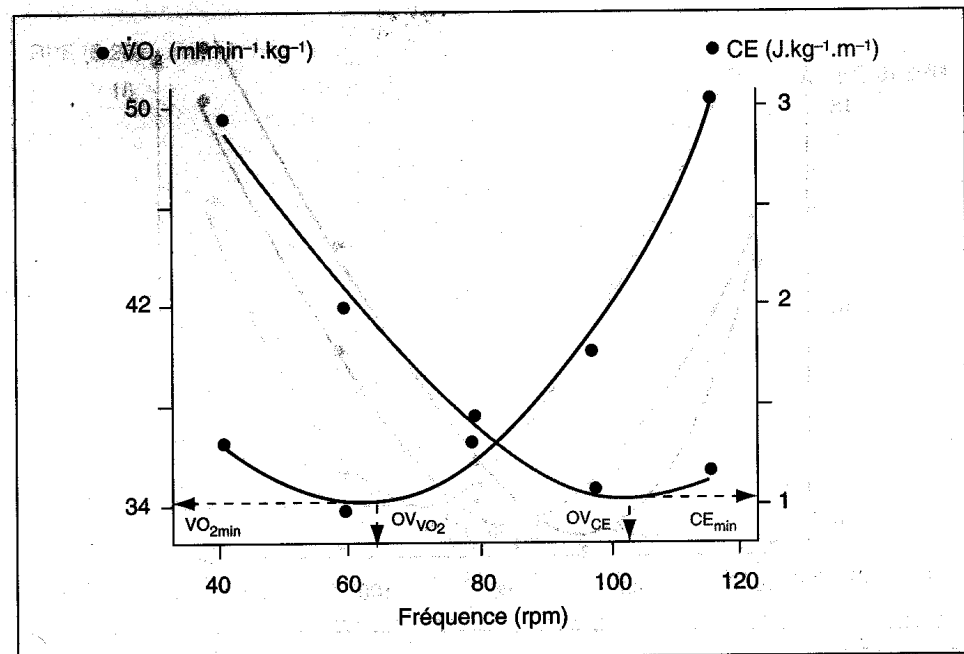


Figure 10.7

Relations paraboliques entre la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$ en ml.min⁻¹.kg⁻¹) et la fréquence de pédalage (en rpm) et entre le coût énergétique du déplacement (CE en J.kg⁻¹.m⁻¹) et la fréquence de pédalage (en rpm) obtenues lors d'un test réalisé sous le seuil anaérobie (Belli et Hintzy, 2002).

Conséquences pour le cycliste

Lors d'un effort réalisé au seuil anaérobie (I_4) et sous le seuil (I_1 à I_3), l'objectif du cycliste est de dépenser le moins d'énergie possible. La source d'énergie principale est de nature aérobie avec utilisation préférentielle des lipides (I_1 et I_2) et du glycogène (I_3 et I_4). Pour une puissance donnée, le cycliste peut avoir une consommation en O₂ faible ou élevée selon le développement qu'il utilise. En effet, la relation entre la $\dot{V}O_2$ et la fréquence de pédalage est en forme de « U ». C'est-à-dire que les cadences très faibles et très élevées induisent de fortes consommations d'O₂. Les cadences les moins coûteuses (fréquence optimale de pédalage) se situent ainsi à un niveau intermédiaire que le cycliste doit trouver. Plus la puissance mécanique augmente et plus la fréquence optimale augmente également. Le cycliste doit augmenter sa cadence de façon à

Evolution des fréquences de pédalage à haut niveau (données à vérifier)

[Bernard Hinault](#) CLM TDF 1980 Damazan La Plume 75 rpm

[Bernard Thévenet](#) CLM 1980 85 rpm

[Luis Herrera](#) TDF 1984 70 rpm

[Marco Pantani](#) record Alpes d'Huez TDF 1997 (36'50) environ 80 rpm

[Christopher Froom](#) Giro 2018 98 rpm col Della Finestre (plus de 110 rpm sur son attaque)

[Julian Alaphilippe](#) CLM TDF 2019 98 rpm

[Geraint Thomas](#) CLM TDF 2019 93 rpm

[Peter Sagan](#) Milan San Remo 2017 102 rpm lors de son attaque dans le Poggio

[Alejandro Valverde](#) Flèche Wallone 2017 77 rpm

[Julien Morice](#) Poursuite individuelle Championnat du Monde 2015 environ 120 rpm

[Chloé Dygert](#) Poursuite individuelle féminine 2018 autour de 120 rpm

[Poursuite par équipes](#) 2019 120 rpm

[Manfred Nuscheler](#) Record puissance pic de puissance sur home trainer 2200 Watt à 150 rpm

Hypothèse concernant le pédalage d'Armstrong (G.Goetghebuer, 2003)

On a montré qu'à cadences élevées, les muscles de l'arrière de la cuisse participent moins au mouvement, pour finir par se comporter comme un point mort si l'on accélère encore le rythme. Cette dépense « négative » peut même représenter jusqu'à 30% du travail « positif » qui permet l'avancée du coureur. A puissance constante, les cadences faibles procureraient donc un meilleur rendement mécanique, ce que traduiraient les valeurs plus basses de consommation d'oxygène.

Par le biais d'un entraînement spécifique, Lance Armstrong (ou Christopher Froom aujourd'hui) serait parvenu à améliorer l'efficacité mécanique de son pattern de pédalage. Il aurait en quelque sorte appris à pédaler vite. Le pédalage implique une chronologie harmonieuse de 32 groupes musculaires. Armstrong aurait patiemment façonné ce coup de pédale si caractéristique pendant des heures et des heures d'un entraînement privilégiant la vélocité sur la force.

II. Exercices réalisés à intensité sur-critique (= et > à PMA, I5-I6)

Ce type d'exercice correspond par exemple en cyclisme à un prologue sur route ou à une poursuite sur piste (efforts inférieurs à 8 min.). Dans ces conditions, c'est la fatigue qui conditionne la réalisation et l'arrêt de l'exercice, puisque la participation de la glycolyse anaérobie permet d'augmenter la puissance de l'exercice, mais avec l'inconvénient de réduire le temps de maintien de l'exercice (acidose musculaire). La contrainte à minimiser pour une même puissance d'exercice n'est plus la consommation d'oxygène, mais la fatigue périphérique, c'est à dire au niveau des muscles qui travaillent (tension musculaire, concentration de lactates, fatigue neuromusculaire).

Dans cette perspective, pour diminuer cette fatigue, l'idéal est d'augmenter la fréquence de pédalage à des niveaux supérieurs à ceux utilisés lors de l'effort sous-critique, c'est à dire à des niveaux supérieurs à 110 rpm. Cela permet de diminuer au maximum les très fortes tensions musculaires, la fatigue de type neuromusculaire, et l'accumulation de lactates.

III. Exercices réalisés à intensité maximale (= accélération, sprint, vitesse sur piste, I7)

Ici, le but n'est plus d'optimiser le rendement métabolique ni de minimiser la fatigue mais bien de développer le maximum de puissance dans un minimum de temps.

Les études montrent que les puissances mécaniques les plus élevées sont souvent obtenues pour des fréquences très élevées, supérieures à 130 rpm.

Notons que plus les cyclistes ont un pourcentage de fibres rapides élevé, et plus leur fréquence de pédalage est élevée à la puissance maximale. A l'inverse, les cyclistes à fort pourcentage de fibres lentes ont de plus faibles cadences de pédalage à la puissance maximale.

IV. Conclusion

« Il n'existe pas une fréquence optimale de pédalage en cyclisme, mais plusieurs fréquences optimales minimisant chacune une contrainte spécifique liée à la situation de terrain » (F.Hintzy & F.Grappe, 2009).

Allure	Intensité d'effort	Cadence optimale (sur le plat)
Allure promenade	I1	60-70
Allure modérée ou soutenue	I2, I3	80
Allure élevée de type CLM	I4	100-110
Allure très élevée sur une durée courte (prologue)	I5	> 110
Allure maximale et très courte (sprint)	I7	> 130

« En résumé, la cadence optimale de pédalage dépend de la puissance développée, de la géographie du terrain, de la typologie musculaire et de la technique de pédalage » (F.Hintzy & F.Grappe, 2009).

On peut faire l'hypothèse qu'à l'entraînement, il y a avantage à contraindre les cyclistes à utiliser une fréquence de pédalage élevée lors des séances à haute intensité.

Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during cycling in triathlon : effect of exercise duration

C. HAUSSWIRTH, J. BRISSWALTER, D. SMITH, F. VERCRUYSEN, J.-M. VALLIER

Int J Sports Med Volume XXI Pages 60-64. 2000

Les différentes observations réalisées chez des cyclistes et des triathlètes révèlent souvent une différence significative entre leurs cadences librement choisies (85-95 rpm) et leurs cadences énergétiquement optimales (65-70 rpm). Différentes hypothèses ont été avancées pour décrire ce conflit apparent : changement des forces appliquées sur les pédales, modification de l'activité musculaire, variation des paramètres ventilatoires.

Cependant, les résultats des différents travaux s'avèrent à la fois peu nombreux, peu explicatifs et contradictoires, soulignant ainsi la difficulté à identifier des facteurs appropriés qui influencent la relation coût énergétique-cadence. En effet, lorsque l'on s'intéresse à l'exercice de durée prolongée, certains auteurs ont pu montrer que pour une durée de 20 minutes à 85 % de puissance maximale aérobie (Pmax), aucune différence significative, entre les fréquences librement choisie et optimale, n'a été trouvée (observations sur 5 cyclistes). Par contre, chez une population de triathlètes de haut-niveau, pédalant pendant 30 minutes à puissance dite critique sur ergocycle (soit, 80 % de Pmax, que le sujet est capable de maintenir 30 minutes), nous avons très récemment montré que ces derniers adoptaient spontanément une plus grande fréquence librement choisie, comparée à la cadence " énergétiquement optimale ".

Pour expliquer cette différence, nous avons formulé l'hypothèse que les triathlètes pourraient développer à l'entraînement des habiletés motrices spécifiques, en relation avec les 3 disciplines à effectuer. En outre, cette différence pourrait également résulter du volume hebdomadaire d'entraînement des cyclistes, beaucoup plus important que celui des triathlètes (500 km vs 250 km, pour des athlètes de catégorie nationale).

Dans le cadre de cette problématique, mais pour des durées d'épreuves plus importantes (2 heures), nous nous sommes intéressés à l'évolution de la cadence de pédalage librement choisie (FLC), lors d'un exercice conduit sur ergocycle pendant 2 heures, alors que la puissance de l'exercice était toujours identique, fixée à la puissance critique : nous avons montré dans cette étude que la FLC diminuait avec la durée de l'épreuve. Les triathlètes adoptaient une cadence de 87 rpm en début de test et seulement 69 rpm à la fin des deux heures. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer ce phénomène, plus particulièrement celles d'une fatigue périphérique et/ou d'un recrutement des fibres à dominante rapide, en relation à une augmentation significative du coût énergétique en phase terminale d'exercice prolongé.

En conclusion de ces études menées sur des triathlètes de haut-niveau, il apparaît que la cadence librement choisie se décale vers la cadence " énergétiquement optimale " (i.e. celle qui " coûte " le moins en énergie) avec la durée d'exercice. Ceci semble être vérifié pour des épreuves de 30 minutes, une heure et 2 heures d'ergocycle, chacune menée à sa puissance critique propre. Ces résultats montrent l'opportunité pour l'entraîneur de proposer une cadence de pédalage en phase initiale de l'épreuve cycliste plus basse que celle que le triathlète adopterait spontanément (FLC), et ce, dans le but d'une réduction de la dépense énergétique.

Dans cette perspective, des tests de routine d'évaluation de la cadence " énergétiquement optimale " devraient être envisagés pour cette population. Ceci autoriserait une individualisation des propositions de réduction de cadence de pédalage, par rapport à la FLC, pour se rapprocher au mieux de celle repérée la plus économique pour chacun des triathlètes, leur permettant ainsi d'économiser leur capital d'énergie pour être plus performants lors de la course à pied qu'ils doivent réaliser en enchaînement de l'épreuve cycliste.

Résumé : En triathlon comme dans la plupart des activités longue durée, l'un des principaux déterminants de la performance est la capacité du sujet à dépenser le moins d'énergie possible pour une quantité d'énergie produite équivalente. Cette capacité peut être identifiée à partir du calcul du coût énergétique (CE) de la locomotion humaine. De plus, la modification de la fréquence gestuelle est considérée comme le principal moyen d'optimiser le CE des trois modes de locomotion propres au Triathlon. Dans ce cadre, la détermination d'optimas en cyclisme peut être envisagée en fonction de la manipulation de la cadence de pédalage. Au cours du triathlon, la relation entre la cadence et le CE semble être liée d'une part au niveau de l'expertise dans la tâche de cyclisme et d'autre part, à la durée globale de l'exercice réalisé.

Ainsi, nous avons étudié au travers de deux études (laboratoire + terrain) les critères de choix de la cadence de pédalage chez des triathlètes (niveau régional et/ou national) au cours d'une épreuve de longue durée en cyclisme (> 1 h, 75% de Fréquence cardiaque maximale) à partir de l'évaluation de la dépense énergétique et de la cinétique de la lactatémie.

Les résultats principaux indiquent clairement l'absence d'une relation quadratique entre la cadence de pédalage et le CE en début d'exercice et ne permettent pas de conclure à un effet de la durée d'exercice sur le déplacement de l'optimum énergétique. Cependant, les résultats ne montrent pas d'effet de la durée sur l'optimum neuromusculaire (cadence/EMGi) au cours de l'exercice. Cela indique que le vastus latéralis (muscle vaste externe) n'est peut-être pas révélateur de la fatigue périphérique chez ces triathlètes en cyclisme. Enfin, au début de l'exercice la fréquence de pédalage librement choisie (FLC) se rapproche de l'optimum neuromusculaire alors qu'en fin d'exercice, la FLC se décale vers l'optimum énergétique. Dans ce cadre, la stratégie utilisée par ces triathlètes en début d'exercice est orientée vers une minimisation de la fatigue neuromusculaire alors qu'en fin d'épreuve, la stratégie serait davantage associée à un principe de minimisation de la dépense