

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE (3407)

PAR  
HATEM ZIADIA

LA SPECTROSCOPIE DANS LE PROCHE INFRAROUGE (NIRS) APPLIQUÉE  
AU TEST «3-MIN ALL-OUT» ET SES CONCOMITANTS PHYSIOLOGIQUES  
DANS L'ÉVALUATION DE VÉTÉTISTES ELITES.

Avril 2015

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

# UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

## MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

### Ce mémoire a été dirigé par :

Claude LAJOIE, Ph.D.	UQTR
directeur de recherche, grade	Rattachement institutionnel

Vincent CANTIN, Ph.D.	UQTR
codirecteur de recherche, grade	Rattachement institutionnel

### Jury d'évaluation du mémoire :

Claude LAJOIE, Ph.D.	UQTR
Prénom et nom, grade	Rattachement institutionnel

François TRUDEAU, Ph.D.	UQTR
Prénom et nom, grade	Rattachement institutionnel

Olivier SERRESSE, professeur agrégé	Université Laurentienne
Prénom et nom, grade	Rattachement institutionnel

## RÉSUMÉ

**Contexte:** La pratique du vélo de montagne (VTT) compétitif requiert des efforts physiques qui varient en puissance (Watts) et sollicitent plusieurs systèmes énergétiques. Le test de puissance critique de 3 minutes (PC3) de Burnley et coll. (2006) permet d'évaluer le pic du volume d'oxygène consommé ( $\dot{V}O_{2pic}$ ) et la puissance critique (PC), deux paramètres qui caractérisent le système énergétique aérobie. De plus, il permet d'apprécier la puissance pic ( $P_{pic}$ ) et la capacité anaérobie ( $W'$ ), deux paramètres qui caractérisent la puissance et la capacité du système anaérobie. Comparativement aux tests traditionnels de PAM, le test de PC3 permettrait de mieux apprécier diverses capacités physiques des vététistes élités.

**Objectifs:** Caractériser les réponses cardiorespiratoires, la puissance de travail déployée, l'extraction et le transport d'oxygène dans le muscle vaste latéral durant un test de PC3 et un test de PAM chez des vététistes élités. **Méthodes:** Six vététistes élités et deux cyclistes de route hommes (moyenne  $\pm$  écart-type) : âge  $21,25 \pm 2,55$  ans; taille  $178,6 \pm 7,03$  cm; poids  $68,04 \pm 5,03$  kg; pourcentage de graisse corporelle  $7,19 \pm 3,23$  et  $\dot{V}O_{2max}$   $72,01 \pm 3,68$  ml·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup> ont réalisé un test progressif de PAM et un test de PC3 lors d'une seule présence au laboratoire. Le test PAM a pour objectif de déterminer la consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_{2max}$ ) et la puissance aérobie maximale (PAM) en watts. Le protocole de ce test est progressif avec charge croissante (30 Watts) chaque 5 minutes. Les périodes de charge sont entrecoupées par des périodes de récupération d'une durée de 3 minutes à faible charge (1 watt/kg de poids corporel) jusqu'à épuisement. Le test PC3 vise à déterminer le pic de la consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_{2pic}$ ), la puissance critique (PC), le pic de la puissance ( $P_{pic}$ ) et la capacité anaérobie ( $W'$ ). Au cours du test PC3, les cyclistes devaient pédaler avec le maximum de puissance et à la plus grande cadence pour obtenir le plus haut taux de travail possible pendant tout l'essai. La puissance de pédalage, le  $\dot{V}O_2$  et la lactatémie ont été mesurés. La désoxyhémoglobine (HHb) et l'hémoglobine totale (THb) étaient évalués par spectroscopie dans le proche infrarouge «SPIR». **Résultats:** Malgré les

puissances supra maximales déployées durant le test PC3, aucun des paramètres mesurés par SPIR lors du test PC3 n'a pu atteindre des niveaux supérieurs à ce qui était enregistré lors du test PAM. Cependant, on a pu observer une variation opposée entre le THb et la puissance de pédalage lors du test PC3 c'est-à-dire une augmentation de la puissance de pédalage accompagnée par une diminution du THb et inversement ( $r = -0,99$  ;  $p < 0,001$ ). Durant le test PC3, les participants ont atteint 95% de leurs  $\dot{V}O_{2pic}$  à  $54,33 \pm 8,16$  secondes du début du test. Le  $\dot{V}O_{2pic}$  a été atteint à  $147,5 \pm 36,55$  secondes et était équivalent à 96,57% du  $\dot{V}O_{2pic}$  enregistré lors du test PAM, représentant une différence de 3,43%. Le  $\dot{V}O_{2pic}$  obtenu lors du test PC3 ( $69,54 \pm 5,46 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) et celui obtenu lors du test PAM ( $72,01 \pm 3,68 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) étaient comparables ( $p \approx 0,20$ ). La  $P_{pic}$  enregistrée lors du test PC3 était égale à  $846,3 \pm 175,4 \text{ W}$  soit 228,49% de la PAM. La PC était égale à  $351,1 \pm 59,62 \text{ W}$  soit 93,63% de la PAM ( $375 \pm 44,16 \text{ W}$ ). On n'a pas observé de différence significative entre la PC et la PAM ( $p = 0,08$ ). La capacité anaérobie ( $W'$ ) évaluée lors du test PC3 était égale à  $18,307 \pm 3,71 \text{ KJ}$ . Une forte corrélation entre la PAM/poids corporel lors du test PAM et la  $W'$ /poids corporel lors du test PC3 était enregistré ( $r = 0,886$  ;  $p < 0,05$ ).

**Conclusion:** Malgré les puissances supra-maximales déployées lors du test PC3, le muscle vaste latéral n'a pas pu extraire plus d'oxygène ni mobiliser un plus grand débit sanguin local par rapport à un test de PAM classique. Lors du test PC3, on a pu enregistrer une variation inversée entre la puissance de pédalage déployée et la diffusion du sang à l'intérieur du muscle squelettique. Chez des vététistes élités, les valeurs des paramètres cardiorespiratoires et musculaires atteintes lors du test PC3 étaient semblables à celles enregistrées lors d'un test de PAM. Plus expéditif que les tests traditionnels, le test PC3 a permis non seulement d'estimer la PAM, mais aussi de quantifier le travail anaérobie afin de mieux cerner les forces et faiblesses des athlètes. De plus, le test PC3 s'est avéré un moyen fiable pour la prédiction de la performance.

## **REMERCIEMENTS**

### **A mes directeurs de mémoire : Dr. CLAUDE LAJOIE ET Dr. VINCENT CANTIN**

Je vous remercie vivement pour votre aide dans la réalisation de ce travail et je suis vraiment très honoré d'avoir collaboré avec vous. J'apprécie beaucoup votre modestie, votre disponibilité et vos grandes qualités scientifiques et humaines. Puisse ce travail vous satisfaire et vous refléter ma haute considération.

### **A Dr. LOUIS LAURENCELLE**

Je suis sensiblement touché par l'honneur que vous me faites en vous intéressant à ce sujet de mémoire. J'ai pour vous, l'estime et le respect qu'imposent votre compétence, votre sérieux et votre richesse humaine. Veuillez trouver ici, l'assurance de ma profonde reconnaissance.

### **A MES PROFESSEURS MEMBRES DU JURY**

Messieurs, vous nous faites le grand honneur de siéger dans le jury de mon travail. J'ai eu le privilège de bénéficier de votre enseignement clair et riche au cours de notre formation. Veuillez trouver ici, la preuve de notre grande admiration et de notre reconnaissance infinie.

### **A TOUTE MA FAMILLE**

Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'aide et la patience de mon adorable épouse EMNA qui m'a énormément aidé pendant ces années. J'adresse une pensée particulière à l'âme de mon père et à ma mère qui m'auront permis de poursuivre mes études jusqu'à aujourd'hui. Ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée pour mon petit fils SKANDER qui a constitué ma source de motivation et d'espoir.

À tous mes ami(e)s

# TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ .....	i
REMERCIEMENT .....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS .....	viii
<b>CHAPITRES</b>	
1. INTRODUCTION.....	1
2. CADRE THÉORIQUE .....	4
2.1. Le vélo de montagne (VTT) de compétition de type cross-country .....	4
2.2 Exigences physiques en VTT .....	5
2.3. Exigences physiologiques en VTT .....	6
2.4. La consommation maximale d'oxygène et choix des protocoles d'évaluation .....	8
2.5. Épreuve de puissance critique en 3 minutes ou test « 3-min all-out » .....	9
2.6 La spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) .....	11
2.7. L'oxygénation du muscle vaste latéral à l'effort.....	13
2.8. Réponse du réseau capillaire à l'entraînement et son effet sur l'oxygénation du muscle vaste latéral .....	15
3. PROBLÉMATIQUE .....	18
4. QUESTIONS DE RECHERCHE.....	20
5. HYPOTHÈSE DE RECHERCHE.....	21

6. ARTICLE: The near infrared spectroscopy (NIRS) applied to a 3-min all-out test and its physiological concomitants in elite cyclists' evaluation ..... 22

6.1. Abstract ..... 23

6.2. Introduction..... 26

6.3. Materials and methods ..... 28

6.3.1. Participants ..... 28

6.3.2. Experimental protocol..... 28

6.3.3. Equipments ..... 29

6.3.4. Test 1: Maximal aerobic power test (MAP and  $\dot{V}O_{2max}$ )..... 30

6.3.5. Test 2: 3-min all-out test..... 31

6.4. Statistical analysis ..... 31

6.5. Results ..... 32

6.5.1. MAP test results ..... 32

6.5.2. 3-min all-out test results ..... 35

6.5.3. Peak MAP test measures vs. peak 3-min all-out test measures ..... 39

6.5.4 NIRS response at  $\dot{V}O_{2peak}$  ..... 41

6.6. Discussion ..... 42

6.7. Conclusion..... 46

6.8 Competing interests..... 47

6.9. Authors' contribution ..... 47

6.10. References ..... 48

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ..... 51

RÉFÉRENCES GÉNÉRALES ..... 52

ANNEXES..... 57



## LISTE DES FIGURES

Figures	Page
<hr/>	
2.1. (A) la puissance de travail et (B) la consommation d'oxygène au cours d'un test PC3 chez un sujet représentatif.....	10
2.2. Spectre lumineux proche infrarouge.....	12
2.3. Émission et réception du signal proche infrarouge à travers le muscle.....	13
2.4. Évolution de l'HbO <sub>2</sub> /Hbtot en fonction de la puissance (% $\dot{V}O_{2max}$ ).....	15
2.5. Réponses du réseau capillaire à l'entraînement.....	16
2.6. Relations linéaires existant entre la densité volumique mitochondriale et la densité volumique des capillaires.....	17
6.1. Changes in skeletal muscle oxyhemoglobin ( $\Delta HbO_2$ ), skeletal muscle deoxyhemoglobin ( $\Delta HHb$ ), skeletal muscle total hemoglobin ( $\Delta THb$ ) and skeletal muscle tissue saturation index ( $\Delta TSI\%$ ) vs % peak oxygen uptake (% $\dot{V}O_{2peak}$ ) at MAP test (average results).....	33
6.2. Individual changes in oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ), lactatemia [BLa], skeletal muscle oxyhemoglobin ( $\Delta HbO_2$ ), skeletal muscle deoxyhemoglobin ( $\Delta HHb$ ), skeletal muscle total hemoglobin ( $\Delta THb$ ) and skeletal muscle tissue saturation index ( $\Delta TSI\%$ ) at MAP test.....	34
6.3. Changes in A. Power output (Power), B. oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ), C. pulmonary ventilation ( $\dot{V}_e$ ), D.: heart rate (HR) during the 3-min all-out test (average results).....	37
6.4. Changes in A. power output (Power), B. skeletal muscle oxyhemoglobin ( $\Delta HbO_2$ ), C. skeletal muscle deoxyhemoglobin ( $\Delta HHb$ ), D. skeletal muscle total hemoglobin ( $\Delta THb$ ) and E. skeletal muscle tissue saturation index ( $\Delta TSI\%$ ) during the 3-min all-out test (average results).....	38
6.5. Mean power output vs groupe mean $\Delta THb$ during 3-min all-out test. Power, Power output and $\Delta THb$ , skeletal muscle total hemoglobin.....	40

## LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Page
2.1. Consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_{2max}$ ) et caractéristiques anthropométriques des vététistes rapportées dans la littérature.....	7
2.2. Réponses des vététistes et cyclistes sur route à l'exercice maximal .....	8
2.3. Mesure des paramètres d'évaluation physiologiques à la fin des tests PAM et PC3.....	11
6.1. Correlation between NIRS parameters with $\dot{V}O_2$ and pedaling power in % $\dot{V}O_{2peak}$ ....	32
6.2. Correlation between NIRS parameters with $\dot{V}O_2$ , HR and pedaling power at 3-min all-out test.....	36
6.3. Peak physiological responses during the MAP test and 3-min all-out tests.....	40
6.4. The individual results of MAP during MAP test and the anaerobic capacity during the test 3-min all-out test .....	41
6.5. NIRS parameters at $\dot{V}O_{2peak}$ in MAP test and 3-min all-out tests .....	41

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

- %SaO<sub>2</sub>** : Pourcentage de la saturation artérielle en oxygène.
- ATP** : Adénosine triphosphate.
- Bpm** : Battements cardiaques par minute.
- DC** : Débit cardiaque (volume de sang éjecté en litres par minute).
- FC** : Fréquence cardiaque.
- FC<sub>max</sub>** : Fréquence cardiaque maximale.
- FC<sub>moy</sub>** : Fréquence Cardiaque moyenne.
- Hb** : Hémoglobine.
- HHb** : Déoxy-hémoglobine.
- Mb** : Myoglobine.
- mL.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>** : millilitres par kilogramme de masse corporelle par minute.
- mM** : Millimoles par litre.
- NIRS** : Near InfraRed Spectroscopy.
- O<sub>2</sub>** : Oxygène.
- HbO<sub>2</sub>** : Oxy-hémoglobine.
- PAM** : Puissance aérobie maximale.
- PCr** : PhosphoCréatine.
- PC3** : Puissance Critique en 3 minutes.
- PC** : Puissance Critique.
- P<sub>méca</sub>** : Puissance mécanique exprimée en watts.
- QR** : Quotient d'échange respiratoire.
- Rpm** : Révolutions par minute.
- RPM<sub>moy</sub>** : Révolutions par minute moyenne.
- SPIR** : La spectroscopie dans le proche infrarouge.

**SL** : Seuil Lactique.

**SV** : Seuil Ventilatoire.

**THb** : Hémoglobine Totale.

**TSI%** : Saturation du muscle en oxygène.

**UCI** : Union Cycliste Internationale.

**$\dot{V}O_2$**  : Consommation d'oxygène.

**$\dot{V}_e$**  : Ventilation pulmonaire.

**$\dot{V}O_{2max}$**  : Consommation maximale d'oxygène.

**$\dot{V}O_{2pic}$**  : Consommation d'oxygène pic.

**VTT** : Vélo tout terrain.

**$W'$**  : Capacité anaérobie.

# 1. INTRODUCTION

L'entraînement physique visant l'amélioration de la performance sportive en endurance est un défi complexe qui nécessite l'analyse des facteurs physiologiques limitatifs de l'athlète. Cela revient à prendre en considération un ensemble de facteurs qui agissent en interaction, à savoir, l'analyse de la discipline sportive en termes d'exigence physique, le degré d'implication des filières énergétiques, la connaissance des adaptations physiologiques consécutives à l'entraînement et enfin, la gestion de la fatigue et du surentraînement. Afin de réaliser des gains en performance, il est utile d'évaluer les athlètes pour mieux préciser les charges d'entraînement. Aujourd'hui, avec la venue des capteurs de puissance installés sur le vélo personnel des athlètes, il est d'usage d'évaluer la capacité des athlètes à soutenir des charges de travail représentant tous les systèmes énergétiques. En effet, à la lumière des résultats de courses de vélo de montagne effectuées sur les terrains de compétition, nous savons aujourd'hui que les charges de travail sont très variables, allant de niveaux sous-maximaux à supra-maximaux (Dufresne 2012).

Généralement, dans un processus d'évaluation de la condition physique, il est indispensable de passer par deux tests qui mesurent de façon spécifique et indépendante les composantes des systèmes énergétiques aérobie et anaérobie. D'habitude, l'évaluation de la composante aérobie passe par l'évaluation de la consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_{2max}$ ) qui se définit comme la quantité maximale d'oxygène qui peut être utilisée par le corps par unité de temps (Impellizzeri et coll. 2007; Wilmore et Costill, 2002). Les puissances de travail associées au  $\dot{V}O_{2max}$  et au seuil lactique sont considérées comme étant de bons prédicteurs de la performance aérobie chez l'humain (Bentley et coll. 1998, Coyle et coll. 1991, Coyle et coll. 1988, Faria et coll. 2005 a-b, Gregory et coll. 2007). D'autre part, l'évaluation de la filière énergétique anaérobie passe par l'évaluation de la puissance et la

capacité du métabolisme anaérobie. La puissance anaérobie présente le taux maximal d'énergie pouvant être développé d'une manière anaérobie dans un laps de temps donné (Wilmore et Costill 2002). La capacité anaérobie se définit comme la quantité maximale d'énergie développée d'une manière anaérobie jusqu'à l'épuisement des substrats indépendamment de la durée de l'exercice (Noordhof et coll. 2013). Le système énergétique anaérobie est sollicité lors d'actions motrices très intenses sur des périodes de temps assez courtes de moins de 2 minutes.

L'évaluation physique des athlètes élités de haut niveau est une tâche difficile vu que ces derniers ne peuvent pas être disponibles pour se présenter plusieurs fois au laboratoire. En vélo tout-terrain (VTT) par exemple, une discipline qui sollicite plusieurs systèmes énergétiques, les vététistes élités proviennent souvent de régions éloignées en plus qu'ils sont couramment à l'extérieur du pays. Sinon leur plan d'entraînement très chargé ne le permet tout simplement pas. De ce fait vient l'intérêt d'utiliser un test qui puisse mesurer à la fois les deux composantes des systèmes énergétiques aérobie et anaérobie. Le test de puissance critique de 3 minutes (PC3) de Burnley et coll. (2006) a été utilisé pour l'évaluation de ces deux composantes énergétiques. Plus précisément, le test PC3 permet d'apprécier le  $\dot{V}O_{2pic}$  qui présente la mesure la plus élevée du  $\dot{V}O_2$  obtenue lors d'un test maximal (Rowell 1974) et la puissance critique (PC) qui se définit comme la puissance à laquelle le système aérobie satisfait totalement à la demande énergétique en travaillant à son maximum (Moritani et coll. 1981). Lors du test PC3, la PC est équivalente à la puissance moyenne des 30 dernières secondes de l'épreuve (Burnley et coll. 2006, Johnson et coll. 2011, Vanhatalo et coll. 2007). D'autre part, le test PC3 permet d'évaluer la puissance pic ( $P_{pic}$ ) qui représente la puissance la plus élevée enregistrée lors de ce test. De plus, le test PC3 permet d'estimer le travail exécuté de façon anaérobie ( $W'$ ) qui traduit la capacité anaérobie. La procédure du test de PC3 consiste à développer le plus de puissance possible pendant 3 minutes. Depuis quelque temps, beaucoup de chercheurs portent intérêt à ce test (Dupouy et coll. 2007;

Grassi et coll. 1999; Kawaguchi et coll. 2001). Le test PC3 permet de minimiser le nombre de visites des athlètes au laboratoire tout en produisant une évaluation précise des composantes aérobie et anaérobie.

## 2. CADRE THÉORIQUE

### 2.1. Le vélo de montagne (VTT) de compétition de type cross-country

De 1980 à nos jours, un réseau de courses international a été mis en place par l'Union Cycliste Internationale (UCI). Les premières compétitions de vélo tout terrain (VTT) cross-country (XC) se sont déroulées au début des années 80 (Joyner et Coyle 2008; Laursen et coll. 2002; Padilla et coll. 1999; Stepto et coll. 1999). En 1996, le VTT a été introduit aux Jeux olympiques d'été à Atlanta et les courses de VTT se caractérisaient par un nombre défini de tours, variant de 4 à 6, pour une distance de 5 et 9 kilomètres par tour pour une durée totale comprise entre 1h30 et 2h15 d'effort continu. Aujourd'hui, les parcours ont changé, les tours sont plus courts et la durée totale varie entre 1h30 et 1h45.

En termes de durée, les exigences physiques se comparent à certaines autres disciplines telles que le marathon, le triathlon de distance olympique et certaines épreuves contre-la-montre de cyclisme sur route où un effort continu est nécessaire. Par contre, les courses de VTT nécessitent des efforts physiques qui sont beaucoup plus variables à cause des exigences imposées par le relief du parcours. Chaque compétition commence par un départ collectif où les athlètes rassemblés doivent réaliser un démarrage explosif, qui nécessite beaucoup de puissance, afin de se démarquer dès le début de la course, pour éviter les engorgements lors des passages techniques. Habituellement, un parcours de course de VTT comportant des routes et chemins forestiers, des champs, des chemins de terre ou de gravier qui présentent un nombre important de montées et descentes. Bien que les données physiologiques pour les cyclistes de route de niveau international soient abondamment rapportées, on trouve relativement peu de données physiologiques pour le VTT malgré son inclusion aux Jeux olympiques de 1996 (Dufresne 2012, Impellizzeri et coll. 2007, 2005).



## 2.2. Exigences physiques en VTT

En 2009, lors du championnat canadien de vélo de montagne tenu à St-Félicien (Qc), une analyse du parcours de compétition a été faite par notre laboratoire à l'aide d'un capteur de puissance Powertap SL+ (Saris Cycling Group, Madison, WI, USA) installé sur la roue arrière d'un vélo de montagne. Cet appareillage a permis d'estimer la distribution de la puissance de travail tout au long de la compétition chez un vététiste élite. Le parcours était d'une longueur de 6,63 km et les athlètes avaient à compléter 5 tours pour une distance totale de 33,15 km. Le temps de parcours de l'athlète cible était d'environ 2 heures et sa puissance moyenne, lors de cette épreuve était de 279 Watts correspondant à 75% de sa puissance aérobie maximale (PAM = 370 Watts). L'analyse des résultats de la compétition a aussi révélé que 35% (42 min) du temps total de la course, étaient réalisés entre 100% et 121% de la PAM sous forme de 120 sections d'effort variant de 5 à 53 secondes (résultats non publiés).

Le départ en cross-country est collectif, les vététistes doivent réaliser un démarrage explosif qui nécessite beaucoup de puissance dans le but de se démarquer et de prendre une position favorable en tête de peloton. D'après l'analyse du parcours de St-Félicien, notre participant a atteint lors de son départ une puissance égale à 1038 Watts soit 2,8 fois sa PAM. D'autre part, pour préserver une position favorable devant le peloton, en plus des grandes qualités techniques, un vététiste se doit de maintenir une grande puissance de travail le plus longtemps possible, afin de se positionner avantageusement, ce qui pourrait permettre à certains athlètes de se distinguer par rapport à d'autres qui ont une PAM similaire. Il faut dire que, lors de ces deux phases de la course (départ et parcours), le métabolisme physiologique en lien avec la puissance de travail n'est pas le même. En effet, dans ces deux types d'effort, la puissance ne nécessite pas la mise en jeu des mêmes mécanismes physiologiques. Lors du départ, l'athlète doit générer de la puissance musculaire anaérobie alors que, durant la course, sont sollicités les systèmes énergétiques

mixtes qui majoritairement impliquent le métabolisme aérobie. Autrement dit, sur une même durée d'effort donnée, le plus puissant est celui qui roule le plus vite et à l'inverse, le plus endurant est celui qui est capable de maintenir cette puissance le plus longtemps possible.

Pour résumer, la course de vélo de montagne est une discipline qui demande beaucoup de technique mais aussi un effort continu plus ou moins régulier, au-delà du départ qui est très rapide et exigeant. Il est fréquent de devoir faire de gros efforts entrecoupés d'efforts plus légers, comme lors des descentes.

### **2.3. Exigences physiologiques en VTT**

Lors de l'analyse du parcours de St-Félicien, on a pu observer que la compétition de vélo de montagne requiert des efforts plus ou moins brefs à des puissances de travail au-delà de la PAM à cause des exigences du parcours. Lors de ces efforts, le vététiste doit être en mesure de fournir de la puissance mécanique ( $P_{méca}$ ) en s'efforçant de maintenir le renouvellement de l'adénosine triphosphate (ATP) à partir des différents systèmes énergétiques. L'évaluation de la quantité d'énergie consommée par l'organisme est possible à travers la mesure du  $\dot{V}O_2$  et du travail produit. Pour ce faire, il faut considérer que le métabolisme aérobie en début d'effort évolue selon différentes cinétiques. En effet, le  $\dot{V}O_2$  augmente de façon régulière avec l'augmentation de la puissance de travail jusqu'à l'atteinte d'une capacité maximale de production d'ATP par les voies métaboliques aérobies équivalentes à un volume maximal d'oxygène dit  $\dot{V}O_{2max}$ . Au-delà et pour des puissances supra maximales, c'est-à-dire supérieures à la PAM, la  $P_{méca}$  développée excédera la puissance métabolique maximale du système énergétique aérobie. La production d'ATP lors de cette phase dépend des sources d'ATP dites anaérobies fournies par le système ATP-Phospho-Créatine (PCr) et principalement par la glycolyse anaérobie. La puissance énergétique pour le renouvellement de l'ATP lors de cette phase est très élevée, alors que sa capacité énergétique est très limitée et l'exercice ne peut être soutenu que durant

quelques secondes, voire 1 à 2 minutes. Afin de quantifier la quantité d'énergie au début d'une épreuve supra-maximale, il faut mesurer l'évolution de la consommation d'oxygène afin de la différencier.

De ce fait, l'évaluation du  $\dot{V}O_{2max}$  est couramment utilisée afin d'évaluer l'aptitude physique des athlètes grâce à la détermination des paramètres maximaux ( $\dot{V}O_{2max}$  et PAM) et sous-maximaux (seuil ventilatoire (SV) et le seuil lactique (SL)). Ceci peut apporter des indications sur l'efficacité de l'organisme à produire de l'énergie. Pour les athlètes élités spécialistes en VTT, des études ont caractérisé leur profil, et les valeurs de  $\dot{V}O_{2max}$  présentées dans la littérature varient entre 66,5 et 78,3 ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> (tableau 2.1).

**Tableau 2.1.** Consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_{2max}$ ) et caractéristiques anthropométriques des vététistes rapportées dans la littérature (Impellizzeri et Marcora 2007).

Study (year)	Competitive level	n	Height (cm)	Mass (kg)	$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)
Impellizzeri et al. (2006) <sup>[20]</sup>	Elite, high level	12	176 ± 7	66 ± 6	76.9 ± 5.3
Lee et al. (2002) <sup>[15]</sup>	High level	7	178 ± 7	65 ± 7	75.3 ± 4.4
Impellizzeri et al. (2005) <sup>[20]</sup>	Elite	13	177 ± 8	65 ± 6	72.1 ± 7.4
Nishi et al. (2004) <sup>[21]</sup>	Elite	6	170 ± 6	64 ± 7	67.8 ± 5.8
Slapefeldt et al. (2004) <sup>[1]</sup>	Elite	9	180 ± 6	69 ± 5	66.5 ± 2.6
Warner et al. (2002) <sup>[22]</sup>	Elite	16	178 ± 6	71 ± 5	67.4 ± 4.6
Impellizzeri et al. (2002) <sup>[20]</sup>	Elite	5	175 ± 3	64 ± 5	75.9 ± 5.0
Baton (2001) <sup>[23]</sup>	Elite	25	179 ± 5	69 ± 7	68.4 ± 3.8
Wilber et al. (1997) <sup>[24]</sup>	Elite	10	176 ± 7	72 ± 6	70.0 ± 3.7
Cramp et al. (2004) <sup>[25]</sup>	Amateur	6	179 ± 6	69 ± 8	60.0 ± 3.7
MacRae et al. (2000) <sup>[26]</sup>	Amateur	6	150 ± 7	77 ± 4	58.4 ± 2.3
Berry et al. (2000) <sup>[27]</sup>	Amateur	8 (1 female)	178 ± 7	72 ± 8	56.6 ± 5.2

Des études comparatives entre les caractéristiques physiologiques des vététistes élités et des cyclistes de route de haut niveau ont révélé une grande similitude. En effet, le  $\dot{V}O_{2max}$  moyen chez des cyclistes de route, spécialistes de la montagne, était de 80,9 ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> alors qu'il était de 78,9 ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup> pour des cyclistes qui ont des habiletés sur les terrains variés (Padilla et coll. 1999). Le tableau 2.2 présente une comparaison détaillée des variables de puissance mécanique et physiologiques entre des vététistes et des cyclistes de route en réponse à un exercice maximal (Lee et coll. 2002).

**Tableau 2.2.** Réponses des vététistes et cyclistes de route à l'exercice maximal (Lee et coll. 2002).

	Mountain bikers		Road cyclists		% Absolute difference	<i>d</i>
$W_{max}$ (W)	413 ± 36	(355–455)	431 ± 12	(410–450)	4	0.66
$W_{max}$ ( $W \cdot kg^{-1}$ )	6.3 ± 0.5	(6.0–7.3)	5.8 ± 0.3	(5.4–6.3)	9*	1.15
$\dot{V}O_{2peak}$ ( $l \cdot min^{-1}$ )	5.1 ± 0.5	(4.3–5.6)	5.4 ± 0.1	(5.2–5.6)	7	0.92
$\dot{V}O_{2peak}$ ( $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ )	78.3 ± 4.4	(74.5–87.0)	73.0 ± 3.4	(69.6–78.4)	7*	1.14
$\dot{V}_E$ ( $l \cdot min^{-1}$ )	139 ± 24.0	(106–179)	149 ± 12.9	(129–160)	7	0.52
Economy ( $W \cdot l^{-1}$ )	91 ± 6	(80–97)	86 ± 4	(82–92)	6	0.94
Heart rate ( $beats \cdot min^{-1}$ )	189 ± 5	(181–194)	191 ± 9	(171–198)	1	0.16
Lactate ( $mmol \cdot l^{-1}$ )	10.1 ± 2.6	(7.6–14.5)	10.6 ± 1.4	(8.5–12.6)	5	0.22
pH	7.21 ± 0.03	(7.27–7.15)	7.25 ± 0.04	(7.29–7.19)	1	0.82

Note:  $W_{max}$  = maximal power output,  $\dot{V}O_{2peak}$  = peak oxygen uptake,  $\dot{V}_E$  = peak ventilation, *d* = effect size.

\* Significant difference between mountain bikers and road cyclists ( $P < 0.05$ ).

## 2.4. La consommation maximale d'oxygène et le choix des protocoles d'évaluation

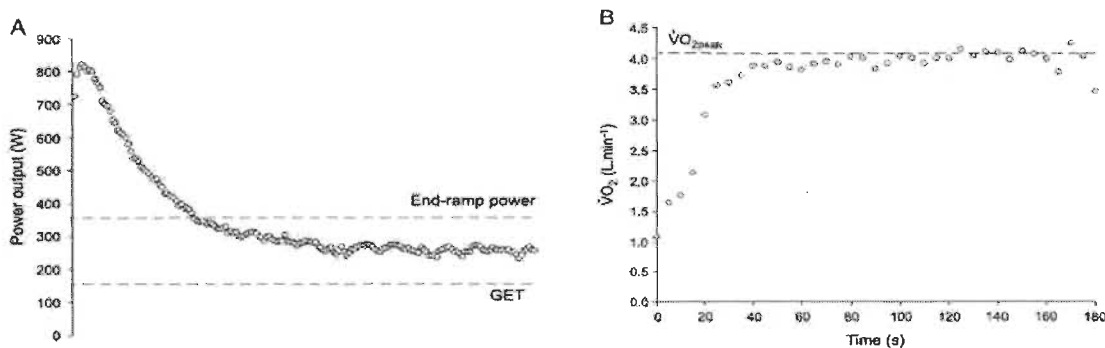
La notion de consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_{2max}$ ) a été définie pour la première fois par Hill et Lupton (1923) dans les années 1920 comme le plus haut débit auquel l'oxygène peut être prélevé et utilisé par l'organisme lors d'un exercice d'intensité sévère. L'évaluation consiste à amener le participant au maximum de son  $\dot{V}O_2$  suivant un protocole continu (sans récupération) ou discontinu (avec récupération), maximal, à charge croissante allant de 10 à 50 Watts par palier et avec des paliers d'une durée qui varie entre 1 et 5 minutes. Le choix du protocole varie suivant les spécificités de chaque discipline et les informations nécessaires pour élaborer un suivi de l'entraînement. En général, le choix de paliers de longue durée permet de suivre au mieux la cinétique de diffusion de la lactatémie tout en favorisant l'obtention d'un état stable de la lactatémie (Astrand 1958), de l'oxygénation musculaire, de la ventilation, de l'économie d'effort et du  $\dot{V}O_2$  durant chaque période d'effort et de récupération (Flandrois 1988). Pour ce faire, les évaluateurs utilisent de longs paliers, de 4-5 min avec incrément d'environ 30 W, qui sont entrecoupés de périodes de récupérations actives. Ce type de protocole permet de mieux évaluer la dérive

cardiovasculaire et favorise une analyse plus fine de certaines altérations physiologiques, telle l'oxygénation du muscle squelettique. Ce type d'évaluation permettrait de mieux apprécier les charges de travail requises pour l'entraînement, en ciblant les paliers qui démontrent de fortes dérives physiologiques, établissant ainsi des plages d'effort (zones) à améliorer chez le cycliste.

## **2.5. Épreuve de puissance critique en 3 minutes ou test « 3-min all-out »**

Åstrand et Saltin (1961) ont montré qu'il est impossible de dépasser la valeur maximale de  $\dot{V}O_2$  en augmentant l'intensité d'exercice lors d'un protocole incrémental. Ces résultats ont révélé que la cinétique du  $\dot{V}O_2$  était modifiée par l'intensité d'un exercice précédent, de sorte que plus celle-ci est élevée, plus le  $\dot{V}O_{2max}$  est atteint rapidement. Pour autant, quelle que soit l'intensité d'exercice imposée, cette valeur maximale reste identique. Ceci avait été prédit par Hill et Lupton (1923), qui avaient conjecturé que «...quelle que soit la vitesse ou la charge de travail imposée au-delà de cette limite, aucune augmentation supplémentaire de la consommation d'oxygène ne peut se produire». Le test de puissance critique en 3 minutes (PC3) constitue l'un des protocoles qui s'intègre dans cette logique où l'effort supra-maximal déployé durant ce test faisait en sorte que la consommation d' $O_2$  augmentait très rapidement pour atteindre un pic de  $\dot{V}O_2$  qui se maintenait pendant les 60 dernières secondes de l'épreuve (Burnley et coll. 2006) (figure 2.1). Lors du test PC3, le participant doit développer un maximum de puissance et la maintenir durant 3 minutes sans connaître la durée du temps écoulé. Il faut dire que le  $\dot{V}O_{2max}$  n'est pas toujours observable lors de ce test, c'est pourquoi certains auteurs préfèrent mentionner un  $\dot{V}O_{2pic}$  lorsque les critères de  $\dot{V}O_{2max}$  (Rowell 1974) ne sont pas tous atteints à savoir : 1- un plafonnement ( $\sim 150$  ml) du  $\dot{V}O_2$  même si la puissance de travail est augmentée, 2- un quotient d'échange respiratoire (RER)  $> 1,1$ , 3- une fréquence cardiaque  $\geq 90\%$  de la  $FC_{max}$  estimée ( $220 - \text{âge}$ ) et 4- une lactatémie de plus de 8mM. Néanmoins, plusieurs études ont révélé que l'épreuve PC3 peut être utilisée pour identifier le  $\dot{V}O_{2pic}$  (Burnley et coll. 2006; Johnson et coll. 2011;

Vanhatalo et coll. 2007; Williams et coll. 2005). Francis et coll. (2010) ont rapporté que des participants sains non entraînés étaient capables lors d'un test PC3 d'atteindre un  $\dot{V}O_{2pic}$  dans les 60 premières secondes du test et de le maintenir pendant le reste de l'épreuve. Ceci confirme que le test PC3 permet d'atteindre un rendement énergétique maximal pour le système aérobie malgré une puissance de travail qui décline (Gastin et coll. 1995; Williams et coll. 2005). Une analyse de la variation de la puissance de travail a montré qu'à la fin du test PC3, la puissance décline en dessous de la PAM atteinte à la fin d'une épreuve classique de  $\dot{V}O_{2max}$  en rampe, tout en étant nettement plus élevée que la puissance associée au seuil ventilatoire. Il est par contre démontré que la puissance de travail reste peu variable durant les dernières 60 secondes d'un essai de PC3 (Burnley et coll. 2006). Burnley et coll. (2006) ont ajouté que la puissance finale (PF) qui est équivalente à la puissance moyenne des 30 dernières secondes du test PC3 estime la puissance critique (PC) et que le travail accompli au-dessus de la PF tout au long de la durée de ce test était égal au travail exécuté de façon anaérobie ( $W'$ ). En effet, la confirmation vient dans l'étude de Johnson et coll. (2011) qui ont pu vérifier la reproductibilité du test PC3 à estimer la PC, le  $W'$  et le  $\dot{V}O_{2pic}$ . Des analyses faisant le lien entre la puissance du test  $\dot{V}O_{2max}$  en rampe et celle du test PC3 faites par Francis et coll. (2010) ont montré que la PAM obtenue suite à un test  $\dot{V}O_{2max}$  en rampe correspond à 105% de la PC enregistrée lors du test PC3 et que 75% de la PC correspond au 2<sup>ème</sup> seuil lactique du test rampe.



**Figure 2.1.** (A) la puissance de travail et (B) la consommation d'oxygène au cours d'un test PC3 chez un sujet représentatif (Burnley et coll. 2006).

Les résultats (non publiés) d'une étude de cas réalisée par notre laboratoire, indiquent que les  $\dot{V}O_{2pic}$  obtenus lors des tests de PAM ou de PC3 étaient comparables, ils étaient respectivement égaux à 71,7 et 71,2  $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ , le test PC3 équivalant à 99% du  $\dot{V}O_{2max}$ . Le pourcentage de la saturation en oxygène artériel (%SpO<sub>2</sub>) à  $\dot{V}O_{2pic}$  était aussi similaire pour des valeurs égales à 94% et 92% respectivement. Par contre, la fréquence cardiaque maximale (FC<sub>max</sub>) enregistrée au test PC3 était plus faible de 12 bpm. À l'inverse, la lactatémie enregistrée à la fin du test PC3 était supérieure de 4,7 mM à celle constatée au test de PAM (tableau 2.3).

**Tableau 2.3** Mesures des paramètres physiologiques d'évaluation à la fin des tests PAM et PC3.

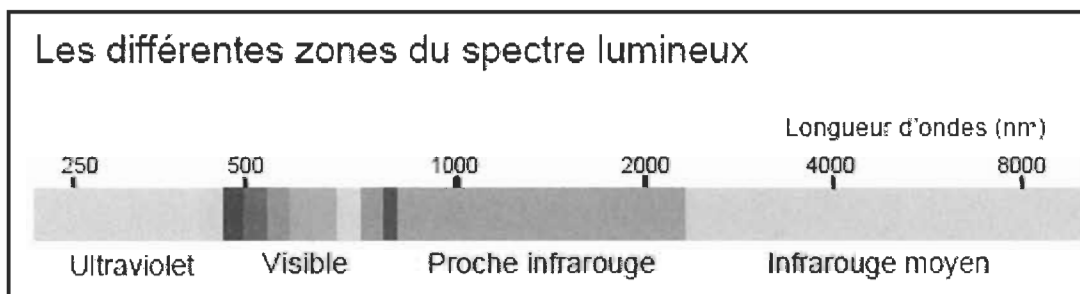
Variables	Fin test I5	Fin test PC3	% de différence absolu
$\dot{V}O_{2pic}$ ( $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ ) *	71,70	71,20	0,71
FC (bpm) *	199	187	6,42
Lactate pic (mmol)	14,60	19,30	32,20
%SpO <sub>2</sub>	94	92	2,18

$\dot{V}O_2$  : consommation maximale d'oxygène par minute par kg de poids, FC : fréquence cardiaque par minute, %SpO<sub>2</sub> : saturation pulsée en oxygène.

## 2.6. La Spectroscopie dans le Proche Infrarouge (SPIR)

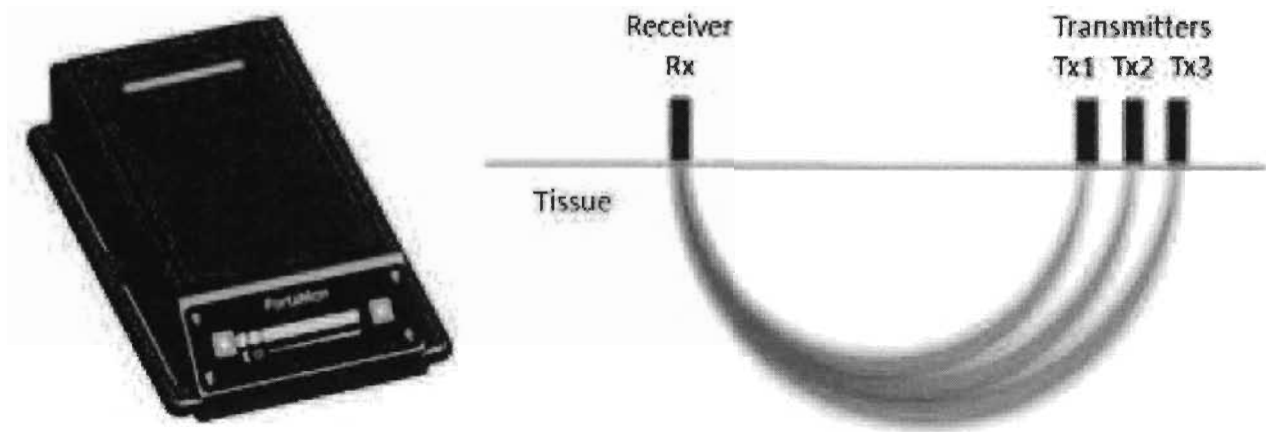
Il est commun dans la littérature et lors de l'évaluation de sportifs de mesurer la consommation d'oxygène du corps en général à partir des échanges gazeux pulmonaires. Par contre, le travail musculaire et la consommation d'oxygène des membres inférieurs sont rarement évalués. L'évolution récente des instruments optiques utilisant la technique de la spectroscopie dans le proche infrarouge de l'hémoglobine (SPIR) permet d'évaluer de façon spécifique et non invasive l'oxygénation musculaire squelettique en temps réel. Chance et coll. (1992) ont été les premiers à étudier l'évolution de la consommation d'oxygène dans le muscle à l'aide du SPIR. Au cours de la dernière décennie, la SPIR a été largement utilisée pour évaluer les changements de l'oxygénation des muscles et du volume sanguin musculaire à l'effort (Bhambhani et coll. 2004; Perrey et coll. 2010; Rasmussen et coll. 2010). Les variations enregistrées lors de ces exercices physiques témoignent des

changements du rapport entre l'apport d'O<sub>2</sub> au muscle et l'utilisation de l'O<sub>2</sub> par celui-ci (Grassi et coll. 2003). Les paramètres couramment mesurés par SPIR sont l'oxyhémoglobine (HbO<sub>2</sub>), la déoxyhémoglobine (HHb), l'hémoglobine totale (THb) et l'indice de saturation tissulaire en oxygène (TSI%). Du point de vue technique, la SPIR est une méthode optique basée sur les propriétés d'absorption différentielle des chromophores (composés absorbant la lumière), à savoir l'hémoglobine (Hb) et la myoglobine (Mb) dans le proche infrarouge qui varie de 700 nm à 1000 nm (Maikala 2010). À 760 nm, Hb et Mb se présentent sous la forme désoxygénée (respectivement HHb et HMb), alors qu'à 850 nm ces chromophores se présentent principalement dans l'état oxygéné (respectivement HbO<sub>2</sub> et MbO<sub>2</sub>). Ainsi, en surveillant la différence de la capacité d'absorption des tissus entre ces deux longueurs d'onde, le changement de l'oxygénation musculaire peut être examiné. La somme du signal d'absorption de ces deux longueurs d'onde indique la variation relative du volume sanguin musculaire qui est indépendante de tout changement des hématocrites (Chance et coll. 1992; Mancini et coll. 1994) (figures 2.2 et 2.3).



**Figure 2.2.** Spectre lumineux proche infrarouge.



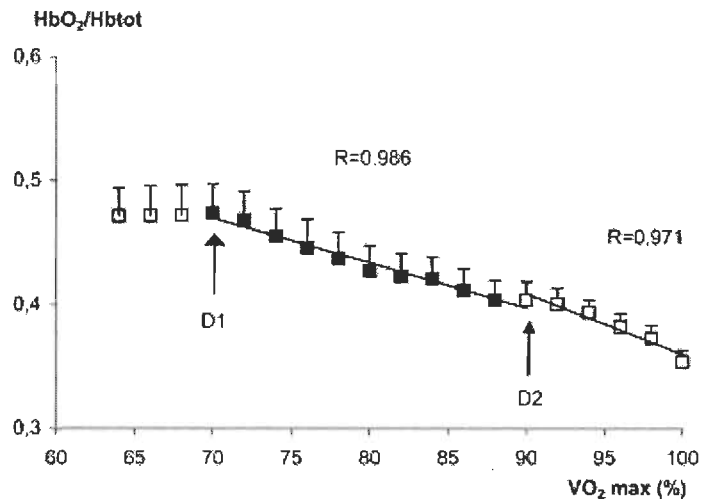


**Figure 2.3.** Émission et réception du signal proche infrarouge à travers le muscle.

## **2.7. L'oxygénation du muscle vaste latéral à l'effort**

Bien que l'activité d'endurance aérobie soit généralement évaluée par la consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_{2max}$ ), le seuil ventilatoire (Beaver et coll. 1986) ou le seuil lactique (David 1985), il s'agit dans tous ces cas de variables métaboliques systémiques. Certains sports comme le cyclisme ou le vélo de montagne sollicitent principalement les membres inférieurs et la dynamique métabolique à l'intérieur du muscle pourrait ne pas être reflétée dans le métabolisme systémique. Les différences des caractéristiques d'absorption de l'HbO<sub>2</sub> et de l'HHb évaluées avec la SPIR se sont avérées utiles pour estimer les variations relatives de l'oxygénation musculaire locale et le débit sanguin en temps réel lors d'un exercice physique. Kawaguchi et coll. (2001) ont étudié la relation entre la cinétique de l'oxygénation des muscles squelettiques et le volume d'oxygène systémique lors d'un test incrémental sur vélo ergométrique et ont observé une forte corrélation positive entre le  $\dot{V}O_2$  et l'HHb et négative entre le  $\dot{V}O_2$  et l'HbO<sub>2</sub> et le TSI%. De même pour Grassi et coll. (1999) qui ont observé aussi une augmentation du HHb et une diminution de l'HbO<sub>2</sub> jusqu'à l'atteinte de  $\dot{V}O_{2max}$  lors d'un exercice progressif en intensité chez des sujets sains de sexe masculin. Ces auteurs expliquent que le THb a montré une

augmentation jusqu'à environ 50% à 60% du  $\dot{V}O_{2max}$ , suivie d'une stabilisation ou d'un abaissement jusqu'à ce que le  $\dot{V}O_{2max}$  soit atteint. Ils suggèrent que cette diminution du volume sanguin total est très probablement due à la variation relative de la pression intramusculaire supérieure à la variation de la pression intra-vasculaire ce qui entraîne une baisse du volume sanguin localisé. Dans ce même contexte, une analyse de la relation entre l'oxygénation du muscle et le seuil lactique (SL) a montré qu'une plus grande oxygénation du muscle était significativement associée au SL pendant l'exercice incrémental sur vélo. D'autres études menées par Stringer et coll. (1994) et Wasserman et coll. (1991) expliquent qu'à des intensités supérieures au seuil ventilatoire (SV), l'accumulation d'acide lactique facilite la libération de l'oxygène de l'HbO<sub>2</sub> par l'effet de Bohr. En effet, au-delà d'une certaine intensité d'exercice, la baisse du pH, due à l'augmentation de la concentration des ions H<sup>+</sup> facilite la libération de l'O<sub>2</sub> de l'HbO<sub>2</sub>, ce qui entraîne une désoxygénation accrue dont témoigne la spectroscopie dans le proche infrarouge de l'hémoglobine (Grassi et coll. 1999). Récemment, Dupouy et coll. (2007) ont montré que l'évolution de la courbe de la désaturation musculaire en oxygène lors d'un test incrémental présente des modifications de pente (D1, D2) qui correspondent aux modifications de concentration d'oxygénation locale. Ces derniers finissent par conclure que l'utilisation de la spectroscopie dans le proche infrarouge permet de détecter le passage du métabolisme musculaire dans la zone transitionnelle aérobie-anaérobie en raison de la concordance qui existe entre la courbe de désaturation d'HbO<sub>2</sub> et celle de la ventilation (figure 2.4).

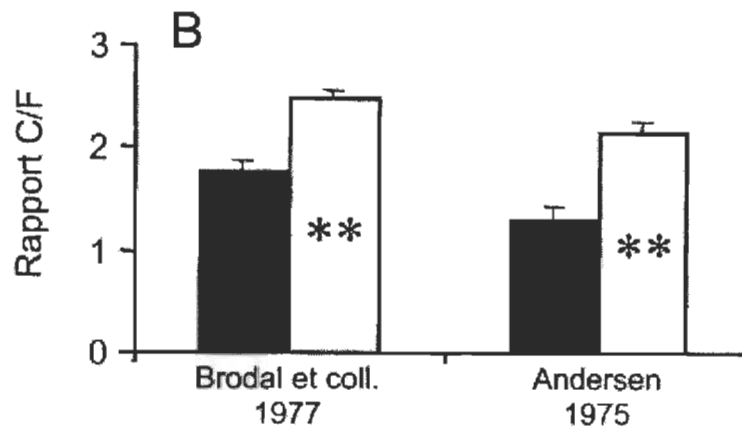


**Figure 2.4.** Évolution de l' $HbO_2/Hbtot$  en fonction de la puissance ( $\% \dot{V}O_{2max}$ ). D1 et D2: points d'inflexions de la désaturation capillaire artérielle correspondante à 70 et 90 % de  $\dot{V}O_{2max}$  (Dupouy et coll. 2007).

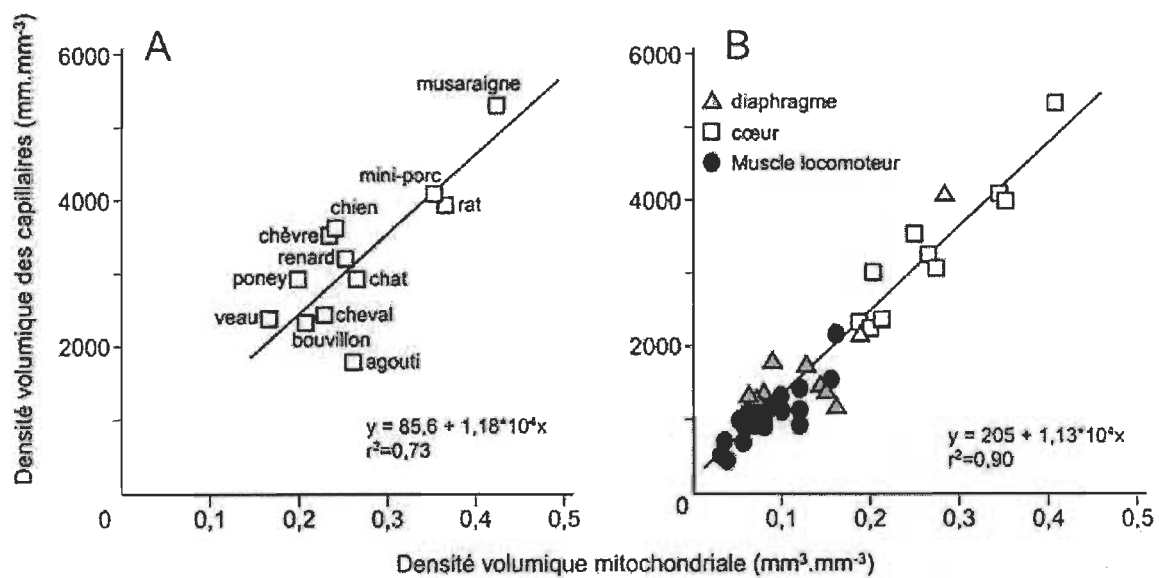
## 2.8. Réponse du réseau capillaire à l'entraînement et son effet sur l'oxygénation du muscle vaste latéral

Le muscle squelettique chez des personnes entraînées se caractérise par une densification du réseau capillaire comparativement à des personnes sédentaires. En réponse à l'augmentation de la demande fonctionnelle, par exemple lors d'un programme d'entraînement en endurance, le réseau capillaire jouit d'une certaine plasticité liée à une augmentation du rapport entre le nombre de capillaires et le nombre de fibres (C/F), plasticité qui se traduit entre autres par la formation de nouveaux vaisseaux et l'augmentation du nombre de capillaires autour de chaque fibre musculaire. Cette adaptation constitue le principal mécanisme de développement du réseau capillaire à l'entraînement : c'est l'angiogenèse (Andersen et coll. 1975; Brodal et coll. 1977) (figure 2.5). Il faut dire que, lors d'un exercice dynamique chez l'homme, le flux sanguin augmente linéairement avec l'élévation de la puissance imposée (Andersen et Saltin 1985). Comparé à l'état de repos, le flux sanguin peut être multiplié par 20 lors d'exercices d'intensité supérieure à 80% du  $\dot{V}O_{2max}$  (Richter 1996). Cet accroissement du flux sanguin durant l'exercice s'accompagne

d'une augmentation de la densité des capillaires fonctionnels au sein de chaque fibre (Saltin et Gollnick 1983) et ceci facilite la captation de glucose et d'oxygène par la fibre musculaire. Par ailleurs, des études ont montré qu'il existe une forte relation linéaire entre la longueur des capillaires par unité volumique de fibre et la densité volumique de mitochondries responsables de la phosphorylation oxydante (Hoppeler et Kayar 1988) (figure 2.6). L'ensemble de ces résultats conduit à dire que le degré de capillarisation du muscle est essentiellement contrôlé par la demande en oxygène et ce, quel que soit le type de fibre concerné. Ceci est vrai dans le sens où cela présente l'une des propriétés les plus indispensables à la distribution de l'oxygène et des substrats, mais aussi l'épuration des déchets métaboliques (Vock et coll. 1996).



**Figure 2.5.** Réponses du réseau capillaire à l'entraînement. (B) le rapport capillaires/fibres. Valeurs différentes de celles mesurées chez les sujets sédentaires, \*,  $p < 0,05$ , \*\*,  $p < 0,01$  (Andersen et coll. 1975; Brodal et coll. 1977).



**Figure 2.6.** Relations linéaires existant entre la densité volumique mitochondriale et la densité volumique des capillaires. (A) relations établies pour un même muscle entre différentes espèces de mammifères. (B) relations établies pour trois types de muscles au sein d'une même espèce (Hoppeler et Kayar 1988).

### 3. PROBLÉMATIQUE

À haut niveau, la performance sportive dépend en grande partie de la manière dont l'athlète est encadré. L'évaluation sportive et le suivi scientifique des athlètes exigent une analyse précise de la discipline sportive en termes d'exigence physique mais aussi une meilleure connaissance du degré d'implication des filières énergétiques durant la compétition. Ces paramètres constituent des éléments indispensables à la performance. En vélo de montagne, en plus de l'aspect technique de la compétition, les exigences de la course imposent aux athlètes de fournir des efforts continus plus ou moins réguliers en plus du départ très rapide et exigeant. En effet, lors du départ, l'énergie est produite par une mobilisation du système énergétique anaérobie alors que, durant la course, elle est fournie par des systèmes énergétiques mixtes qui majoritairement impliquent le métabolisme aérobie. De ce fait, l'évaluation des conditions physiques en vélo de montagne revient à évaluer les composantes des systèmes énergétiques aérobie et anaérobie. D'habitude, ce processus exige l'utilisation de deux tests qui mesurent de façon spécifique et indépendante ces deux composantes. Il faut dire que cette tâche n'est pas toujours facile avec les athlètes de haut niveau vu qu'ils ne peuvent pas se présenter plusieurs fois au laboratoire. Souvent ces derniers proviennent de régions éloignées en plus d'être couramment à l'extérieur du pays. De plus, leur plan d'entraînement très chargé ne le permet tout simplement pas. De ce fait vient l'intérêt de trouver un test qui puisse mesurer à la fois les deux composantes des systèmes énergétiques aérobie et anaérobie. Des études récentes ont présenté le test de puissance critique de 3 minutes comme moyen fiable et efficace pour l'évaluation de ces deux composantes. Ce test permet d'apprécier le  $\dot{V}O_{2pic}$  et la puissance critique (PC) deux composantes qui caractérisent le système énergétique aérobie, en plus de la puissance pic ( $P_{pic}$ ) et du travail exécuté de façon anaérobie ( $W'$ ) deux composantes qui caractérisent le système énergétique anaérobie. À la connaissance de l'auteur, aucune étude ne s'est

intéressée à vérifier ces mêmes paramètres chez des athlètes élités, ce qui constitue l'apanage de cette étude.

D'autre part, ces dernières années, un grand intérêt est apparu pour l'utilisation de la spectroscopie dans le proche infrarouge SPIR comme outil de mesure de l'activité métabolique du muscle squelettique (Chance et coll. 1992). Cette mesure est basée sur les variations de concentrations tissulaires en hémoglobine oxygénée ou non oxygénée et du débit sanguin à l'intérieur du muscle squelettique en réponse à un exercice physique. Cette technique offre la possibilité de suivre la dynamique de l'oxygène à l'intérieur du muscle en activité et lors de la récupération et ainsi de mesurer les variations de l'oxygénation musculaire. Plusieurs études ont examiné la réponse de l'oxygénation du muscle vaste latéral et la variation de sa concentration en hémoglobine pendant l'exercice incrémental jusqu'à l'arrêt volontaire suite à une fatigue accrue (Bhambhani et coll. 1997; Grassi et coll. 1999; Legrand et coll. 2007). Cependant, à ce jour, aucune étude ne s'est intéressée à évaluer l'oxygénation et le débit sanguin du muscle vaste latéral lors du test PC3 et à vérifier s'il est possible d'extraire plus d'oxygène ou de perfuser plus de sang, en comparaison à un test incrémental classique qui mesure la consommation d'oxygène.

Le but de ce mémoire est d'une part de caractériser les réponses cardiorespiratoires, les puissances de travail déployées, l'extraction et le transport d'oxygène dans le muscle vaste latéral durant un test de PC3 chez des vététistes élités. D'autre part, de déterminer si au cours du test PC3, le muscle squelettique aura la capacité d'extraire plus d'oxygène et de mobiliser un plus grand débit sanguin en comparaison à un test de PAM. En outre, de vérifier si des efforts supra-maximaux auront pour effet une réduction accrue de l'indice de saturation tissulaire en oxygène (TSI%) dans le muscle vaste latéral.

#### 4. QUESTIONS DE RECHERCHE

1. Lors d'un test supra-maximal (PC3), est-il possible d'atteindre des valeurs physiologiques maximales équivalentes ou supérieures à celles obtenues lors d'un test de puissance maximale aérobie (PAM) chez des cyclistes élités?

2. La puissance supra-maximale enregistrée lors du test PC3 favorisera-t-elle un plus grand débit sanguin et une plus grande extraction d'oxygène musculaire par rapport aux valeurs enregistrées lors du test PAM ?

3. Un effort supra-maximal pourrait-il induire une plus grande réduction de l'indice de saturation tissulaire en oxygène (TSI%) dans le muscle vaste latéral ?



## 5. HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

Nous émettons l'hypothèse que lors d'un test PC3, il est possible d'atteindre un  $\dot{V}O_{2pic}$  comparable à celui obtenu lors d'un test PAM chez des cyclistes élités en vélo de montagne. Nous émettons aussi l'hypothèse que l'extraction de l'oxygène et le débit sanguin dans le muscle squelettique ne seront pas plus élevée lors d'un test supra-maximal en comparaison à un test de puissance aérobie maximale. De plus, nous supposons que la dynamique de l'évolution du débit sanguin dans le muscle squelettique sera inversement corrélée au développement de la puissance de travail supra-maximale enregistrée lors du test PC3. Nous présumons aussi que des efforts supra-maximaux auront pour effet de réduire l'indice de saturation tissulaire en oxygène (TSI%) dans le muscle vaste latéral.

## 6. ARTICLE

### **The near infrared spectroscopy (NIRS) applied to a 3-min all-out test and its physiological concomitants in elite cyclists' evaluation.**

H. Ziadia<sup>1</sup>, L. Laurencelle<sup>1</sup>, V. Cantin<sup>1</sup>; D. Welman<sup>2</sup>, I. Hugues<sup>3</sup> and C. Lajoie<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Département des sciences de l'activité physique de l'UQTR, <sup>2</sup> Entraîneur de l'équipe du Québec de Vélo de Montagne, <sup>3</sup> Entraîneur National de Développement de Vélo de Montagne.

\* Corresponding author: Claude Lajoie, Université du Québec à Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7.

Département des sciences de l'activité physique.

This research was funded by Centre National Multisports Montréal (CNMM)

## 6.1. Abstract

**Background:** The practice of competitive mountain biking (MTB) requires a physical effort that vary power (Watts) and solicit multiple energy systems. The 3-min all-out test of Burnley et al. (2006) assesses  $\dot{V}O_{2peak}$  and critical power (CP) which characterize the aerobic energy system. The test also assesses peak power ( $P_{peak}$ ) and anaerobic capacity (W') allowing to evaluate the power and capacity of the anaerobic system. Hence, compared to traditional maximal aerobic power tests (MAP tests); the 3-min all-out test would better appreciate the physical abilities of elite cyclists. Previously, researchers have investigated on the pulmonary oxygen kinetics, lactate threshold and critical power during the 3-min all-out test. However, it is possible that the metabolic dynamics in the muscle stays not reflected in the systemic metabolism. That is why the oxygen flow in the skeletal muscle during a supra-maximal effort needs yet to be studied. The 3-min all-out test could be a valuable laboratory test that mimics the skeletal muscle oxygen behavior at the start of a MTB race. Using near infrared spectroscopy (NIRS) and monitoring deoxyhaemoglobin (HHb) or oxygen extraction, oxyhaemoglobin ( $HbO_2$ ), total haemoglobin (THb) or muscle blood flow and tissue saturation index (TSI%), it becomes possible to better understand oxygen kinetics in the skeletal muscle.

**Objectives:** The purpose of our study is to characterize of the cardiorespiratory responses, the deployed working power, extraction and transportation of oxygen in the vastus lateralis muscle throughout 3-min all out and MAP tests. Determine whether skeletal muscle has the ability to extract more oxygen and to use an increased blood flow in comparison with MAP during a 3-min all-out test. Finally, determine if a supra-maximal effort reduced tissue oxygen saturation index (TSI%) in the muscle.

**Methods:** Six U23 world class elite competitive mountain bikers and two road cyclists (age  $21 \pm 2.6$  years, height  $178.6 \pm 7.03$  cm, weight  $68.04 \pm 5.03$  kg,

percentage of body fat  $7.19 \pm 3.23$  and  $\dot{V}O_{2peak}$   $72.01 \pm 3.7$  ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) achieved a MAP test and a 3-min all-out test during a single presence using their own bicycles and a power-measuring rear wheel. The goals of the MAP test was to determine the maximal oxygen consumption ( $\dot{V}O_{2max}$ ) and the maximal aerobic power (MAP) in watts. The protocol was progressive by increasing the load with 30 Watts through levels of effort lasting 5 minutes, interspersed with 3-minute periods of recovery using a low load (1 watt/kg of body weight) until exhaustion. The 3-min all-out test aims at determining the peak power ( $P_{peak}$ ), the anaerobic capacity ( $W'$ ) and the critical power (CP). During the 3-min all-out test, cyclists were instructed to develop the greatest pedaling speed to achieve the highest possible work rate throughout the test. Pedaling power,  $\dot{V}O_2$ , ventilation and lactate were measured. Deoxyhaemoglobin (HHb), TSI% and an indirect measurement of muscle blood flow (THb) were measured by near-infrared spectroscopy (NIRS) during both tests.

**Results:** During the 3-min all-out test,  $\dot{V}O_2$  reached 95% of its value at  $53.33 \pm 8.16$  seconds from the start of the test.  $\dot{V}O_{2peak}$  was reached at  $147.5 \pm 36.6$  seconds and was equivalent to 96.57% of the  $\dot{V}O_{2peak}$  obtained during the MAP test, representing a difference of 3.43%.  $\dot{V}O_{2peak}$  measured during the 3-min all-out test ( $69.54 \pm 5.46$  ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) and during the MAP test ( $72.01 \pm 3.68$  ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) were equivalent ( $p \approx 0.20$ ). The  $P_{peak}$  reached during the 3-min all-out test was equal to  $846.3 \pm 175.4$  W: about 228.49% of the MAP. The CP was equal to  $351.1 \pm 59.62$  W: equal to 93.63% of the MAP ( $375 \pm 44.16$  W). No significant difference between the CP and MAP was observed ( $p = 0.08$ ). The anaerobic capacity ( $W'$ ) evaluated during the 3-min all-out test was equal to  $18.307 \pm 3.71$  KJ. A strong correlation was recorded between Watts/body weight observed during the MAP test and  $W'$ /body weight during 3-min all-out test ( $r = 0.886$ ;  $p < 0.05$ ). All the parameters measured by NIRS during 3-min all-out test did not reach a

higher level than what was recorded during the MAP test, in spite of the supra maximal power output deployed during the 3-min all-out test. However, an opposite variation between the THb and the pedaling power was observed during the 3-min all-out test i.e. an increase of the pedaling power was associated by a decrease of THb and vice versa ( $r = -0.99$ ;  $p < 0.001$ ) suggesting that skeletal muscle vasoconstriction occurs at higher power outputs.

**Conclusion:** In the case of elite cyclists, the cardiorespiratory and muscular oxygenation parameters reached during a 3-min all-out test were similar to those recorded during a MAP test. More expeditious than traditional tests, the 3-min all-out test allow not only the estimation of MAP, but also the quantification of the anaerobic work to better understand the strengths and weaknesses of an athlete. In addition, the 3-min all-out test can be a consistent tool for the prediction of the performance. Furthermore, the dynamics of the evolution of blood flow in skeletal muscle was inversely correlated with the supramaximal work power development recorded during the 3-min all-out test.

## 6.2. Introduction

Competitive cross country mountain biking requires technical skills combined with varying efforts intensity. During a mass-start mountain bikes' race, cyclist must develop a powerful start in order to lead out the race after which they can better control the race out of the single track traffic with a high percentage of the maximal aerobic power (MAP). During the competition, cyclists must generate quick supra-maximal efforts bouts during steep climbing or technical part interspersed with lighter downhill efforts. In order to better evaluate physiological strength and weakness, cyclist should go through two tests that measure specifically and independently the components of the aerobic and the anaerobic systems. Therefore, using a single test to evaluate simultaneously the aerobic and the anaerobic energy systems could be less time consuming and easily administrated in a laboratory and field testing. The 3-min all-out test developed by Burnley et al. (2006) accomplishes these requirements since it allows to study two of the parameters that characterize the aerobic energy system: the  $\dot{V}O_{2peak}$  defined as the highest  $\dot{V}O_2$  measurement obtained during a maximal effort, regardless of its conditions (Rowell, 1974) whereas the critical power (CP) is defined as the power at which the aerobic system fully meets the energy demand while working at its maximum (Moritani et al., 1981). In a 3-min all-out test, the CP is equal to the average power in the last 30 seconds of the test (Burnley et al., 2006, Johnson et al., 2011; Vanhatalo et al., 2007). Moreover, the 3-min all-out test allows to evaluate the peak power ( $P_{peak}$ ) and the anaerobic capacity ( $W'$ ). The  $P_{peak}$  is the highest power recorded during a maximal or supra-maximal physical test, while the anaerobic capacity ( $W'$ ) is the work performed anaerobically which corresponds to the anaerobic capacity. A large body of related work is interested in this test (Dupouy et al., 2007; Grassi et al., 1999; Kawaguchi et al., 2001). The test minimizes the number of athletes' visits to the laboratory and assesses the components of the aerobic and the anaerobic systems with precision. Reliability of the 3 min all out test has been demonstrated (Vanhatalo et al., 2007) as well as its reproducibility to estimate the CP,  $W'$

and  $\dot{V}O_{2\text{peak}}$  (Johnson et al., 2011).

Of late in optical instruments using the technique of near-infrared spectroscopy of hemoglobin allow a specific and non-invasive assessment of muscle oxygenation in real time (Chance et al., 1992). This technique allows non-invasive measurement of the transformation of oxygenated state of hemoglobin (oxy-hemoglobin  $\text{HbO}_2$ ) to the deoxygenated state (deoxy-hemoglobin HHb). This measurement allows monitoring the dynamics of oxygen inside the active muscle. Several studies have examined the response of oxygenation in the vastus lateralis muscle and the variation of its hemoglobin concentration during exercises with varying intensity until exhaustion (Bhambhani et al., 1997; Grassi et al., 1999; Legrand et al., 2007). Typically, studies that measured the variation of skeletal muscle oxygenation were carried out during exercise whose intensity does not exceed the maximum aerobic power (MAP). It is generally accepted that the variation of oxygenation and blood volume of the vastus lateralis muscle measured by NIRS can accurately follow variations of pulmonary oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) at intensity values below and above the lactate threshold of 4 mM with subjects whose  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  are lower than  $60 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Belardinelli et al., 1995; Bhambhani et al., 1997; Grassi et al., 1999; Legrand et al., 2007). However, the nature of many competitive sports such as mountain biking requires the development of work power which is regularly above the MAP. However, to date, no study has focused on assessing the oxygenation and the variation of blood flow in the vastus lateralis muscle during a supra-maximal test, compared to a conventional incremental test that measures maximal aerobic power with elite athletes.

The objectives of this study are three fold:

1. Characterize the cardiorespiratory responses, the deployed work power, the extraction and the transportation of oxygen in the vastus lateralis muscle during a 3-min all-out test in elite cyclists.

2. Determine whether the skeletal muscle has the ability to extract more oxygen and to mobilize a greater blood flow in a 3-min all-out test or not, compared to a traditional MAP test.
3. Verify if supra-maximal efforts can result in a further reduction of the tissue saturation index in oxygen (TSI %) in the vastus lateralis muscle.

### **6.3. Materials and methods**

#### **6.3.1. Participants**

Six male cyclists U23 from « Quebec MTB team », all active members in the International Cycling Union (ICU) for the current year and all participants in the World Championships in Champéry, Switzerland (2011) and two well-trained road cyclists participated in this study. Participants physical characteristics are the following (mean  $\pm$  SD): age  $21.25 \pm 2.55$  years, height  $178.6 \pm 7.03$  cm, weight  $68.04 \pm 5.03$  kg, percentage of body fat  $7.19 \pm 3.23\%$  and  $\dot{V}O_{2max}$   $72.01 \pm 3.68$  ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>. Participants volunteered to participate to the study and provided written informed consent. The study was approved by the University Ethics Committee.

#### **6.3.2. Experimental Protocol**

Each participant made a single visit to the laboratory to perform primarily a MAP test and secondly a 3-min all-out test. During the experiment, the ambient temperature in the laboratory was about  $21 \pm 1^\circ$ , the pressure was about  $101 \pm 1$  hPa and the humidity was about  $24 \pm 3\%$ . A recovery of 30 minutes was given between the two tests after which they proceeded to do a lactate test to ensure that the lactate was well below the 1st lactate threshold of 2 mM before starting the second test of the study (a 3-min all-out test). The choice to do both tests in one day was due to the fact that it was not possible to invite athletes on two different days since their training schedule was very busy, their racing's dates were very close, and of course their hometowns are distant from the laboratory. Such a protocol was verified during the study of Constantinin et al.



(2014) who showed that the CP and the W' recorded during the 3-min all-out test following a combined protocol (a MAP test followed by a 3-min all-out test between which they gave 20 minutes of recovery) were not different to those recorded during an independent 3-min all-out test. However, such a study design has its advantages because it allows to keep the same positioning of the equipments (NIRS) and the baseline monitoring for both tests. This will promote greater fidelity while comparing results between tests and minimize errors related to the positioning and the sizing of equipment.

### **6.3.3. Equipments**

Each participant performed the tests on their own bike connected to an electromagnetic dynamo (Racermate, ComputrainerLab, Seattle, WA, US) that manages the test conditions and makes it reproducible. These equipment have been validated in studies evaluating cyclists' performance (Cane et al., 1996; Laursen et Penkins, 2002; Westgarth-Taylor et al., 1997; Weston et al., 1997). The bike was equipped with an instrumented wheel that records the power output « PowerTap » (CycleOps PowerTap SL 2.4) related to a data processing software (Training Peak, WKO+ 3.0). In both tests, the measurement of oxygen consumption and all maximal and submaximal variables were averaged every 10 seconds and determined by analysis of pulmonary gas with a metabolic analyzer (Moxus, AEI technologies USA). The HR was continuously recorded using a telemetry heart rate monitor (Polar Electro FS3, Finland). A capillary blood sample was taken from the fingertip to measure the lactate using an appropriate device (Blood Lactate Test Meter, Lactate Pro LT-1710, ARKRAY. Inc, Kyoto, Japan). Oxygen extraction and the estimate variation of peripheral blood flow in the vastus lateralis (VL) muscle were measured non-invasively using the near infrared spectroscopy (NIRS) by telemetry (Artinis Medical System BV, Portamon : 0910, PortaSoft : 2.0.1.21, OxySoft : 2.1.1-2.1.6, Netherlands). More specifically, this device measured variations in

oxyhemoglobin (HbO<sub>2</sub>), deoxyhemoglobin (HHb), total hemoglobin (THb) and muscle oxygen saturation (TSI %). The NIRS device transmits light beams through the tissue at different wavelengths: 905, 850 and 770 nm, differentiating between the HbO<sub>2</sub> and HHb (Bhambhani et al., 1999). HHb shows the muscle's ability to extract oxygen from hemoglobin, which represents the consumption during exercise. After insertion into a protective envelope made of impermeable plastic, NIRS was placed flat on the VL muscle, between the lateral condyle and the greater trochanter of the femur. The VL muscle was chosen because of its recruitment during the pedaling action and was used in several research protocols (Bhambhani et al., 2010; Dupouy et al., 2007; Kawaguchi et al., 2006). To prevent the entry of any external light that can affect the quality of signals, NIRS has been covered by a nylon stretch bandage that does not bother the cyclist's movement.

#### **6.3.4. Test 1: Maximal aerobic power test (MAP and $\dot{V}O_{2max}$ )**

On their arrival to the laboratory and after the setting up of NIRS, participants had to rest for 15 minutes during which variables such as heart rate, lactate and NIRS variables (baseline) as well as anthropometry measurements were recorded. The calibration of the electromagnetic dynamo was made during the warm-up, after the basal measurement of NIRS, according to the manufacturer's recommendations before the MAP test.  $\dot{V}O_{2max}$  and MAP were obtained by increasing progressively the workload by 30 Watts for periods of 5 minutes, intercalated with recovery periods of 3 minutes at low intensity (1 watt / kg). Levels of long duration help to better follow the kinetics of diffusion of lactate and promote the achievement of its stable states (Astrand, 1958), in addition to the muscle oxygenation, ventilation and  $\dot{V}O_2$  during each effort and recovery period (Flandrois, 1988). A lactate analysis was made at the end of each period of exercise and recovery. The test ends when the athlete was no longer able to maintain its initial rate previously determined (~ 90 to 100 rpm) or the achievement of two of the

following four criteria: 1- Upper limit of  $\dot{V}O_2$  (+/- 150 ml) even if the power increased. 2- respiratory exchange ratio (RER) > 1.1. 3- heart rate  $\geq$  90% of the estimated max HR (220-age). 4- over 8 mM of lactate (ACSM, 2001). During effort periods, participants kept sitting, and throughout the test, they kept the same gear wheel preselected during the calibration of electromagnetic dynamo. Participants were encouraged during the test.

#### **6.3.5. Test 2: 3-min all-out test**

According to the protocol developed by Francis et al. (2010), athletes performed the test on their own competition bikes. The use of personal bike limits the risks incurred by the use of an ergocycle whose adjustment does not suit the anthropometric parameters of each cyclist. As the in method Burnley et al. (2006), subjects were allowed to warm-up for 5 minutes using a load of 100W, the warm-up was followed by 5 minutes of recovery. Before the test and to maximize the starting power, participants performed five trials of 5-second starts to identify the appropriate gearwheel. At the start of the 3-min all-out test, cyclists were ask to achieve the greatest speed pedal revolution (rpm) in order to realize the highest power output (Watts) throughout the test. Athletes had the opportunity to change the gear and the pedaling cadence; however, they had to maintain a sitting position throughout the test in order to prevent technical skill discrepancy between subjects. Participants were encouraged verbally during the test but they were not informed about the elapsed time or the generated power. Lactate was taken at the end of the test.

#### **6.4. Statistical analysis**

All results are presented as means  $\pm$  SD. The significance of differences observed between means were statistically analyzed using analysis of one-way variance repeated measures. Pearson's correlations were used to examine the relationship between cardiovascular parameters and NIRS parameters for both tests. A bilateral test of Spearman correlation was used to examine the relationship between the rank of relative

MAP and the relative anaerobic work capacity of each subject. The value of  $p < 0.05$  was accepted as significant. All statistical analyzes were done using a software of statistical data processing (Statistica 6.1. StatSoft. Inc, USA).

## 6.5. Results

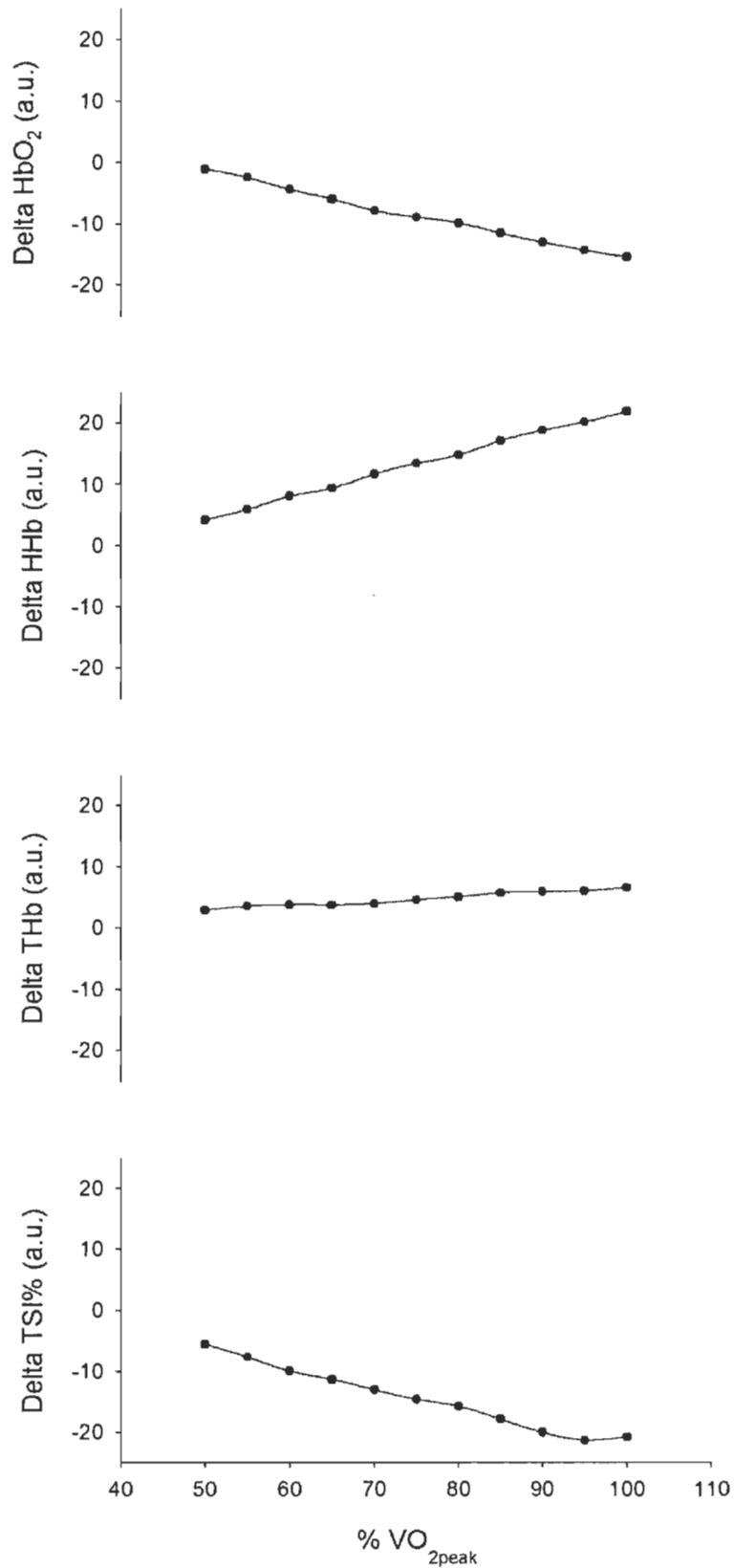
### 6.5.1. MAP test results

Figure 6.1 shows the variation of NIRS parameters in terms of the percentage of  $\dot{V}O_{2peak}$  during the MAP test. All NIRS parameters follow a linear variation during the MAP test. On one hand, HHb and THb parameters increase continuously as  $\dot{V}O_2$  increases until the end of the test. On the other hand, HbO<sub>2</sub> and TSI% parameters, decrease until reaching the  $\dot{V}O_{2peak}$ . Changes in NIRS parameters are expressed as arbitrary units (a.u.). An analysis of the average correlation between the NIRS parameters with  $\dot{V}O_2$  and the pedaling power in percentage of  $\dot{V}O_{2peak}$  showed that all these variables were highly correlated with each other's (table 6.1). Figure 6.2 shows the individual average variation of measurement parameters at the end of each high level during the MAP test.

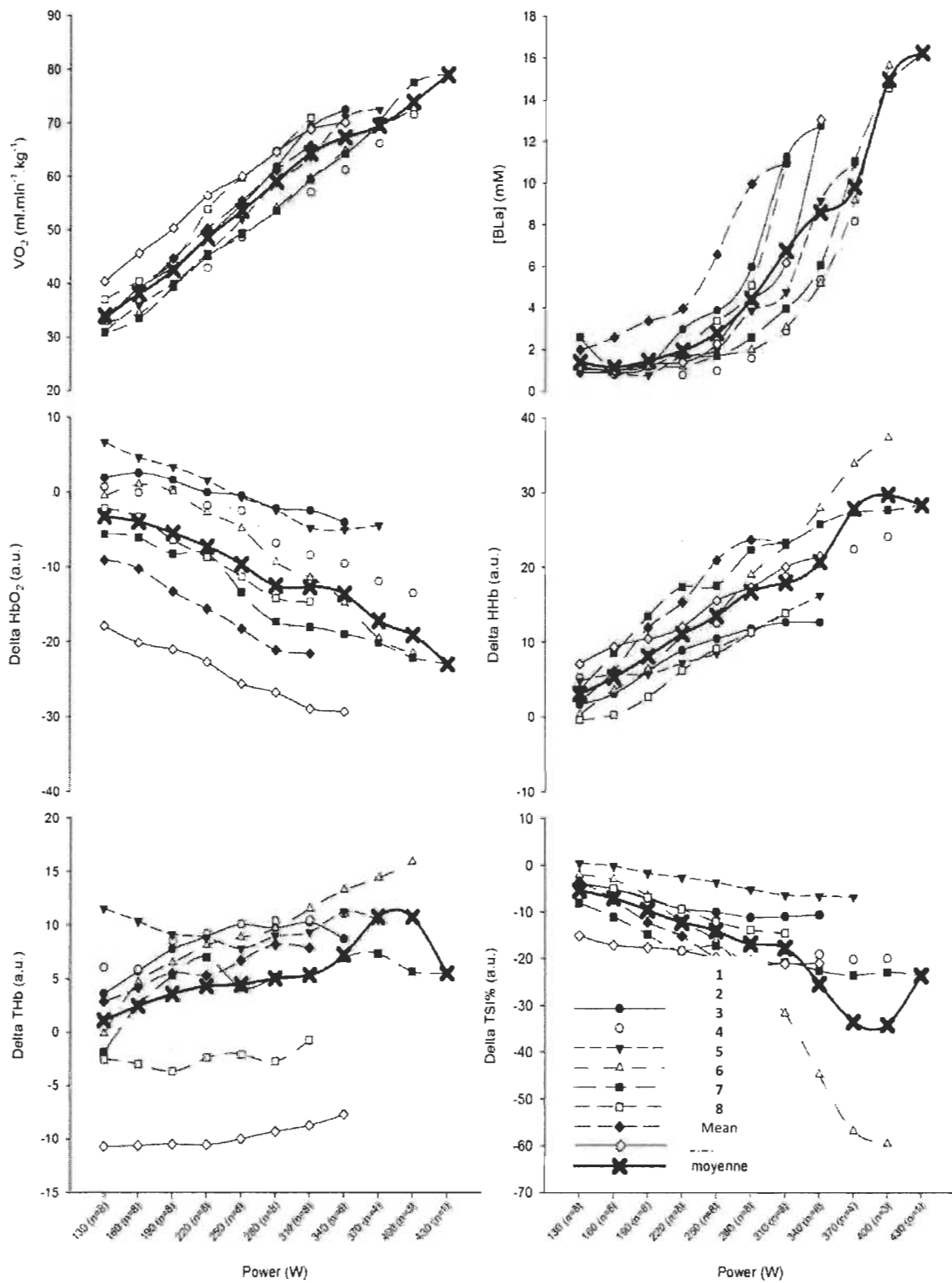
**Table 6.1.** Correlation between NIRS parameters with  $\dot{V}O_2$  and pedaling power in %  $\dot{V}O_{2peak}$ .

Variables	Power	$\Delta HbO_2$	$\Delta HHb$	$\Delta THb$	$\Delta TSI\%$
$\dot{V}O_2$ (ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	$r = 0,99$ $p < 0,001$	$r = -0,99$ $p < 0,001$	$r = 0,99$ $p < 0,001$	$r = 0,98$ $p < 0,001$	$r = -0,99$ $p < 0,001$
Power (W)		$r = -0,99$ $p < 0,001$	$r = 0,99$ $p < 0,001$	$r = 0,98$ $p < 0,001$	$r = -0,99$ $p < 0,001$
$\Delta HbO_2$ (a.u.)			$r = -0,99$ $p < 0,001$	$r = -0,97$ $p < 0,001$	$r = 0,99$ $p < 0,001$
$\Delta HHb$ (a.u.)				$r = 0,98$ $p < 0,001$	$r = -0,99$ $p < 0,001$
$\Delta THb$ (a.u.)					$r = -0,97$ $p < 0,001$

$\dot{V}O_2$ : oxygen uptake, Power: power output,  $\Delta HbO_2$ : skeletal muscle oxyhemoglobin,  $\Delta HHb$ : skeletal muscle deoxyhemoglobin,  $\Delta THb$ : skeletal muscle total haemoglobin,  $\Delta TSI\%$ : skeletal muscle tissue saturation index.



**Figure 6.1.** Changes in skeletal muscle oxyhemoglobin ( $\Delta\text{HbO}_2$ ), skeletal muscle deoxyhemoglobin ( $\Delta\text{HHb}$ ), skeletal muscle total hemoglobin ( $\Delta\text{THb}$ ) and skeletal muscle tissue saturation index ( $\Delta\text{TSI}\%$ ) vs % peak oxygen uptake ( $\% \dot{V}\text{O}_{2\text{peak}}$ ) at MAP test (average results).



**Figure 6.2.** Individual changes in oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ), lactatemia [BLA], skeletal muscle oxyhemoglobin ( $\Delta HbO_2$ ), skeletal muscle deoxyhemoglobin ( $\Delta HHb$ ), skeletal muscle total hemoglobin ( $\Delta THb$ ) and skeletal muscle tissue saturation index ( $\Delta TSI\%$ ) at MAP test.

### 6.5.2. 3-min all-out test

Figure 6.3.A shows the variation of the pedaling power (P) in the 3-min all-out test. During this test, the  $P_{\text{peak}}$  is reached at  $4.34 \pm 1.63$  seconds after the start and is equal to  $846.3 \pm 175.4$  W which represents 228.49% of the MAP. The power output decreases significantly thereafter to reach a mean value equal to  $365.3 \pm 63.6$  W which represents 97.42% of the MAP at  $53.33 \pm 8.16$  seconds after the start of the test. The power output decrease is accompanied by a linear increase in  $\dot{V}O_2$  that could achieve up to 95% of the  $\dot{V}O_{2\text{peak}}$  during the same period which is equal to  $69.54 \pm 5.46$  ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>. During the rest of the test, the power slightly decreases then stabilizes during the last 30 seconds at  $351.1 \pm 59.62$  W representing 93.63% of the MAP. Meanwhile, a slight increase in oxygen consumption (5%) is maintained until the  $\dot{V}O_{2\text{peak}}$  is reached at  $147.5 \pm 36.6$ s before the end (figure 6.3.B). However, the pedaling frequency at  $P_{\text{peak}}$  is equal to  $96 \pm 19.7$  rpm while it was  $89.8 \pm 8.11$  rpm at the CP, that is 7 rpm difference between the  $P_{\text{peak}}$  and the CP.

Moreover, after the explosive start the HR increased linearly to reach  $170.4 \pm 5.2$  bpm at  $53.33 \pm 8.16$  seconds after the start of the test (95% of  $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ ), which represents 94.25% of  $HR_{\text{peak}}$  ( $180.6 \pm 6.1$  bpm). During the rest of the test, the HR slightly increased by 10 bpm before reaching its peak at  $173.8 \pm 10.6$  seconds after the start of the test (figure 6.3.D). Pulmonary ventilation ( $V_e$ ) peak was recorded at  $82.5 \pm 41.66$  seconds ( $177.3 \pm 22.4$  l.min<sup>-1</sup>). At CP, it was equal to  $163.9 \pm 18.3$  l.min<sup>-1</sup> which is 92.45% of the  $V_{e\text{peak}}$  (figure 6.3.C).

Figure 6.4 shows the behavior of the NIRS measured parameters with respect to the change in workload. As a consequence of the explosive start with a supra-maximal effort,  $\Delta HbO_2$  and  $\Delta TSI\%$  increased significantly to reach their highest levels ( $8.4 \pm 7$  a.u. and  $4.45 \pm 4.45$  a.u. respectively) only 5 seconds from the beginning of the test. These peaks are followed by a relatively quick decrease that brought the two variables to their lowest levels ( $-15.7 \pm 7.7$  a.u.  $-17.3 \pm 8.5$  a.u. respectively) at 20 seconds. During the rest of the test,  $\Delta HbO_2$  increased slightly ( $+2.3$  a.u.) to reach  $-13.4 \pm 6.6$  a.u. at CP (figure

6.4.B) whereas the  $\Delta\text{TSI}\%$  continued to decrease slightly (-2.6 a.u.) to reach  $-19.9 \pm 16.8$  a.u. at CP (figure 6.4.E). Furthermore, inverse variations were recorded for  $\Delta\text{HHb}$  and  $\Delta\text{THb}$ . As of the  $\Delta\text{HHb}$  variable, following the explosive start with a supra-maximal load, the variable decreased significantly, reaching its lowest level ( $-10.5 \pm 3.6$  a.u.) at 5 seconds from the start of the test. This decrease was followed by a significant increase reaching  $14.3 \pm 6$  a.u. at 20 seconds from the start of the test. Then,  $\Delta\text{HHb}$  variable continued a slight increase (+6.1 a.u. during 160 seconds) to reach  $19.9 \pm 8.5$  a.u. at CP (figure 6.4.C). For  $\text{THb}$ , a sharp decrease was recorded after the explosive start, reaching its peak ( $-4 \pm 8$  a.u.) 20 seconds after the beginning of the test. This was followed by a significant increase up to  $4.3 \pm 6.9$  a.u. at 60 seconds from the start of the test after which the variable kept increasing but with a slight slope (2.5 a.u. during 120 seconds) to reach  $6 \pm 5.9$  a.u. at CP (figure 6.2.D).

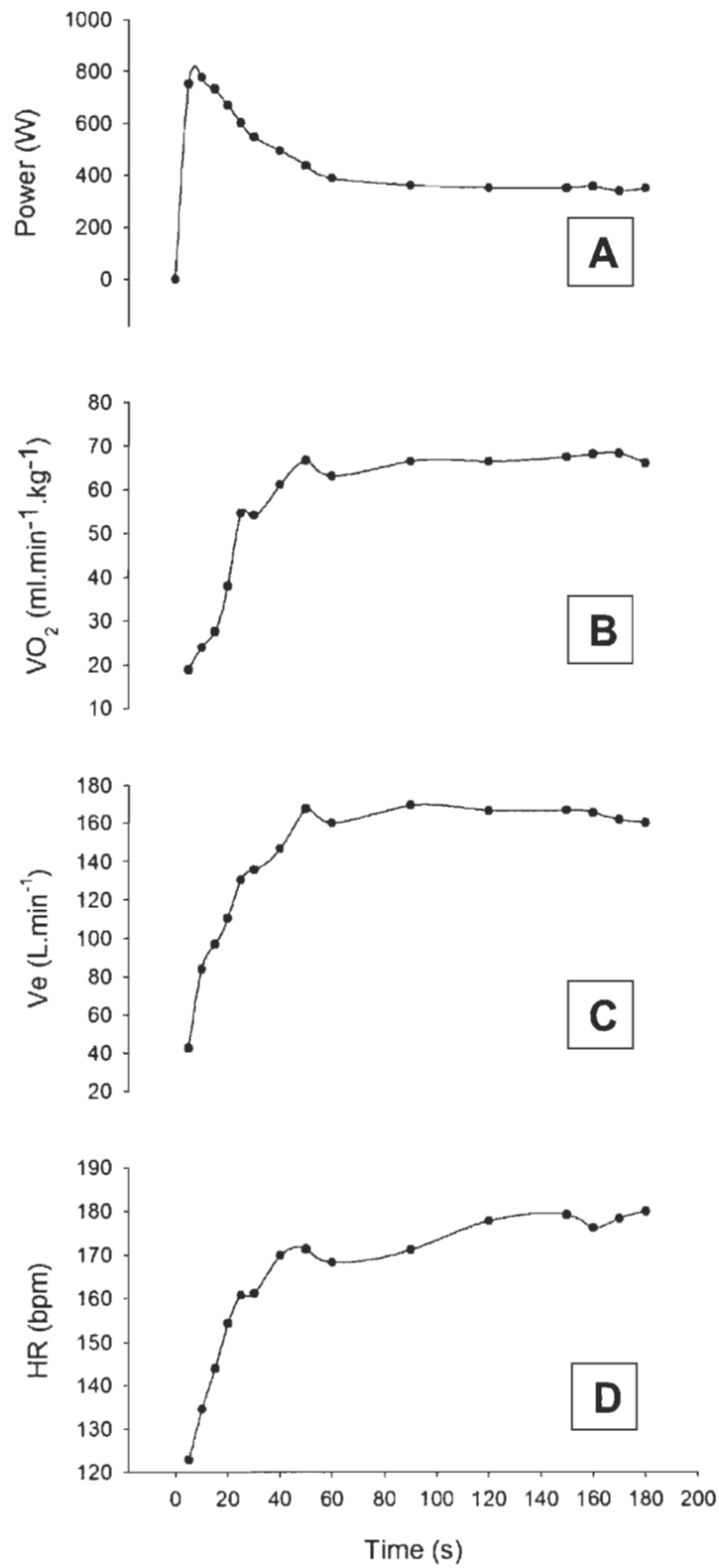
Correlations analysis between the variables measured by NIRS and the physiological variables during the 3 min all-out are shown in table 6.2. The analysis showed a strong negative correlation between  $\Delta\text{THb}$  and the deployed pedaling power ( $p = -0.99$ ,  $p < 0.001$ ). In addition, we observed that  $\Delta\text{THb}$  was strongly correlated with  $\dot{V}\text{O}_2$  ( $r = 0.92$ ,  $p < 0.001$ ) and HR, ( $r = 0.9$ ,  $p < 0.001$ ).

**Table 6.2.** Correlation between NIRS parameters with  $\dot{V}\text{O}_2$ , HR and pedaling power at 3-min all-out test.

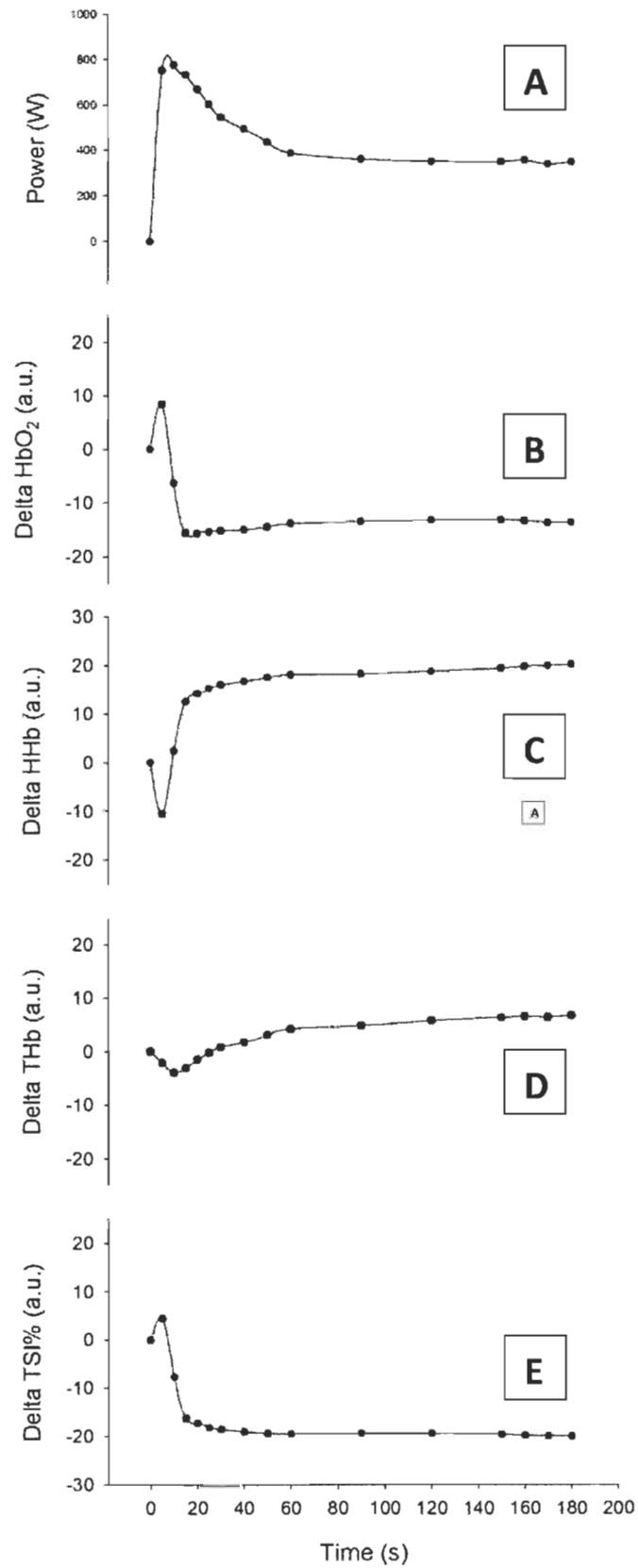
Variables	$\dot{V}\text{O}_2$	HR	$\Delta\text{HbO}_2$	$\Delta\text{HHb}$	$\Delta\text{THb}$	$\Delta\text{TSI}\%$
Power (W)	$r = -0,96$ $p < 0,001$	$r = -0,94$ $p < 0,001$	$r = 0,45$ $p = 0,1$	$r = -0,79$ $p < 0,001$	$r = -0,98$ $p < 0,001$	$r = 0,71$ $p < 0,01$
$\dot{V}\text{O}_2$ (ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )		$r = 0,98$ $p < 0,001$	$r = -0,59$ $p < 0,05$	$r = 0,87$ $p < 0,001$	$r = 0,92$ $p < 0,001$	$r = -0,8$ $p < 0,001$
HR (bpm)			$r = -0,68$ $p < 0,001$	$r = 0,93$ $p < 0,001$	$r = 0,91$ $p < 0,001$	$r = -0,87$ $p < 0,001$
$\Delta\text{HbO}_2$ (a.u.)				$r = -0,91$ $p < 0,001$	$r = -0,34$ $p = 0,21$	$r = 0,96$ $p < 0,001$
$\Delta\text{HHb}$ (a.u.)					$r = 0,73$ $p < 0,01$	$r = -0,99$ $p < 0,001$
$\Delta\text{THb}$ (a.u.)						$r = -0,62$ $p < 0,05$

$\dot{V}\text{O}_2$ : oxygen uptake, HR: heart rate, Power: power output,  $\Delta\text{HbO}_2$ : skeletal muscle oxyhemoglobin,  $\Delta\text{HHb}$ : skeletal muscle deoxyhemoglobin,  $\Delta\text{THb}$ : skeletal muscle total hemoglobin,  $\Delta\text{TSI}\%$ : skeletal muscle tissue saturation index.





**Figure 6.3.** Changes in A. Power output (Power), B. oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ), C. pulmonary ventilation ( $\dot{V}_e$ ), D.: heart rate (HR) during the 3-min all-out test (average results).



**Figure 6.4.** Changes in A. power output (Power), B. skeletal muscle oxyhemoglobin ( $\Delta\text{HbO}_2$ ), C. skeletal muscle deoxyhemoglobin ( $\Delta\text{HHb}$ ), D. skeletal muscle total hemoglobin ( $\Delta\text{THb}$ ) and E. skeletal muscle tissue saturation index ( $\Delta\text{TSI}\%$ ) during the 3-min all-out test (average results).

### 6.5.3. Peak MAP test measures vs. peak 3-min all-out test measures

Table 6.3 shows the results of the muscular peak oxygenation measured by NIRS during the MAP and the 3-min all-out regardless of the timing and the power output deployed during these tests. The analysis of these results allows knowing if the supra-maximal power recorded during the 3-min all-out test promote a greater blood flow and greater muscle oxygen extraction compared with the values recorded anytime during the MAP test. Indeed, despite the supra-maximal power deployed in the 3-min all-out test, none of the parameters measured by NIRS during this test could reach higher levels than what was recorded in the MAP test. However, these values were very close to those that were measured during the MAP test as we did not record any significant differences for three of the four measurement variables (HbO<sub>2</sub>, THb and TSI%). Only HHb was 8.83% higher ( $p < 0.01$ ) during the MAP test when compared to the 3-min all-out test.

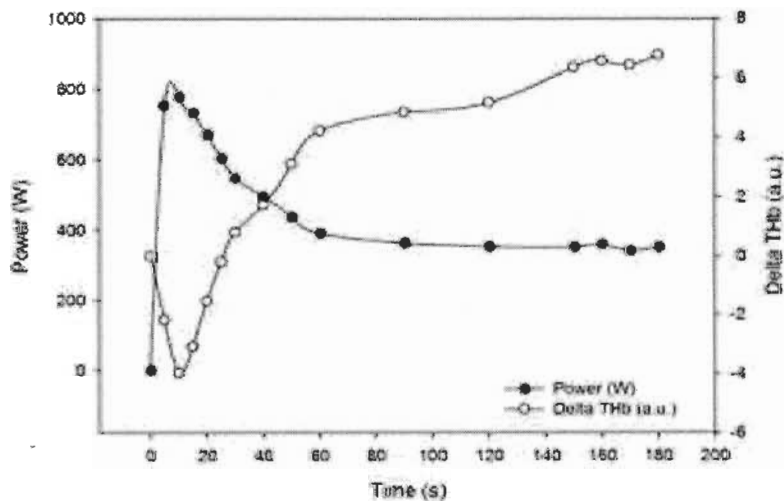
The  $\dot{V}O_{2peak}$  recorded during the two tests were not significantly different ( $p = 0.2$ ). The  $\dot{V}O_{2peak}$  observed during the 3-min all-out test was 96.57% ( $69.54 \pm 5.46 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) of the observed value during the MAP test ( $72.01 \pm 3.68 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Individual results showed that during the 3-min all-out test, two of the eight participants achieved a higher  $\dot{V}O_{2peak}$  than registered during the MAP test. Similarly, peak pulmonary ventilation and lactatemia were not significantly different between both tests ( $p > 0.05$ ). Individual results showed that during the 3-min all-out test, 4 of 8 participants were able to reach a higher [BLa] peak than registered during the MAP test (32.2, 19.85, 1.88 and 0.77%). Maximal heart rate response during the 3-min all-out test was significantly ( $p < 0.001$ ) lower (-6.35%) than that observed during the MAP test (table 6.3). Finally, the MAP recorded at the end of the MAP test was not significantly different from CP ( $p = 0.08$ ). The CP was equivalent to 93.63% of MAP and the difference was about 6.37%, corresponding to 23.9 W. Details of these results are presented in table 6.3.

**Table 6.3.** Peak physiological responses during the MAP test and the 3-min all-out tests.

Tests Variables	MAP test		3-min all-out test			P
	Mean	SD	Mean	SD	% PAM	
$\dot{V}O_{2peak}$ (ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	72,01	3,68	69,54	5,46	96,57%	0,20
[BLa] <sub>peak</sub> (mM)	13,68	1,81	13,41	3,79	98,03%	0,82
$V_{e_{peak}}$ (l. min <sup>-1</sup> )	173,96	19,56	177,22	22,39	101,88%	0,51
MAP vs CP (W) (N=6)	375,00	44,16	351,10	59,62	93,63%	0,08
HR <sub>peak</sub> (bpm)	192,88	8,92	180,63	6,05	93,65%	0,001**
$\Delta HbO_{2peak}$ (a.u.)	-16,532	8,915	-16,791	7,45	101,57%	0,90
$\Delta Hhb_{peak}$ (a.u.)	22,295	8,206	20,238	8,430	90,78%	0,01*
$\Delta THb_{peak}$ (a.u.)	7,439	6,983	7,161	5,984	96,27%	0,89
$\Delta TSI\%_{peak}$ (a.u.)	-22,213	16,170	-20,988	16,367	94,45%	0,08

$\dot{V}O_{2peak}$  : Peak oxygen uptake, [BLa] : Peak lactatemia,  $V_{e_{peak}}$  : Peak pulmonary ventilation, MAP : maximal aerobic power, CP : critical power, HR<sub>peak</sub> : Peak heart rate,  $\Delta HbO_{2peak}$  : Peak skeletal muscle oxyhemoglobin,  $\Delta Hhb_{peak}$  : Peak skeletal muscle deoxyhemoglobin,  $\Delta THb_{peak}$  : Peak skeletal muscle total hemoglobin and  $\Delta TSI\%_{peak}$  : Peak skeletal muscle tissue saturation index. (n = 8, values are Mean ± SD).

During the 3-min all-out, the variation of THb was inversely correlate (r = -0.98, p < 0.001) to the deployed pedaling power. Interestingly, we observed an opposite variation between these two parameters, the more the pedaling power increases, the more THb decreases and vice versa (figure 6.5).



**Figure 6.5.** Mean power output vs mean  $\Delta THb$  during the PC3. Power: power output (Watts) and  $\Delta THb$ : skeletal muscle total hemoglobin (n = 6).

Table 6.4 shows a relationship between the rank of relative MAP (MAP/kg) and the relative anaerobic work capacity (W'/kg) of each subject. Relative MAP and anaerobic work capacity were significantly correlated ( $r = 0.886$ ;  $p < 0.05$ ) in these athlete subjects.

**Table 6.4.** The individual results of MAP during MAP test and the anaerobic capacity during the test 3-min all-out test.

Tests		MAP test			3-min all-out test		
Subjects	Weight (kg)	MAP (W)	MAP/body Weight (W/kg)	rank	W' (J)	W'/body Weight (J/kg)	rank
1	64.50	340	5.27	5	13854	214.79	6
2	74.20	400	5.39	4	21755	293.19	3
3	66.20	370	5.59	3	16820	254.08	4
4	66.30	400	6.03	1	20096	303.11	1
5	76.60	430	5.61	2	22624	295.35	2
6	64.50	310	4.81	6	14695	227.83	5
Mean	68.72	375.00	5.45	-	18307.33	264.73	-
SD	5.29	44.16	0.41	-	3709.79	37.92	-

MAP: maximal aerobic power output, W': anaerobic capacity. (n = 6, values are Mean  $\pm$  SD).

#### 6.5.4. NIRS response at $\dot{V}O_{2peak}$

Oxygenation parameter values measured by NIRS in the *vastus lateralis* muscle were similar at the  $\dot{V}O_{2peak}$  during the two tests. Results analysis showed that for three of the four parameters measured (HbO<sub>2</sub>, THb, TSI %) there was no significant difference ( $p = 0.17, 0.9, 0.57$ , respectively), only the HHb was significantly lower during the 3-min all-out test ( $p < 0.01$ ). Details of these results are presented in table 6.5.

**Table 6.5.** NIRS variables at  $\dot{V}O_{2peak}$  during the MAP test and the 3-min all-out tests.

Tests Variables	MAP test		3-min all-out test			P
	Mean	SD	Mean	SD	% MAP	
$\Delta HbO_2$ (a.u.)	-16.460	9.023	-13.948	6.405	84.74%	0.17
$\Delta HHb$ (a.u.)	22.071	8.349	19.995	8.544	90.59%	<0.01*
$\Delta THb$ (a.u.)	6.379	7.421	6.047	6.433	94.79%	0.9
$\Delta TSI\%$ (a.u.)	-20.808	17.805	-19.995	16.898	96.09%	0.57

$\Delta HbO_2$ : skeletal muscle oxyhemoglobin,  $\Delta HHb$ : skeletal muscle deoxyhemoglobin,  $\Delta THb$ : skeletal muscle total hemoglobin and  $\Delta TSI\%$ : skeletal muscle tissue saturation index. (n = 8, values are Mean  $\pm$  SD).

## 6.6. Discussion

In this study, our aim was to analyze the peripheral physiological changes such as variation in oxygenation and blood flow in the vastus lateralis muscle during a 3-min all-out test using the NIRS technique. To the best of our knowledge, this problem has not been tackled in the literature. This study verified whether the vastus lateralis muscle was able to extract more oxygen and to mobilize a greater blood flow during supra-max dynamic efforts in comparison to what was observed during the MAP test. The results of this comparison showed that despite the supra-maximal power deployed during the 3-min all-out test, the vastus lateralis muscle has never been able to extract more oxygen or mobilize greater blood flow compared to what was recorded during the MAP test. Although the peak values recorded by NIRS during the 3-min all-out test remained slightly lower compared to those recorded in the MAP test, there was no significant difference between the two tests for HbO<sub>2</sub>, THb and the TSI% ( $p = 0.9$ ,  $p = 0.89$ ,  $p = 0.08$ , respectively). Only HHb was significantly lower in the 3-min all-out test ( $p = 0.01$ ). Since it was demonstrated that the RPM variation has no effect on the extraction of O<sub>2</sub> from the vastus lateralis muscle (Ferreira et al., 2006), the inter-individual difference in the pedaling frequency (RPM) during the two tests cannot be the reason for this difference. We can speculate that the powerful muscle contractions during the initial phase of the test might have attenuated the muscular blood flow by a squeezing effect of the active muscle on the vessels. It has been shown that blood flow in the muscle is inhibited during a static contraction when the developed force exceeds a specific threshold for each muscle. Typically this threshold is between 15 and 30% of maximal voluntary force (Sheriff, 2010). The high compression exerted by the muscle during explosive start increases the pressure inside the veins of the muscle which makes the distribution of blood inside more difficult and facilitates venous return to the heart (Lutjemeier et al., 2005; Sheriff, 2010). This hypothesis is also supported by the

relation that has been observed between the variations of THb and the power deployed by the skeletal muscle during 3-min all-out test. This relation showed that the higher the pedaling power, the lower the THb and vice versa. The study of correlation between these two parameters showed the existence of a strong negative correlation ( $r = -0.98$ ,  $p < 0.001$ ).

In contrast to the 3-min all-out test recorded results, the correlation between pedaling power and THb during MAP test proved to be positive and significant ( $r = 0.98$ ,  $p < 0.001$ ). This can be explained by the low pedaling power during MAP test (MAP equal to 44.31% of the  $P_{\text{peak}}$  recorded during the 3-min all-out test). The force developed at MAP test was probably less than the specific compression threshold of the vastus lateralis muscle.

During the 3-min all-out test,  $\text{HbO}_2$ , HHb and the TSI% parameters achieved almost their maximum level 20s after the start of the test after which they remain stable until the end (figure 6.2). However, during the MAP test, the variation of these parameters was linear and progressive and then they reach their maximum level at  $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ . The differences in the kinetic variables of NIRS are probably related to differences in the recruitment of motor units during the two tests. Indeed, it is generally admitted that during incremental exercise with increasing load, the slow twitch motor units are initially set for their lower activation thresholds. However at very high workloads and in addition to slow contraction muscle fibers, fast contraction motor units are recruited to support the pace of work (Miura et al., 2000; Skinner et McLellan, 1980). Mobilization of a greater muscular mass may result in a greater increase in intramuscular pressure that exceeds the intravascular pressure, which reduces blood flow inside the skeletal muscle (Bhambhani et al., 2010).

The analysis of NIRS data at  $\dot{V}\text{O}_{2\text{peak}}$  revealed that there was no significant difference for  $\text{HbO}_2$ , THb and TSI% between the two tests. These results are in

concordance with the cardiorespiratory measures where differences were not significant as well ( $\dot{V}O_{2max}$  of MAP test vs  $\dot{V}O_{2peak}$  of 3-min all-out test). However, HHb was significantly lower during the 3-min all-out test ( $p < 0.01$ ) and this is probably linked to the slight differences in  $\dot{V}O_{2peaks}$  recorded during the two tests (3.43%). These results are in line with cardiorespiratory measures such as  $\dot{V}O_{2peak}$ , ventilation peak and lactate peak that were in turn similar to MAP and 3-min all-out tests ( $p = 0.20$ ,  $p = 0.51$ ,  $p = 0.82$ , respectively). Indeed, during the 3-min all-out tests,  $\dot{V}O_2$  reached 95% of its peak at  $53.33 \pm 8.16$  seconds after the start of the test. The  $\dot{V}O_{2peak}$  was reached at  $147.5 \pm 36.6s$  and was equivalent to 96.57% of  $\dot{V}O_{2max}$  obtained during the MAP test that is a difference of 3.43%. Similar results were recorded in previous studies where the differences of  $\dot{V}O_{2peak}$  between the incremental test and the 3-min all-out test ranged from 1 to 3% (Burnley et al., 2006; Francis et al., 2010; Sperlich et al., 2011; Vanhatalo et al., 2008 (a, b)). However, Sperlich et al. (2011) pointed out that those similarities in  $\dot{V}O_{2peak}$  between the ramp test and the 3-min all-out test are not sufficient to confirm the achievement of  $\dot{V}O_{2max}$ . They conclude that while the differences between  $\dot{V}O_{2peaks}$  are non-significant ( $p = 0,29$ ) and while  $\dot{V}O_{2peaks}$  in the two tests are highly correlated ( $r = 0.60$ ,  $p = 0.006$ ), the 3-min all-out test cannot be considered as an effective means of  $\dot{V}O_{2max}$  evaluation as they recorded a large inter individual variability in  $\dot{V}O_{2peak}$  between the two tests (1057 to 1312 ml.min<sup>-1</sup>). In our study, contrary to the results of Sperlich et al. (2011) inter individual differences in  $\dot{V}O_{2peak}$  were much lower (137 to 649 ml.min<sup>-1</sup>). This is probably related to high physical level of our cyclists compared to those from the study of Sperlich.

In their study, Francis and al. (2010) had to evaluate competitive road cyclists who performed MAP test and 3-min all-out test and found that the time to reach  $\dot{V}O_{2peak}$  during the 3-min all-out test was shorter ( $128 \pm 41s$  vs.  $147.5 \pm 36.6s$  in our study). Also, the CP of their study was lower ( $273 \pm 52 W$  vs.  $351.1 \pm 60.95 W$  in our research).



Similarly, the pedaling power in the lactic threshold was lower (76% of the CP) whereas it was equivalent to 81.6% of the CP in our study. These variances are probably due to the difference in aerobic fitness of athletes between the two studies (72.01 vs 60.3 ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>, respectively for our's and Francis study).

The analysis of power output showed that during a sitting explosive start of the 3-min all-out test, the peak power deployed was 2.28 times the MAP ( $P_{pic} = 846.3 \pm 175.4$  W). It is important to mention that the subjects were not allowed to stand up to sprint in order to avoid the technical aspects that could be advantageous to some subjects rather than others. Consequently, an average peak power of 846.3 W could be considered low. Unpublished data of the same subjects showed power values up to 1300 W when they were allowed to stand during a sprint outside on the road. During this test, the anaerobic capacity (W') was equal to  $18.307 \pm 3.71$  KJ. The evaluation of these parameters provided accurate information about the power and capacity of the anaerobic metabolism which are components that have to be considered when preparing the training plan. Indeed, it has been shown in the study of McClave et al. (2011) that there was a significant correlation between the  $P_{peak}$  (obtained during a 3-min all-out test) and the time limit performance at CP ( $r = 0.57$ ). Similarly, there was an important correlation between the difference between the  $P_{peak}$  and the CP (obtained during a 3-min all-out test) and the time limit performance at CP ( $r = 0.65$ ). This suggest that the 3-min all-out test can be a good way to predict the performance for cyclists. In our study, the high correlation between the MAP/body Weight and W'/body Weight ( $r = 0.886$ ,  $p < 0.05$ ) support the idea of McClave et al. which presents the 3-min all-out test as a reliable tool for the performance prediction.

The CP in the 3-min all-out test was not significantly different from the MAP test ( $p = 0.08$ ). The CP slightly underestimates MAP of 6.37%, which is equivalent to 23.9 watts, which should be considered when planning the training. This was also the case in

the study of Francis et al. (2010), where the CP was equivalent to 95% of the MAP and the difference was equal to 14.4 watts. In practical terms, the CP can be considered as a reliable means for predicting cyclists' endurance performances, since it has been shown that the CP obtained during a 3-min all-out test was significantly correlated with the performance in several studies (Black et al., 2013; McClave et al., 2011).

In our study,  $HR_{peak}$  reached during the 3-min all-out test was equal to  $180.63 \pm 6.05$  bpm, that is 93.65% of max HR, which was significantly lower than the one reached in the MAP test ( $p < 0.001$ ). This is one of the limitations of the 3-min all-out test since it does not allow sufficient time to achieve  $HR_{max}$ . Unfortunately, we couldn't compare our results to the other studies, since no information has been indicated in the literature about  $HR_{max}$  during 3-min all-out test (Burnley et al., 2006; Francis et al., 2010; Johnson et al., 2011; Vanhatalo et al., 2008 (a,b); Vanhatalo et al., 2007).

### *Limitations*

During the 3-min all-out test heart rate didn't reach maximal value, which can disable the use of heart rate monitoring for exercise prescription in this context. Finally, the small number of subjects ( $n = 8$ ) was a limit of this study. Since world-class elite athletes were difficult to recruit ( $n = 6$ ), we added two more subjects from road cycling ( $n = 2$ ) to increase the total number of participants.

## **6.7. Conclusion**

Despite the supra-max power deployed during the 3-min all-out test, the vastus lateralis muscle was unable to extract more oxygen or to mobilize greater blood flow compared to a conventional MAP test. During the 3-min all-out test, we observed an inverse relationship between the pedaling power deployed and distribution of blood within the skeletal muscle variation.

The results of this study suggest that, in the elite mountain bikers, a valid measure of  $\dot{V}O_{2peak}$  can be reached during a 3-min all-out test. The similarity of the

cardiovascular and muscular parameters recorded during the two tests of the study shows the effectiveness of the 3-min all-out test as an assessment of aerobic power components essential for the training plan and also as a way for assessing the power and the anaerobic capacity in elite mountain bike cyclists.

The 3-min all-out test is at the same time a reliable way of assessment, practical, accessible, and allowing to save time and money for athletes and coaches.

### **6.8. Competing interests**

The authors declare that they have no competing interests.

### **6.9. Authors' contributions**

Hatem Ziadia participated in study design, experimentation, data analysis and manuscript writing. Dr Claude Lajoie, Dr Vincent Cantin and Dr Louis Laurencelle helped in the study design, experimentation and data analysis. All authors read and approved the final manuscript.

## 6.10. References

- American College of Sports Medicine (2001). Guidelines for exercise testing and prescription. *Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, PA*.
- Astrand, P. O., Astrand, I. (1958). Heart rate during muscular work in man exposed to prolonged hypoxia. *Journal of Applied Physiology*, 13(1), 80-75.
- Belardinelli, R., Barstow, T. J., Porszasz, J., Wasserman, K. (1995). Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 70, 487-492.
- Bhambhani, Y. N., Kennedy, M. D., Maikala R. V. (2010). Cardiorespiratory and vastus lateralis oxygenation-blood volume responses during incremental and modified Wingate tests. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 197-205.
- Bhambhani, Y., Buckley, S., Susaki, T. (1999). Muscle oxygenation trends during constant work rate cycle exercise in men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(1), 90-98
- Bhambhani, Y., Buckley, S., Susaki, T. (1997). Detection of ventilatory threshold using near infrared spectroscopy in men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29, 402-409.
- Black, M. I., Durant, J., Jones, A. M. and Vanhatalo, A. (2013). Critical power derived from a 3-min all-out test predicts 16.1-km road time-trial performance. *European Journal of Sport Science*, 14(3), 217-223.
- Burnley, M. (2006). A 3-min All-Out Test to Determine Peak Oxygen Uptake and the Maximal Steady State. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(11), 1995-2003.
- Cane, J., Seidman, B., Sowash, J., Otto, R. M. (1996). A Comparison of the Computrainer Load Simulator and Traditional Cycle Ergometry 1239. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(5), 208.
- Chance B., Dait, M. T., Zhang, C., Hamaoka, T., Hagerman, F. (1992). Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *American Journal of Physiology*, 262, C766-C775.
- Constantini, K., Sabapathy, S., Cross, T. J. (2014). A single session testing protocol to determine critical power and W'. *European Journal of Applied Physiology*, 114, 1153-1161.
- Dupouy, C., Dussault, C., Kahn, J. F., Tinetti E., Avriillierm S., Ollivierm J.P., Jouaninm J.C. (2007). Evaluation of vastuslateralis oxygenation during incremental exercise using near infrared spectroscopy of haemoglobin. *Science and Sports*, 22(2), 97-103.
- Ferreira, L. F., Lutjemeier, B. J., Townsend, D. K., Barstow, T. J. (2006). Effects of pedal frequency on estimated muscle microvascular O<sub>2</sub> extraction. *European Journal of*

*Applied Physiology*, 96, 558–563.

Flandrois, R. (1988). L'adaptation cardo-respiratoire à l'exercice chez l'enfant. *Science et motricité*, 6, 39-45.

Francis, J. R., James, T., Quinn, T. J., Amann, M., Laroche, D. P. (2010). Defining Intensity domains from the end power of a 3-min All-out cycling test. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(9), 1769–1775.

Grassi, B., Quaresima, V., Marconi, C., Ferrari, M., Cerretelli, P. (1999). Blood lactate accumulation and muscle deoxygenation during incremental exercise. *Journal of Applied Physiology*, 87, 348-355.

Johnson, T. M., Sexton, P. J., Placek, A. M., Murray, S. R., Pettitt, R. W. (2011). Reliability analysis of the 3-min all-out exercise test for cycle ergometry. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(12), 2375–2380.

Kawaguchi, K., Hayashi, Y., Sekikawa, K., Tabusadani, M., Inamizu, T., Onari, K., Bhambhani, Y. (2006). Vastuslateralis oxygenation during prolonged cycling in healthy males. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31, 48-55.

Kawaguchi, K., Tabusadani, M., Sekikawa, Y., Hayashi, Y., Onari, K. (2001). Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake? *European Journal of Applied Physiology*, 84, 158-161.

Laursen, P. B., Jenkins, D. G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 32(1), 53-73.

Legrand, R., Marles, A., Prieur, F., Lazzari, S., Blondel, N., Mucci, P. (2007). Related trends in locomotor and respiratory muscle oxygenation during exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, 91-100.

Lutjemeier, B. J., Miura, A., Scheuermann, B. W., Koga, S., Townsend, D. K., Barstow T. J. (2005). Muscle contraction–blood flow interactions during upright knee extension exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 98, 1575-1583.

McClave, S. A., LeBlanc, M., and Hawkins, S. A. (2011). Sustainability of critical power determined by a 3-minute all-out test in elite cyclists. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(11), 3093-3098.

Miura, H., Araki, H., Matoba, H., Kitagawa, K. (2000). Relationship among oxygenation, myoelectric activity, and lactic acid accumulation in vastuslateralis muscle during exercise with constant work rate. *International Journal of Sports Medicine*, 21, 180-184.

Moritani, T., Nagata, A., Devries, H. A., Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24(5), 339-350.

Rowell, L. B. (1974). Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. *Physiological Reviews*, 54, 75-159.

- Sheriff, D. D. (2010). Role of mechanical factors in governing muscle blood flow. *Acta Physiologica*, 199, 385-91.
- Skinner, J. S., McLellan, T. H. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51, 234-248.
- Sperlich, B., Haegele, M., Thissen, A., Mester, J., Holmberg, H. C. (2011). Are peak oxygen uptake and power output at maximal lactate steady state obtained from a 3-min all-out cycle test? *International Journal of Sports Medicine*, 32, 433-437.
- Vanhatalo, A., Doust, J.H., Burnley, M. (2008, a). A 3-min all-out cycling test is sensitive to a change in critical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(9), 1693-1699.
- Vanhatalo, A., Jones, A. M. (2008, b). Influence of prior sprint exercise on the parameters of the "all-out critical power test" in men. *Experimental Physiology*, 94(2), 255-263.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., and Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), 548-555.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., Burnley, M. (2007). Robustness of a 3min all-out cycling test to manipulations of power profile and cadence in humans. *Experimental Physiology*, 93(3), 383-390.
- Westgarth-Taylor, C., Hawley, J. A., Richard, S., Myburgh, K. H., Noakes, T. D., Dennis, S. C., (1997). Metabolic and performance adaptations to interval training in endurance-trained cyclists". *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 75(4), 298-304.
- Weston, A. R., Myburgh, K. H., Lindsay, F. H., Dennis, S. C., Noakes, T. D., Hawley, J. A. (1997). Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity interval training by well-trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 75(1), 7-13.

## CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de découvrir que malgré les puissances supra-max déployées lors d'un test PC3, le muscle vaste latéral n'est pas en mesure d'extraire plus d'oxygène ni de mobiliser un plus grand débit sanguin par rapport à ce qui est observé durant un test de puissance maximale aérobie.

Lors du test de PC3, on a pu enregistrer une variation inversée entre la puissance de pédalage déployée et la diffusion du sang à l'intérieur du muscle squelettique.

Les résultats de cette étude suggèrent que chez des vététistes élités en vélo de montagne, une mesure valide du  $\dot{V}O_{2pic}$  peut être atteinte lors d'un test PC3. La similitude des paramètres cardiovasculaires et musculaires enregistré lors des deux tests de l'étude témoigne de l'efficacité du test PC3 comme moyen d'évaluation des composantes aérobie indispensables à la planification de l'entraînement mais aussi comme moyen d'appréciation de la puissance et de la capacité anaérobie chez des vététistes élités en vélo de montagne.

Le test PC3 n'a pas pu amener la FC à son maximum ce qui constitue une des limite de ce test. La  $FC_{pic}$  enregistrée lors du test PC3 ne peut pas être considérée comme un moyen fiable pour le dosage de la charge d'entraînement et la prescription des exercices.

Le test PC3 constitue ainsi un moyen d'évaluation fiable capable d'évaluer la capacité du système anaérobie et la puissance du système aérobie. Le test PC3 est un test pratique, accessible aux athlètes et aux entraîneurs puisqu'il peut être exécuté sur le terrain et ainsi permet d'éviter de multiples visites onéreuses en laboratoire.

## RÉFÉRENCES GÉNÉRALES

- American College of Sports Medicine (2001). Guidelines for exercise testing and prescription. *Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, PA*.
- Andersen, P. (1975). Capillary density in skeletal muscle of man. *Acta Physiologica Scandinavica*, 95, 203-5.
- Andersen, P. et Saltin, B. (1985). Maximal perfusion of skeletal muscle in man. *The Journal of Physiology*, 366, 233-249.
- Astrand, P. O. et Saltin, B. (1961). Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *Journal of Applied Physiology*, 16, 977-981.
- Astrand, P. O. et Astrand, I. (1958). Heart rate during muscular work in man exposed to prolonged hypoxia. *Journal of Applied Physiology*, 13(1), 80-75.
- Beaver, W. L., Wasserman, K. et Whipp, B. J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology*, 60, 2020-2027.
- Belardinelli, R., Barstow, T. J., Porszasz, J. et Wasserman, K. (1995). Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 70, 487-492.
- Bentley, D. J., Wilson, G. J., Davie, A. J. et Zhou, S. (1998). Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 38(3), 201-207.
- Bhambhani, Y. N., Kennedy, M. D. et Maikala R. V. (2010). Cardiorespiratory and vastuslateralis oxygenation-blood volume responses during incremental and modified Wingate tests. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 197-205.
- Bhambhani, Y. N. (2004). Muscle oxygenation trends during dynamic exercise measured by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 29, 504-523.
- Bhambhani, Y., Buckley, S. et Susaki, T. (1999). Muscle oxygenation trends during constant work rate cycle exercise in men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(1), 90-98.
- Bhambhani, Y., Buckley, S. et Susaki, T. (1997). Detection of ventilatory threshold using near infrared spectroscopy in men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29, 402-409.
- Black, M. I., Durant, J., Jones, A. M. et Vanhatalo, A. (2013). Critical power derived from a 3-min all-out test predicts 16.1-km road time-trial performance. *European Journal of Sport Science*. 14(3): 217-223.
- Brodal, P., Ingjer, F. et Hermansen, L. (1977). Capillary supply of skeletal muscle fibers in untrained and endurance-trained men. *American Journal of Physiology*, 232, H705-H712.



- Burnley, M. (2006). A 3-min all-out test to determine peak oxygen uptake and the maximal steady state. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(11), 1995-2003.
- Cane, J., Seidman, B., Sowash, J. et Otto, R. M. (1996). A comparison of the computrainer load simulator and traditional cycle ergometry 1239. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(5), 208.
- Chance, B., Dait, M. T., Zhang, C., Hamaoka, T. et Hagerman, F. (1992). Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *American Journal of Physiology*, 262, C766-C775.
- Constantini, K., Sabapathy, S. et Cross, T. J. (2014). A single-session testing protocol to determine critical power and  $W'$ . *European Journal of Applied Physiology*, 114, 1153-1161.
- Coyle, E., Feltner, M., Kautz, S., Hamilton, M., Montain, S., Baylor, A. et Petrek, G. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(1), 93-107.
- Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hopper, M. et Walters, T. J. (1988). Determinants of endurance in well-trained cyclists. *Journal of Applied Physiology*, 64(6), 2622-2630.
- David, J. A. (1985). Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17, 6-18.
- Dufresne, P. (2012). Effet d'un programme d'entraînement fractionné à haute intensité sur la réponse physiologique cardiaque et musculaire chez des cyclistes. *Maîtrise en sciences de l'activité physique (3407) UQTR*.
- Dupouy, C., Dussault, C., Kahn, J. F., Tinet, E., Avrillier, S., Ollivier, J. P. et Jouanin, J. C. (2007). Evaluation of vastus lateralis oxygenation during incremental exercise using near infrared spectroscopy of haemoglobin. *Science and Sports*, 22(2), 97-103.
- Faria, E. W., Parker, D. L. et Faria, I. E. (2005a). The science of cycling. *Sports Medicine*, 35(4), 285-312.
- Faria, E. W., Parker, D. L. et Fria, I. E. (2005b). The science of cycling: factors affecting performance. Part 2. *Sports Medicine*, 35(4), 313-337.
- Ferreira L. F., Lutjemeier B. J., Townsend D. K. et Barstow T. J. (2006). Effects of pedal frequency on estimated muscle microvascular O<sub>2</sub> extraction. *European Journal of Applied Physiology*, 96, 558–563.
- Flandrois, R. (1988). L'adaptation cardo-respiratoire à l'exercice chez l'enfant. *Science et motricité*, 6, 39-45.
- Francis, J. R., James, T., Quinn, T. J., Amann, M. et Laroche, D. P. (2010). Defining intensity domains from the end power of a 3-min all-out cycling test. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(9), 1769–1775.
- Gastin, P. B., Costill, D. L., Lawson, D. L., Krzeminski, K. et McConell, G. K. (1995). Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27(2), 255-263.

- Grassi, B., Pogliaghi, S. et Rampichini, S. (2003). Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on transitions in humans. *Journal of Applied Physiology*, 95,149-58.
- Grassi, B., Quaresima, V., Marconi, C., Ferrari, M. et Cerretelli, P. (1999). Blood lactate accumulation and muscle deoxygenation during incremental exercise. *Journal of Applied Physiology*, 87, 348-355.
- Gregory, J., Johns, D. P. et Walls, J. T. (2007). Relative vs. absolute physiological measures as predictors of mountain bike cross-country race performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(1), 17-22.
- Hill, A. V. et Lupton, H. (1924). Muscular activity, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Quarterly Journal of Medicine*, 16,135-171.
- Hoppeler, H. et Kayar, S. R. (1988). Capillarity and oxidative capacity of muscles. *NIPS*, 3, 113-6.
- Impellizzeri, F. M. et Marcora, S. M., (2007). The physiology of mountain biking. *Sports Medicine*, 37(1), 59-71.
- Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Sassi, A., Mognoni, P. et Marcora, S. (2005). Physiological correlates to off-road cycling performance. *Journal of Sports Sciences*, 23(1), 41-47.
- Johnson, T. M., Sexton, P. J., Placek, A. M., Murray, S. R. et Pettitt, R. W. (2011). Reliability analysis of the 3-min all-out exercise test for cycle ergometry. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 43(12), 2375–2380.
- Joyner, M. J. et Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *The Journal of Physiology*, 586(1), 35-44.
- Kawaguchi, K., Hayashi, Y., Sekikawa, K., Tabusadani, M., Inamizu, T., Onari, K. et Bhambhani, Y. (2006). Vastus lateralis oxygenation during prolonged cycling in healthy males. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31, 48-55.
- Kawaguchi, K., Tabusadani, M., Sekikawa, Y., Hayashi, Y. et Onari, K. (2001). Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake? *European Journal of Applied Physiology*, 84, 158-161.
- Laursen, P. B. et Jenkins, D. G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 32(1), 53-73.
- Lee, H., Martin, D. T., Anson, J. M. et Grundy, D. (2002). Physiological characteristics of successful mountain bikers and professional road cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 20(12), 1001-1008.
- Legrand, R., Marles, A., Prieur, F., Lazzari, S., Blondel, N. et Mucci, P. (2007). Related trends in locomotor and respiratory muscle oxygenation during exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, 91-100.
- Lutjemeier, B.J., Miura, A., Scheuermann, B. W., Koga, S., Townsend, D. K. et Barstow, T. J. (2005). "Muscle contraction–blood flow interactions during upright knee extension exercise in humans". *Journal of Applied Physiology*, 98, 1575-1583.

- Maikala, R. V. (2010). Modified Beer's Law – historical perspectives and relevance in near-infrared monitoring of optical properties of human tissue. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 125-134.
- Mancini, D. M., Bolinger, L., Li, H., Kendrick, K., Chance, B. et Wilson, J. R. (1994). Validation of near-infrared spectroscopy in humans. *Journal of Applied Physiology*, 77, 2740-2747.
- McClave, S. A., LeBlanc, M., et Hawkins, S. A. (2011). Sustainability of critical power determined by a 3-minute all-out test in elite cyclists. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(11), 3093-3098.
- Miura, H., Araki, H., Matoba, H. et Kitagawa, K. (2000). Relationship among oxygenation, myoelectric activity, and lactic acid accumulation in vastus lateralis muscle during exercise with constant work rate. *International Journal of Sports Medicine*, 21, 180-184.
- Moritani, T., Nagata, A., Devries, H. A. et Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24(5), 339-350.
- Noordhof, D. A., Skiba, P. F. et de Koning, J. J. (2013). Determining anaerobic capacity in sporting activities. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(5), 475-482.
- Padilla, S. Mujika, I. et Cuesta, G. (1999). Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(6), 878-885.
- Perrey, S., Thedon, T. et Rupp, T. (2010). NIRS in ergonomics: its application in industry for promotion of health and human performance at work. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 185-189.
- Rasmussen, P., Overgaard, A., Bjerre, A. F., Bjarrum, M., Carlsson, C., Petersen, N., Nielsen, H. B., Volianitis, S., Gjedde, A. et Secher, N. H. (2010). The effects of normoxia, hypoxia, and hyperoxia on cerebral haemoglobin saturation using near infrared spectroscopy during maximal exercise. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 190-196.
- Richter, E. A. (1996). Glucose utilization. In *Handbook of Physiology. Section 12. Exercise regulation and integration of multiple systems*. Edited by L.B. Rowell and J.T. Shephard. Oxford University Press, 912-951.
- Rowell, L. B. (1974). Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. *Physiological Reviews*, 54, 75-159.
- Saltin, B. et Gollnick, P. (1983). Skeletal muscle adaptability: significance for metabolism and performance. *Handbook of Physiology: Skeletal Muscle*. 555-631.
- Sheriff, D. D. (2010). Role of mechanical factors in governing muscle blood flow. *Acta Physiologica*, 199, 385-391.
- Skinner, J. S. et McLellan, T. H. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51, 234-248.

- Sperlich, B., Haegele, M., Thissen, A., Mester, J. et Holmberg, H. C. (2011). Are peak oxygen uptake and power output at maximal lactate steady state obtained from a 3-min all-out cycle test? *International Journal of Sports Medicine*, 32, 433-437.
- Stepto, N. K., Hawley, J. A., Dennis, S. C. et Hopkins, W. G. (1999). Effects of different interval-training programs on cycling time-trial performance. *Physical Fitness And Performance*, 31(5), 736-741.
- Stringer, W., Wasserman, K., Casaburi, R., Porszasz, J., Maehara, K. et French, W. (1994). Lactic acidosis as a facilitator of oxyhemoglobin during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 76, 1462-1467.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H. et Burnley, M. (2008 a). A 3-min all-out cycling test is sensitive to a change in critical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(9), 1693-1699.
- Vanhatalo, A. et Jones, A. M. (2008 b). Influence of prior sprint exercise on the parameters of the all-out critical power test" in men. *Experimental Physiology*, 94(2), 255-263.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H. et Burnley, M. (2007). Robustness of a 3min all-out cycling test to manipulations of power profile and cadence in humans. *Experimental Physiology*, 93(3), 383-390.
- Vock, R., Weibel, E. R., Hoppeler, H., Ordway, G., Weber, J-M. et Taylor, C. R. (1996). Design of the oxygen and substrate pathways. V. Structural basis of vascular substrate supply to muscle cells. *The Journal of Experimental Biology*, 199, 1675-1688.
- Wasserman, K., Hansen, J. E. et Sue, D. I. (1991). Facilitation of oxygen consumption by lactic acidosis during exercise. *NIPS*, 6, 29-34.
- Westgarth-Taylor, C., Hawley, J. A., Richard, S., Myburgh, K. H., Noakes, T. D. et Dennis, S. C., (1997). Metabolic and performance adaptations to interval training in endurance-trained cyclists". *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 75(4), 298-304.
- Weston, A. R., Myburgh, K. H. et Lindsay, F. H. (1997). Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity interval training by well-trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 75(1), 7-13.
- Wilmore, J. H. et Costill, D. L. (2002). *Physiologie du sport et de l'exercice*. Edition De Boeck Université.
- Williams, C. A., Ratel, S. et Armstrong, N. (2005). Achievement of peak  $\dot{V}O_2$  during a 90-s maximal intensity cycle sprint in adolescents. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30, 157-171.

**Image figure 2 :** [http://lookfordiagnosis.com/mesh\\_info.php?term=Spectroscopie+Proche+Infrarouge&lang=4](http://lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=Spectroscopie+Proche+Infrarouge&lang=4)

**Image figure 3 :** <http://www.artinis.com/product/introduction>

# ANNEXE

## ANNEXE 1 LETTRE D'INFORMATION

---

### **Évaluation des variables physiologiques limitatives à la performance pour la prescription de l'exercice en cyclisme.**

**Hatem ZIADIA.**

**Département de sciences de l'activité physique. Laboratoire de physiologie de l'exercice de l'UQTR.**

Votre participation à la recherche, qui vise l'évaluation des variables physiologiques limitatives à la performance pour la prescription de l'exercice en cyclisme serait grandement appréciée.

#### **Objectifs**

L'objectif de cette étude est de tenter de caractériser l'évolution de l'oxygénation et du débit sanguin du muscle squelettique par rapport à son activité myoélectrique (EMG) maximale en utilisant différents tests d'effort (5) qui varient en modes et en intensités.

#### **Tâche**

Dans ce projet de recherche vous aurez pour tâche l'exécution de cinq tests d'évaluation physique. Un test de force maximale (1RM) pour établir la valeur 100% de l'activité musculaire du vaste latéral et sa capacité d'oxygénation (EMG et NIRS), un test d'endurance musculaire isolé pour connaître l'effet de la fatigue musculaire, un test de puissance maximale aérobie et deux tests d'effort maximal d'une durée de 3 minutes, l'un en laboratoire et l'autre 3 semaines après un camp d'entraînement sur le terrain pour apprécier les adaptations physiologiques.

#### **Risques, inconvénients, inconforts**

Il est peu probable que des problèmes physiques ou des déstabilisations psychologiques puissent survenir au cours de cette étude. Bien au contraire, tous les participants sont habitués de travailler à des intensités de travail similaire en plus d'être sous la supervision des membres de l'équipe de recherche qui sont accrédités en RCR. Par contre, malgré le fait que des risques sont peu probables, on ne peut nier qu'ils sont possibles. Les

principaux étant liés au développement ou l'aggravation de blessures et l'épuisement physique.

### **Bénéfices**

Les participants pourraient bénéficier de certains avantages physiques. Notamment, de connaître leurs aptitudes physiques et de leur performance en cyclisme. Des recommandations individuelles pour l'entraînement seront accompagnées au rapport final remis au participant.

### **Confidentialité**

Les données recueillies au cours de cette étude sont entièrement confidentielles et ne pourront en aucun cas mener à votre identification. La confidentialité de votre dossier sera assurée par un code numérique qui remplacera ton nom. Les résultats de la recherche seront diffusés sous forme d'articles et/ou thèse et/ou communications, mais ne permettront pas d'identifier les participants.

Les données recueillies seront conservées sous clé dans l'archive du département et les seules personnes qui y auront accès seront le chef du département et le responsable du projet. Elles ne seront pas utilisées à d'autres fins que celles décrites dans le présent document.

### **Participation volontaire**

Votre participation à cette étude se fait sur une base volontaire. Vous êtes entièrement libre de participer ou non et de vous retirer en tout temps sans préjudice et sans avoir à fournir d'explications.

Le chercheur se réserve aussi la possibilité de retirer un participant en lui fournissant des explications sur cette décision.

### **Responsable de la recherche**

Pour obtenir de plus amples renseignements ou pour toute question concernant ce projet de recherche, vous pouvez communiquer avec Dr Claude Lajoie, [Claude.Lajoie@uqtr.ca](mailto:Claude.Lajoie@uqtr.ca), 8193675011 poste 3790. Ou Hatem ZIADIA, [Hatem.ziadia@uqtr.ca](mailto:Hatem.ziadia@uqtr.ca).

### **Question ou plainte concernant l'éthique de la recherche**

Cette recherche est approuvée par le comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains du Collège Trinity de Dublin et un certificat portant le numéro (CER-11-166-06.13)a été émis le 24 mars 2011.

Pour toute question ou plainte d'ordre éthique concernant cette recherche, vous devez communiquer avec la secrétaire du comité d'éthique de la recherche avec les êtres humains du l'UQTR. (Mme Amélie Germain. Tel : (819) 376-5011, poste 2129).

## ANNEXE 2

### FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

---

#### Engagement de la chercheuse ou du chercheur

Moi, **Hatem ZIADIA** m'engage à procéder à cette étude conformément à toutes les normes éthiques qui s'appliquent aux projets comportant la participation de sujets humains.

#### Consentement substitué

Je, ....., confirme avoir lu et compris la lettre d'information au sujet du projet d'évaluation des variables physiologiques limitatives à la performance pour la prescription de l'exercice en cyclisme. J'ai bien saisi les conditions éventuelles de ma participation. On a répondu à toutes mes questions à mon entière satisfaction. J'ai disposé de suffisamment de temps pour réfléchir aux implications de ma décision. Je comprends que la participation à la recherche est entièrement volontaire et que je peux décider de se retirer en tout temps, sans aucune pénalité.

#### J'accepte donc librement de participer à ce projet de recherche

Participante ou participant, parent ou tuteur :	Chercheuse ou chercheur :
Signature :	Signature :
Nom :	Nom :
Date :	Date :

## ANNEXE 3

### Anthropometric data

Sujets	Age	Poids (kg)	Taille (cm)	% de graisse
1	18	64,50	173,00	7,80
2	19	74,20	183,00	9,20
3	23	66,20	184,00	3,40
4	24	66,30	173,80	10,10
5	19	76,60	192,00	6,60
6	21	62,40	172,00	5,40
7	21	64,50	175,00	6,10
8	25	69,60	176,00	8,90
<b>X̄</b>	<b>21,25</b>	<b>68,04</b>	<b>178,60</b>	<b>7,19</b>
<b>Écart-type</b>	<b>2,55</b>	<b>5,03</b>	<b>7,03</b>	<b>2,23</b>

### Lactatemia at PAM test

Sujets	Baseline	PAM	130w	160w	190w	220w	250w	280w	310w	340w	370w	400w	430w
1	0,80	340	0,90	0,90	1,20	3,00	3,90	6,00	11,30	12,80			
2	1,60	400	1,20	0,80	1,30	0,80	1,00	1,60	2,90	5,40	8,20	14,60	
3	1,20	370	0,90	0,90	0,80	1,70	2,00	3,90	4,80	9,20	11,00		
4	1,10	400	1,10	1,00	1,20	1,20	1,70	2,00	3,10	5,20	9,20	15,70	
5	1,90	430	2,60	1,10	1,40	1,70	1,70	2,60	4,00	6,10	11,10	14,80	16,30
6	1,70	310	1,40	1,00	1,20	2,00	3,40	5,10	11,00				
7	1,60	310	2,00	2,60	3,40	4,00	6,60	10,00	11,00				
8	1,70	340	1,20	1,00	1,30	1,40	2,30	4,40	6,20	13,10			
<b>X̄</b>	<b>1,45</b>	<b>362,50</b>	<b>1,41</b>	<b>1,16</b>	<b>1,48</b>	<b>1,98</b>	<b>2,83</b>	<b>4,45</b>	<b>6,79</b>	<b>8,63</b>	<b>9,88</b>	<b>15,03</b>	<b>16,30</b>
<b>Écart-type</b>	<b>0,37</b>	<b>44,64</b>	<b>0,59</b>	<b>0,59</b>	<b>0,80</b>	<b>1,04</b>	<b>1,80</b>	<b>2,71</b>	<b>3,72</b>	<b>3,64</b>	<b>1,42</b>	<b>0,59</b>	<b>#DIV/0!</b>

### VO<sub>2</sub> at PAM test

Sujets	VO <sub>2</sub> max (ml/m/kg)	130w	160w	190w	220w	250w	280w	310w	340w	370w	400w	430w
1	72,60	33,00	39,20	43,10	49,00	54,90	61,90	69,40	72,60			
2	71,70	33,90	37,10	39,40	42,90	48,70	53,80	57,20	61,40	66,30	71,70	
3	72,60	31,10	36,00	40,10	45,80	52,10	59,10	63,70	71,20	72,60		
4	72,80	32,80	34,50	39,20	45,10	49,00	54,20	59,80	64,90	69,20	72,80	
5	79,20	30,80	33,50	39,50	45,10	49,50	53,60	59,60	64,30	70,50	77,70	79,20
6	71,10	37,00	40,40	44,00	53,90	59,80	64,80	71,10				
7	65,90	33,50	38,40	44,70	50,40	55,60	61,30	65,90				
8	70,20	40,40	45,70	50,40	56,50	60,10	64,70	68,90	70,20			
<b>X̄</b>	<b>72,01</b>	<b>34,06</b>	<b>38,10</b>	<b>42,55</b>	<b>48,59</b>	<b>53,71</b>	<b>59,18</b>	<b>64,45</b>	<b>67,43</b>	<b>69,65</b>	<b>74,07</b>	<b>79,20</b>
<b>Écart-type</b>	<b>3,68</b>	<b>3,19</b>	<b>3,85</b>	<b>3,87</b>	<b>4,76</b>	<b>4,64</b>	<b>4,76</b>	<b>5,19</b>	<b>4,50</b>	<b>2,64</b>	<b>3,19</b>	<b>#DIV/0!</b>



### V<sub>e</sub> at PAM test

Sujets	130w	160w	190w	220w	250w	280w	310w	340w	370w	400w	430w
1	51,03	62,75	64,76	78,90	91,82	115,03	148,54	178,57			
2	56,95	61,58	65,55	70,68	81,26	88,19	106,58	120,07	140,51	187,78	
3	47,56	55,55	58,68	69,88	83,54	93,49	111,73	155,06	181,01		
4	51,02	48,85	56,61	67,56	74,52	83,44	98,23	115,89	129,22	156,67	
5	54,70	58,46	67,36	77,62	88,66	100,38	115,42	132,31	165,92	198,65	209,21
6	54,70	59,45	66,36	80,50	92,34	110,38	146,68				
7	55,17	63,65	74,29	88,81	110,78	138,05	165,44				
8	65,31	71,24	78,83	90,82	95,26	110,90	132,92	166,32			
<b>X</b>	<b>54,56</b>	<b>60,19</b>	<b>66,56</b>	<b>78,10</b>	<b>89,77</b>	<b>104,98</b>	<b>128,19</b>	<b>144,70</b>	<b>154,17</b>	<b>181,03</b>	<b>209,21</b>
<b>Écart-type</b>	<b>5,29</b>	<b>6,51</b>	<b>7,33</b>	<b>8,59</b>	<b>10,87</b>	<b>17,56</b>	<b>23,80</b>	<b>25,74</b>	<b>23,58</b>	<b>21,79</b>	<b>#DIV/0!</b>

### Heart rate at PAM test

Sujets	Baseline	Fcmax	130w	160w	190w	220w	250w	280w	310w	340w	370w	400w	430w
1	45,00	204,00	121,00	128,00	138,00	157,00	173,00	160,00	196,00	204,00			
2	61,00	199,00	131,00	125,00	133,00	136,00	148,00	163,00	173,00	182,00	190,00	199,00	
3	46,00	182,00	109,00	117,00	122,00	135,00	147,00	158,00	167,00	179,00	182,00		
4	64,00	191,00	101,00	107,00	117,00	131,00	141,00	149,00	163,00	174,00	181,00	191,00	
5	65,00	205,00	127,00	128,00	138,00	146,00	159,00	165,00	177,00	183,00	194,00	201,00	205,00
6	62,00	184,00	116,00	119,00	125,00	137,00	151,00	164,00	184,00				
7	70,00	186,00	135,00	146,00	160,00	169,00	179,00	183,00	186,00				
8	58,00	192,00	144,00	151,00	158,00	167,00	174,00	181,00	186,00	192,00			
<b>X</b>	<b>58,88</b>	<b>192,88</b>	<b>123,00</b>	<b>127,63</b>	<b>136,38</b>	<b>147,25</b>	<b>159,00</b>	<b>165,38</b>	<b>179,00</b>	<b>185,67</b>	<b>186,75</b>	<b>197,00</b>	<b>205,00</b>
<b>Écart-type</b>	<b>8,95</b>	<b>8,92</b>	<b>14,13</b>	<b>14,66</b>	<b>15,83</b>	<b>15,14</b>	<b>14,51</b>	<b>11,43</b>	<b>11,03</b>	<b>10,75</b>	<b>6,29</b>	<b>5,29</b>	<b>#DIV/0!</b>

### ΔHbO<sub>2</sub> at PAM test

Sujets	130w		160w		190w		220w		250w		280w		310w		340w		370w		400w		430w	
	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'
1	1,383	1,909	2,214	2,554	2,431	1,611	1,811	-0,007	0,994	-0,432	0,017	-2,136	-1,018	-2,417	-2,721	-3,981						
2	-0,609	0,727	-2,087	-0,059	-0,174	0,249	-2,743	-1,760	-3,811	-2,481	-5,675	-6,793	-7,645	-8,383	-8,516	-9,491	-9,984	-11,876	-11,727	-13,441		
3	6,254	6,682	4,024	4,662	3,449	3,364	2,198	1,590	0,292	-0,717	-1,282	-2,355	-3,525	-4,738	-4,587	-4,993	-4,418					
4	-2,635	-0,515	0,270	1,016	-1,051	0,027	-2,808	-2,707	-5,143	-4,839	-7,131	-9,339	-9,340	-11,366	-12,494	-14,683	-15,675	-19,470	-19,151	-21,485		
5	-6,013	-5,609	-5,241	-6,070	-7,707	-8,220	-8,554	-8,186	-11,553	-13,399	-14,388	-17,271	-16,497	-17,970	-17,344	-18,914	-18,927	-20,072	-20,842	-22,046	-22,892	
6	-0,951	-2,187	-3,567	-3,321	-6,175	-6,368	-7,375	-8,678	-9,733	-11,309	-13,169	-14,148	-14,613	-14,642								
7	-7,850	-9,086	-10,466	-10,220	-13,074	-13,267	-14,274	-15,577	-16,612	-18,208	-20,068	-21,047	-21,512									
8	-12,924	-17,844	-19,227	-20,064	-18,543	-20,986	-20,686	-22,638	-23,196	-25,578	-25,635	-26,726	-27,325	-28,881	-28,543	-29,277						
X	-2,918	-3,240	-4,260	-3,938	-5,106	-5,449	-6,554	-7,245	-8,568	-9,620	-10,916	-12,477	-12,684	-12,625	-12,368	-13,557	-12,251	-17,139	-17,240	-18,991	-22,892	#DIV/0!
Écart-type	-3,456	-3,884	7,557	8,108	7,771	8,460	7,920	8,370	8,384	9,127	9,037	8,895	9,001	8,973	9,538	9,578	6,398	4,568	4,849	4,814	#DIV/0!	#DIV/0!

### ΔHHb at PAM test

Sujets	130w		160w		190w		220w		250w		280w		310w		340w		370w		400w		430w	
	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'
1	1,003	1,708	2,698	3,166	5,742	6,165	6,996	8,970	8,736	10,527	10,906	11,896	12,117	12,719	12,315	12,734						
2	5,424	5,311	6,426	5,934	7,937	8,295	10,971	10,992	13,471	12,590	15,965	17,210	17,789	18,876	19,918	20,565	21,634	22,530	22,786	24,216		
3	3,089	4,887	6,192	5,707	5,038	5,772	6,119	7,257	6,879	8,568	8,854	11,368	12,277	14,124	14,087	16,291	14,939					
4	1,854	0,362	3,527	3,652	7,507	6,479	10,867	10,876	13,511	13,725	16,789	19,055	20,703	22,933	25,487	27,992	30,554	33,908	33,944	37,436		
5	2,903	3,707	5,667	6,627	12,902	13,514	14,505	17,441	15,553	17,583	19,975	22,420	22,304	23,342	24,060	25,866	26,324	27,443	26,699	27,745	28,451	
6	-1,575	-0,355	0,854	0,339	2,506	2,700	4,160	6,266	7,224	9,230	10,820	11,420	12,495	13,903								
7	3,396	2,198	6,028	6,204	10,175	12,036	13,510	15,400	17,890	21,032	22,055	23,749	23,310									
8	7,816	7,148	8,743	9,447	8,180	10,511	9,880	12,100	13,549	15,800	16,341	17,432	18,297	20,162	20,567	21,582						
X	2,989	3,121	5,017	5,385	7,498	8,184	9,627	11,163	12,227	13,607	15,338	16,819	17,412	18,008	19,406	20,838	23,363	27,960	27,810	29,799	28,451	#DIV/0!
Écart-type	3,237	3,297	2,496	2,963	3,187	3,616	3,614	3,825	3,926	4,309	4,476	4,899	4,615	4,435	5,269	5,717	6,694	5,707	5,661	6,845	#DIV/0!	#DIV/0!

### ΔTHb at PAM test

Sujets	130w		160w		190w		220w		250w		280w		310w		340w		370w		400w		430w	
	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'
1	2,365	3,607	4,913	5,709	8,173	7,777	8,808	8,964	10,731	10,096	10,923	9,761	11,100	10,301	9,593	8,753						
2	4,816	6,038	4,340	5,877	7,764	8,545	8,229	9,234	9,661	10,110	10,290	10,417	10,144	10,513	11,402	11,074	11,650	10,654	11,059	10,774		
3	9,338	11,564	10,212	10,364	8,482	9,137	8,312	8,842	7,166	7,846	8,567	9,007	8,747	9,381	9,496	11,293	10,515					
4	-1,181	-0,152	3,797	4,669	6,456	6,506	8,059	8,169	8,367	8,885	9,657	9,715	11,362	11,566	12,992	13,308	14,878	14,438	14,792	15,950		
5	-3,110	-1,901	0,427	2,559	5,196	5,314	5,956	7,032	4,200	4,184	5,587	3,149	5,807	5,371	6,715	6,952	7,397	7,370	5,857	5,700	5,560	
6	-2,527	-2,543	-2,714	-2,983	-3,671	-3,670	-3,217	-2,414	-2,491	-2,081	-2,350	-2,730	-2,119	-0,741								
7	4,909	2,863	3,475	4,176	5,518	5,547	5,796	5,321	6,214	6,739	7,812	8,218	7,917									
8	-5,107	-10,696	-10,484	-10,618	-10,363	-10,475	-10,806	-10,539	-9,648	-9,978	-9,294	-9,294	-9,028	-8,719	-7,976	-7,696						
<b>X</b>	1,188	1,098	1,746	2,469	3,444	3,585	3,892	4,326	4,275	4,475	5,149	5,030	5,491	5,382	7,037	7,281	11,110	10,821	10,569	10,808	5,560	#DIV/0!
<b>Écart-type</b>	1,041	0,784	6,174	6,472	6,804	6,956	7,115	7,126	6,961	7,084	7,210	7,218	7,299	7,540	7,650	7,660	3,089	3,537	4,488	5,125	#DIV/0!	#DIV/0!

### ΔTSI% at PAM test

Sujets	130w		160w		190w		220w		250w		280w		310w		340w		370w		400w		430w	
	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'	2'30"-3'	4'30"-5'
1	-3,242	-3,813	-4,826	-5,020	-6,680	-7,155	-7,520	-8,243	-8,752	-9,956	-9,675	-11,078	-10,242	-10,926	-10,088	-10,531						
2	-6,558	-6,494	-8,732	-7,400	-9,076	-9,451	-12,384	-12,146	-14,158	-13,277	-16,009	-16,895	-17,520	-18,000	-18,699	-18,900	-19,359	-20,025	-19,545	-19,766		
3	0,801	0,452	-0,415	-0,149	-1,540	-1,605	-2,168	-2,536	-2,933	-3,599	-4,530	-5,087	-5,709	-6,276	-6,366	-6,495	-6,663					
4	-3,170	-2,041	-2,631	-3,046	-7,325	-6,542	-11,638	-12,044	-15,577	-15,945	-20,429	-24,016	-27,391	-31,614	-38,250	-44,659	-52,539	-56,836	-57,007	-59,578		
5	-7,404	-8,040	-9,277	-11,018	-14,140	-14,697	-15,288	-18,202	-15,376	-17,135	-18,751	-20,963	-19,880	-20,715	-20,951	-22,453	-22,550	-23,397	-22,153	-22,777	-23,432	
6	-3,306	-4,248	-5,154	-4,892	-6,802	-6,894	-7,840	-9,301	-10,485	-12,008	-13,226	-13,776	-14,147									
7	-3,909	-3,382	-7,365	-7,217	-10,489	-12,106	-13,218	-15,063	-16,969	-19,685	-20,258	-21,496	-20,777									
8	-12,607	-14,977	-16,223	-16,996	-15,420	-17,505	-16,692	-18,210	-18,565	-19,607	-19,666	-20,284	-20,391	-20,957	-20,567	-20,808						
<b>X</b>	-4,924	-5,318	-6,828	-6,967	-8,909	-9,494	-10,844	-12,093	-12,852	-13,902	-15,318	-16,702	-17,007	-17,566	-19,154	-20,641	-25,278	-33,419	-32,902	-34,040	-23,432	#DIV/0!
<b>Écart-type</b>	5,135	5,506	4,836	5,171	4,462	5,089	4,750	5,221	5,153	5,429	5,785	6,356	6,799	8,166	11,098	13,308	19,426	20,349	20,917	22,167	#DIV/0!	#DIV/0!

### Lactatemia at 3-min all-out

Sujets	repos	fin PC3	recup 1'	recup 3'	recup 5'	pic
1	1,6	5,4	7,0	6,2	6,0	7,0
2	1,9	19,3	13,7	13,9	13,0	19,3
3	1,8	9,0	11,4	11,7	11,7	11,7
4	1,9	16,3	15,9	14,9	16,2	16,3
5	2,0	2,8	14,1	14,4	13,7	14,4
6	1,3	9,6	10,3	9,9	9,4	10,3
7	1,9	12,3	15,1	14,1	14,0	15,1
8	2,0	11,7	13,2	10,4	9,3	13,2
$\bar{X}$	<b>1,8</b>	<b>10,8</b>	<b>12,6</b>	<b>11,9</b>	<b>11,7</b>	<b>13,4</b>
<b>Écart-type</b>	<b>0,24</b>	<b>5,39</b>	<b>2,90</b>	<b>3,00</b>	<b>3,27</b>	<b>3,79</b>

### Power output at 3-min all-out test

Sujets	Puissance pic	moment de puissance pic	RPM à puissance pic	RPM moy à EP	Puissance à 4mM	% de P pic à 4mM
1	682,00	6,00	81,00	81,00	251,50	36,80
2	1012,00	4,00	85,00	85,00	323,20	31,93
3	632,00	6,00	82,00	84,00	283,40	44,80
4	871,00	4,00	86,00	93,00	322,90	37,07
5	1073,00	5,00	126,00	103,00	310,00	28,89
6						
7	808,00	5,00	116,00	93,00	220,00	27,23
8						
$\bar{X}$	<b>846,33</b>	<b>5,00</b>	<b>96,00</b>	<b>89,83</b>	<b>285,17</b>	<b>34,45</b>
<b>Écart-type</b>	<b>175,41</b>	<b>0,89</b>	<b>19,71</b>	<b>8,11</b>	<b>42,12</b>	<b>6,46</b>

### VO<sub>2</sub> at 3-min all-out test

Sujets	VO2max (ml/m/kg)	30s	60s	90s	120s	150s	180s
1	72,6	36,6	64,5	66,0	65,9	65,2	65,6
2	71,70	37,4	65,2	69,9	71,0	72,0	71,2
3	72,60	28,6	50,3	60,0	60,6	60,9	62,4
4	72,80	37,2	69,3	71,7	73,0	74,5	74,4
5	79,20	33,7	67,4	69,7	72,2	73,9	73,6
6	71,10	29,9	57,3	62,6	63,4	62,8	64,1
7	65,90	29,4	61,3	62,4	61,4	62,3	62,6
8	70,20	29,9	57,3	62,6	63,4	62,8	64,1
<b>X</b>	<b>72,0</b>	<b>32,8</b>	<b>61,6</b>	<b>65,6</b>	<b>66,4</b>	<b>66,8</b>	<b>67,3</b>
<b>Écart-type</b>	<b>3,68</b>	<b>3,81</b>	<b>6,31</b>	<b>4,35</b>	<b>5,00</b>	<b>5,69</b>	<b>5,00</b>

### Heart rate at 3-min all-out test

Sujets	base	FC max	% Fcmax à EP	30s	60s	90s	120s	150s	180s
1	88	204	91,18	136	154	179	182	185	186
2	96	199	93,96	161	178	181	183	185	187
3	82	182	95,05	132	164	167	170	170	173
4	93	191	92,67	162	175	176	176	177	177
5	87	205	91,70	132	159	170	185	188	188
6	82	184	96,20	146	164	170	173	172	177
7	101	186	93,60	153	170	176	176	175	174
8	89	192	92,20	146	164	170	173	172	177
<b>X</b>	<b>89,8</b>	<b>192,9</b>	<b>93,3</b>	<b>146,0</b>	<b>166,0</b>	<b>173,6</b>	<b>177,3</b>	<b>178,0</b>	<b>179,9</b>
<b>Écart-type</b>	<b>6,6</b>	<b>8,9</b>	<b>1,7</b>	<b>12,1</b>	<b>8,0</b>	<b>5,0</b>	<b>5,4</b>	<b>7,0</b>	<b>6,1</b>

**V<sub>e</sub> at 3-min all-out test**

Sujets	30s	60s	90s	120s	150s	180s
1	96,96	163,60	168,29	164,49	157,67	152,1
2	81,15	172,16	196,47	192,35	187,20	183,10
3	116,57	127,62	167,62	169,14	167,34	163,51
4	73,05	157,47	174,79	173,70	167,59	165,37
5	179,05	206,37	200,11	202,01	202,98	193,45
6	96,51	107,49	133,71	142,75	139,97	143,07
7	78,79	158,33	162,72	158,33	160,58	158,88
8	96,51	107,49	133,71	142,75	139,97	143,07
<b>X</b>	<b>102,32</b>	<b>156,15</b>	<b>167,18</b>	<b>168,19</b>	<b>165,41</b>	<b>164,35</b>
<b>Écart-type</b>	<b>33,90</b>	<b>31,68</b>	<b>24,68</b>	<b>21,26</b>	<b>21,62</b>	<b>18,87</b>

**ΔHbO<sub>2</sub> at 3-min all-out test**

Sujets	5s	10s	15s	20s	25s	30s	40s	50s	60s	90s	120s	150s	160s	170s	180s
1	11,588	2,603	-4,228	-4,345	-5,049	-5,681	-6,664		-6,778	-6,230	-4,642	-3,435	-3,308	-3,791	-3,886
2	6,712	-10,126	-15,289	-15,035	-14,545	-14,738	-14,347	-14,041	-14,048	-13,441	-13,768	-13,923	-13,987	-14,956	-14,801
3	13,477	3,499	-7,711	-8,420	-7,498	-6,202	-5,353	-3,940	-2,723	-3,267	-3,163	-3,543	-3,619	-3,572	-3,368
4	19,343	0,176	-14,205	-14,681	-14,987	-15,619	-15,699	-15,473	-15,515	-15,304	-15,761	-16,512	-17,206	-17,212	-17,725
5	6,441	-15,787	-22,203	-20,020	-19,978	-18,678	-17,835	-17,468	-16,466	-16,888	-17,456	-17,955	-17,633	-18,405	-17,513
6	9,108	-3,411	-13,606	-14,083	-13,573	-13,563	-13,655	-13,147	-12,568	-12,022	-11,706	-11,716	-11,805	-11,875	-11,853
7	-4,628	-20,506	-29,771	-29,699	-28,332	-27,247	-26,403	-25,134	-23,672	-22,142	-20,790	-20,286	-20,939	-20,650	-21,010
8	5,009	-6,895	-17,914	-19,527	-19,356	-19,808	-20,030	-19,425	-19,069	-18,334	-17,804	-17,464	-17,903	-18,207	-18,266
<b>X</b>	<b>8,381</b>	<b>-6,306</b>	<b>-15,616</b>	<b>-15,726</b>	<b>-15,415</b>	<b>-15,192</b>	<b>-14,998</b>	<b>-15,518</b>	<b>-13,855</b>	<b>-13,454</b>	<b>-13,136</b>	<b>-13,104</b>	<b>-13,300</b>	<b>-13,584</b>	<b>-13,553</b>
<b>Écart-type</b>	<b>7,01</b>	<b>8,721</b>	<b>7,994</b>	<b>7,703</b>	<b>7,345</b>	<b>7,102</b>	<b>6,852</b>	<b>6,499</b>	<b>6,642</b>	<b>6,240</b>	<b>6,324</b>	<b>6,472</b>	<b>6,653</b>	<b>6,640</b>	<b>6,682</b>

**ΔHHb at 3-min all-out test**

Sujets	5s	10s	15s	20s	25s	30s	40s	50s	60s	90s	120s	150s	160s	170s	180s
1	-4,242	4,261	8,594	8,758	8,881	8,794	8,523	8,355	8,416	8,535	9,194	9,102	9,267	9,447	9,348
2	-8,411	6,834	12,481	13,272	14,414	15,089	16,249	16,872	17,305	18,043	18,814	19,740	20,078	20,571	20,923
3	-12,262	-5,235	7,352	9,469	9,823	11,488	11,568	13,277	13,716	12,304	12,384	12,837	13,437	13,472	14,689
4	-11,334	4,530	20,928	24,205	26,497	27,965	29,588	30,796	31,729	32,326	33,089	34,167	34,600	34,910	34,969
5	-10,203	10,098	19,003	20,537	21,352	22,210	22,856	23,528	24,196	24,935	25,956	26,787	27,309	27,650	27,735
6	-14,923	-5,747	4,431	6,361	7,671	7,789	8,554	9,332	9,840	10,368	11,135	11,271	11,753	11,443	11,724
7	-14,761	1,285	13,127	15,139	16,726	17,704	18,748	19,877	20,756	20,428	20,148	20,436	20,499	20,630	20,796
8	-8,244	2,816	14,468	15,959	16,420	16,968	17,801	18,284	18,682	19,515	20,261	21,427	21,992	22,104	22,313
<b>X</b>	<b>-10,548</b>	<b>2,355</b>	<b>12,548</b>	<b>14,213</b>	<b>15,223</b>	<b>16,001</b>	<b>16,736</b>	<b>17,540</b>	<b>18,080</b>	<b>18,307</b>	<b>18,873</b>	<b>19,471</b>	<b>19,867</b>	<b>20,028</b>	<b>20,312</b>
<b>Écart-type</b>	<b>3,590</b>	<b>5,516</b>	<b>5,662</b>	<b>6,077</b>	<b>6,496</b>	<b>6,825</b>	<b>7,262</b>	<b>7,445</b>	<b>7,673</b>	<b>7,938</b>	<b>8,031</b>	<b>8,393</b>	<b>8,426</b>	<b>8,562</b>	<b>8,453</b>

**ΔTHb at 3-min all-out test**

Sujets	5s	10s	15s	20s	25s	30s	40s	50s	60s	90s	120s	150s	160s	170s	180s
1	7,347	6,865	4,366	4,413	3,832	3,113	1,859	1,551	1,639	2,305	4,551	5,667	5,960	5,656	5,461
2	-1,699	-3,292	-2,808	-1,763	-0,131	0,351	1,902	2,831	3,258	4,602	5,046	5,817	6,540	5,615	6,122
3	1,209	-1,741	-0,365	1,043	2,319	5,279	6,209	9,332	10,988	9,032	9,243	9,290	9,450	9,895	11,316
4	8,008	4,706	6,722	9,524	11,509	12,345	13,888	15,322	16,214	17,021	17,327	17,654	17,393	17,697	17,242
5	-3,761	-5,690	-3,200	0,423	1,374	3,532	5,020	6,061	7,731	8,047	8,500	8,832	9,675	9,245	10,322
6	-5,815	-9,158	-9,175	-7,723	-5,903	-5,775	-5,103	-3,817	-2,730	-1,655	-0,573	-0,447	-0,053	-0,434	-0,130
7	-19,389	-19,220	-16,643	-14,560	-11,576	-9,543	-7,655	-5,257	-2,916	-1,714	-0,247	0,150	-0,440	-0,020	-0,214
8	-3,234	-4,077	-3,445	-3,566	-2,934	-2,838	-2,227	-1,139	-0,385	1,184	2,459	3,964	4,091	3,899	4,049
<b>X</b>	<b>-2,167</b>	<b>-3,951</b>	<b>-3,069</b>	<b>-1,526</b>	<b>-0,189</b>	<b>0,808</b>	<b>1,737</b>	<b>3,111</b>	<b>4,225</b>	<b>4,853</b>	<b>5,788</b>	<b>6,366</b>	<b>6,577</b>	<b>6,444</b>	<b>6,771</b>
<b>Écart-type</b>	<b>8,613</b>	<b>8,111</b>	<b>7,370</b>	<b>7,371</b>	<b>6,883</b>	<b>6,864</b>	<b>6,857</b>	<b>6,919</b>	<b>6,866</b>	<b>6,338</b>	<b>5,886</b>	<b>5,778</b>	<b>5,789</b>	<b>5,895</b>	<b>5,963</b>

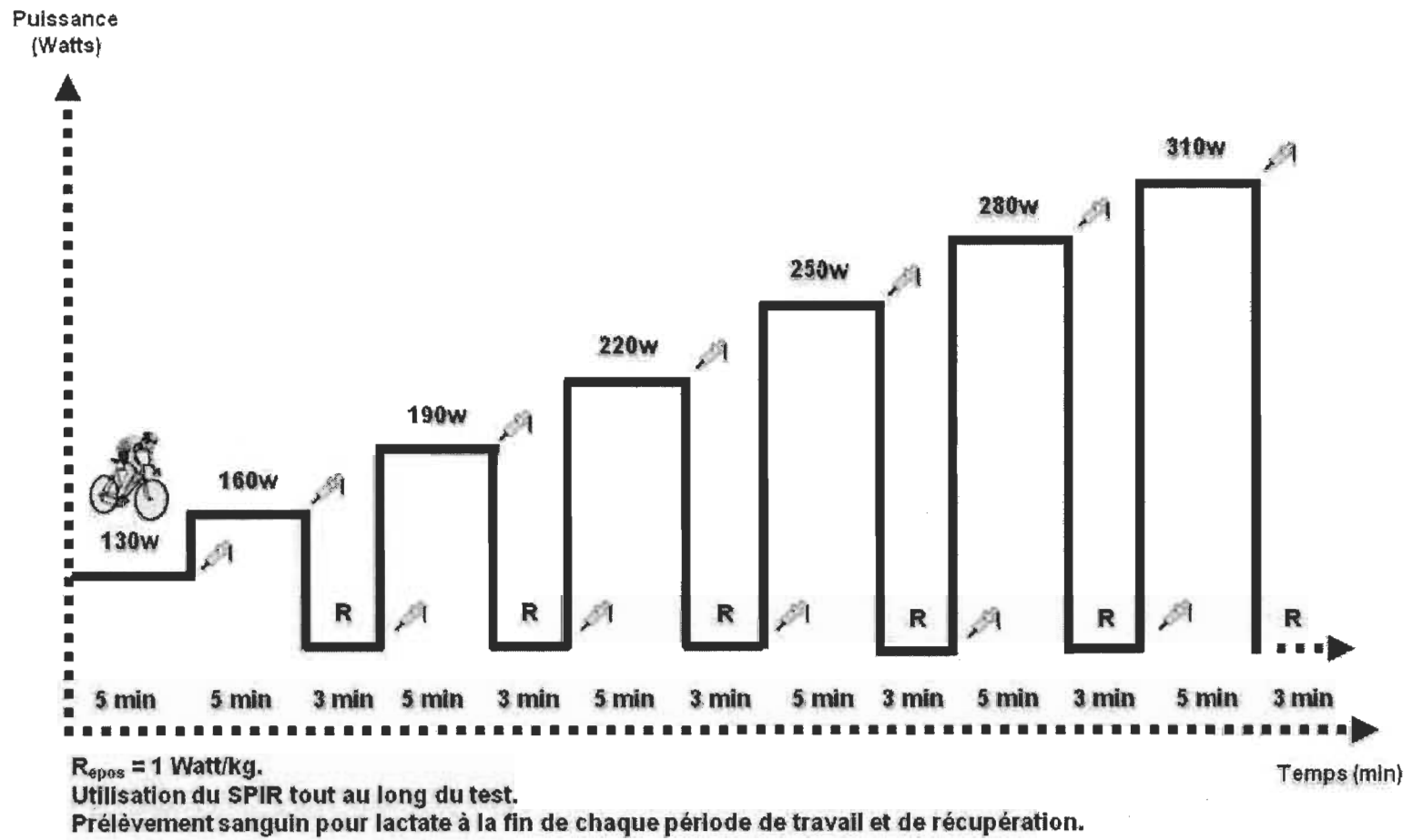
**ΔTSI% at 3-min all-out test**

Sujets	5s	10s	15s	20s	25s	30s	40s	50s	60s	90s	120s	150s	160s	170s	180s
1	3,216	-5,384	-10,284	-9,818	-9,836	-9,569	-9,340	-8,849	-8,466	-8,319	-8,348	-8,508	-8,646	-8,800	-9,171
2	3,225	-10,885	-15,372	-15,041	-15,018	-14,839	-14,880	-14,598	-14,474	-14,062	-14,293	-14,678	-14,981	-15,368	-15,536
3	4,967	0,189	-7,002	-7,565	-7,274	-7,238	-6,723	-6,955	-6,469	-5,661	-5,178	-5,088	-5,095	-4,834	-5,301
4	12,463	-6,398	-28,517	-34,848	-40,884	-44,877	-49,718	-53,590	-56,133	-57,767	-58,538	-59,277	-59,121	-59,493	-59,288
5	0,678	-14,605	-19,087	-19,135	-19,545	-19,742	-19,675	-19,367	-19,281	-19,665	-20,177	-20,781	-21,047	-21,275	-21,182
6	6,123	-4,054	-11,617	-12,039	-12,940	-11,980	-12,421	-12,673	-12,424	-12,201	-11,978	-11,742	-12,149	-11,982	-12,088
7	7,302	-10,183	-20,883	-21,421	-21,506	-21,460	-21,345	-20,872	-20,360	-19,249	-18,330	-18,142	-18,371	-18,276	-18,487
8	-2,416	-10,290	-17,705	-18,427	-18,387	-18,712	-18,589	-18,329	-18,095	-18,112	-18,278	-18,807	-19,164	-19,295	-19,308
<b>X̄</b>	<b>4,445</b>	<b>-7,701</b>	<b>-16,308</b>	<b>-17,287</b>	<b>-18,174</b>	<b>-18,552</b>	<b>-19,086</b>	<b>-19,404</b>	<b>-19,463</b>	<b>-19,380</b>	<b>-19,390</b>	<b>-19,628</b>	<b>-19,822</b>	<b>-19,915</b>	<b>-20,045</b>
<b>Écart-type</b>	<b>4,469</b>	<b>4,680</b>	<b>6,818</b>	<b>8,561</b>	<b>10,382</b>	<b>11,763</b>	<b>13,384</b>	<b>14,672</b>	<b>15,637</b>	<b>16,325</b>	<b>16,649</b>	<b>16,895</b>	<b>16,787</b>	<b>16,928</b>	<b>16,748</b>

**Power output at 3-min all-out test**

Sujets	5s	10s	15s	20s	25s	30s	40s	50s	60s	90s	120s	150s	160s	170s	180s
1	584	648	607	543	484	452	412	369	336	311	288	290	296	290	301
2	870	925	848	776	711	654	584	470	435	409	406	412	434	402	427
3	603	617	602	546	535	489	458	404	374	344	363	358	358	357	347
4	709	806	767	716	641	582	532	478	417	385	346	355	351	353	336
5	994	943	897	829	714	610	556	525	442	444	436	427	443	363	428
6															
7	756	728	679	612	537	494	429	375	333	283	280	270	272	284	273
8															
<b>X̄</b>	<b>752,67</b>	<b>777,83</b>	<b>733,33</b>	<b>670,33</b>	<b>603,67</b>	<b>546,83</b>	<b>495,17</b>	<b>436,83</b>	<b>389,50</b>	<b>362,67</b>	<b>353,17</b>	<b>352,00</b>	<b>359,00</b>	<b>341,50</b>	<b>352,00</b>
<b>Écart-type</b>	<b>157,97</b>	<b>137,80</b>	<b>124,28</b>	<b>121,24</b>	<b>98,56</b>	<b>79,80</b>	<b>71,59</b>	<b>63,36</b>	<b>48,74</b>	<b>61,03</b>	<b>62,29</b>	<b>62,99</b>	<b>69,69</b>	<b>45,72</b>	<b>64,07</b>





Protocole du test PAM.

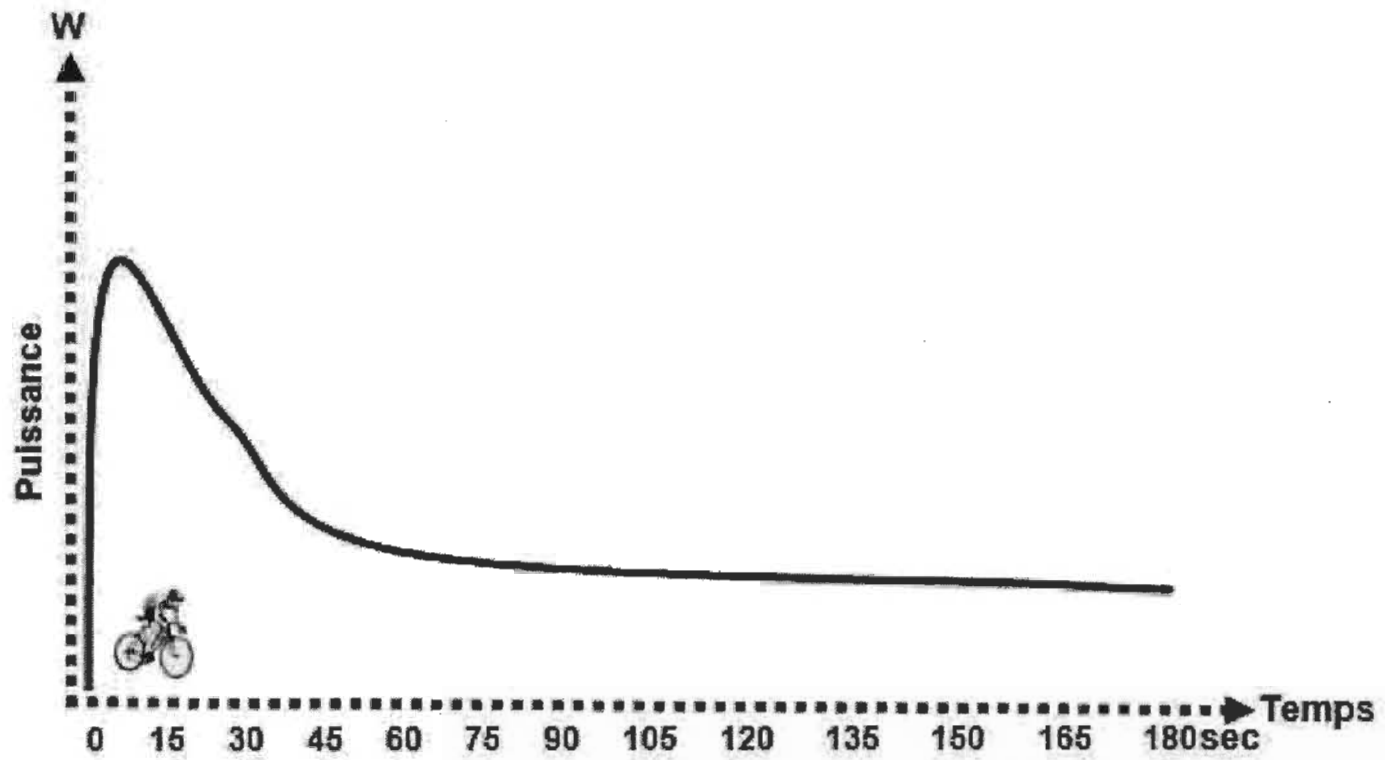


Figure démontrant les résultats escomptés lors du protocole du test PC3.