



Université de Franche-Comté

U.P.F.R. Sports Besançon

Mémoire pour l'obtention du
Diplôme de MASTER 1 Spécialité : EMIS

**Etude du Temps limite à PMA sur terrain plat et en montée à partir de
l'utilisation du Profil de Puissance Record**

Maxime CZAJKOWSKI

Directeur Projet : Frédéric GRAPPE

Responsable de stage : Yann RICHARD

Année 2015-2016

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à la réussite de ce travail :

Tout d'abord Frédéric Grappe, qui m'a orienté vers l'étude de ce sujet. Merci pour l'investissement, la patience, le partage des connaissances tout au long de l'année

Yann Richard et le Comité de l'Ain, pour m'avoir accueilli dans une structure riche de passion et de partage.

L'ensemble des coureurs ayant participé à cette étude, pour avoir mené cette étude à bien et pour votre investissement au long de l'année.

La promotion du Master 1 EMIS, pour cette année passée ensemble

A ma famille, qui me soutien et m'aide à avancer

Table des abréviations

Abréviations	Signification	Unité de mesure
PMA	Puissance Maximale Aérobie	Watts (W)
VMA	Vitesse Maximale Aérobie	km.h ⁻¹
VO ₂	Consommation d'oxygène	ml/min/kg
VO _{2max}	Consommation maximale d'oxygène	ml/min/kg
Pméca	Puissance mécanique	Watts (W)
T _{lim}	Temps limite	Secondes (s)
F	Force	Newton (N)
vVO _{2max}	Vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène	km.h ⁻¹ ou m.s ⁻¹
pVO _{2max}	Puissance associée à la consommation maximale d'oxygène	Watts (W)

Table des matières

I.	Introduction.....	2
II.	Revue de littérature.....	6
	1) Méthodes de détermination de la PMA.....	6
	2) PMA et T_{lim}	10
III.	Méthodologie.....	13
	1) Sujets	13
	2) Matériels.....	13
	3) Protocole.....	14
	4) Analyse statistique.....	15
IV.	Résultats.....	16
	1) Relation entre T_{lim}/PPR et $T_{lim}/Tests$ montée.....	17
	2) Relation entre T_{lim}/PPR et $T_{lim}/Tests$ sur le plat.....	18
	3) Test de significativité.....	19
	4) Evolution des Coefficients de Variation, Charge Affective et Fréquence Cardiaque lors des tests.....	19
V.	Discussion.....	22
VI.	Conclusion.....	25
	Bibliographie.....	26

I. Introduction générale

Tous les sports contemporains sont reliés à différents tests d'aptitudes physiques afin de déterminer les qualités de chaque individu. En effet, quelle que soit l'activité sportive, le sujet peut être amené à effectuer des batteries de tests, évaluant ses capacités physiques, voire mentales. Ainsi, on retrouve dans toutes les fédérations des tests qui permettent d'évaluer et donc de connaître le potentiel physique du sportif, puis de le comparer aux autres individus. Ces évaluations sont en lien direct avec le sport concerné et sont donc en relation avec les facteurs de performance propres à chaque discipline. Ainsi dans les sports d'endurance, on retrouve des tests permettant d'évaluer le potentiel aérobie de l'athlète. En athlétisme par exemple, les tests Vameval (Cazorla et Léger, 1993) et Cooper (1968) délivrent au coureur une vitesse de locomotion à partir de laquelle la consommation d'oxygène est à son maximum (VO_{2max} , en ml/min/kg). En cyclisme il est impossible d'associer une VO_{2max} à une vitesse de locomotion. Effectivement, les facteurs externes sont en constante variation à mesure que le cycliste se déplace dans son environnement (vent, inclinaison de la route...). Par exemple, un coureur effectue un test incrémental à partir de la vitesse de locomotion. Le test est réalisé dans des conditions optimales (terrain parfaitement plat, rectiligne et sans vent). Il obtient une VMA de 45 km/h^{-1} . Ce même coureur refait le même test sur le même terrain mais cette fois avec un fort vent de face. Celui-ci obtiendra une VMA bien inférieure à celle du premier test. Pour une vitesse de déplacement identique, le coureur devra vaincre la résistance au vent et ainsi produire une Puissance Mécanique ($P_{méca}$, en Watts) bien plus importante. L'utilisation de la VMA en cyclisme comme paramètre d'étalonnage de l'intensité de l'exercice est donc impossible. Il est préférable d'utiliser la $P_{méca}$. En effet, L'apparition des capteurs de puissance directement intégrés sur le vélo dans les années 80 a permis aux coureurs d'utiliser la $P_{méca}$ en temps réel. Pour une longueur de manivelle donnée, cette puissance correspond au produit d'une force (en N) perpendiculaire appliquée sur la manivelle avec une fréquence gestuelle (RPM). La $P_{méca}$ renvoie à l'énergie mécanique dépensée pour répondre aux exigences de l'activité. La démocratisation des capteurs a permis aux coureurs de déterminer leur Puissance Maximale Aérobie (PMA) c'est-à-dire le niveau de puissance correspondant à la VO_{2max} . Ainsi, le coureur peut déterminer 7 zones d'intensité en fonction du pourcentage de PMA (d'après l'échelle d'ESIE, Grappe *et coll.*, 1999).

Les méthodes les plus courantes pour déterminer cette PMA font appel à un test incrémental qui amène le coureur à épuisement. Cela consiste en un test triangulaire où le sujet réalise un exercice par paliers d'intensité progressive dont le dernier palier complété déterminera la

PMA. Le sujet débute le test à faible intensité (100 W) puis l'incrémentation se fait de manière régulière (augmentation de 20 à 50 W) et constante (2 ou 3 min). Le test se termine lorsque que le sujet est dans l'incapacité de poursuivre son effort.

La PMA représente un facteur de performance en cyclisme et permet donc de connaître le potentiel maximal aérobie du coureur et sa capacité à maintenir un haut niveau de $P_{méca}$ pendant plusieurs min.

D'après les travaux de Billat *et coll.* (1996), de Faina *et coll.* (1997) et Bosquet *et coll.* (2002), le temps de maintien à PMA en cyclisme se situerait entre 3 et 6 min. Cette notion de temps limite (T_{lim}) provient de la relation qui existe entre l'intensité et la durée de l'effort, dont les recherches effectuées par Scherer (1960) montrent que le « seuil d'épuisement local » est fondé sur une relation simple reliant le travail limite et son temps limite. Lorsqu'une chaîne musculaire travaille jusqu'à son seuil d'épuisement, on remarque que la durée de ce travail (T_{lim}) et le travail effectué diminue à mesure que la puissance augmente. Scherer trouva une relation linéaire entre le travail et son T_{lim} . Perronet et Thibaut (1984) ont poursuivi les travaux de Scherer en recueillant les temps record en course à pied sur des efforts allant de quelques min à plusieurs heures. Il est alors possible d'évaluer l'IE (Indice d'Endurance) qui donne une information sur le potentiel endurant de l'athlète à partir de la pente de la droite de régression entre la fraction d'utilisation de VO_{2max} et le logarithme du temps entre 7 min et ~2 h.

Plus récemment Pinot et Grappe (2011) ont utilisé le modèle de Perronet et Thibaut (1984) afin d'évaluer la relation hyperbolique qui existe entre les $P_{méca}$ records et le temps chez les cyclistes. Le Profil de Puissance Record (PPR) représente la puissance record que le coureur est capable de maintenir sur une plage de durée d'exercice très large (entre 1 sec et 5h). Ce PPR est obtenu grâce au recueil de données effectuées à l'entraînement et en compétition via un moniteur (type « Garmin), qui extrapole via à un logiciel les $P_{méca}$ record sur différentes plages de durées d'exercices. Le PPR est ensuite représenté par une courbe curvilinéaire entre la puissance (en W/Kg) et la durée de l'exercice (Figure 1). Le PPR permet de connaître les forces et faiblesses de l'athlète et donc son profil physiologique.

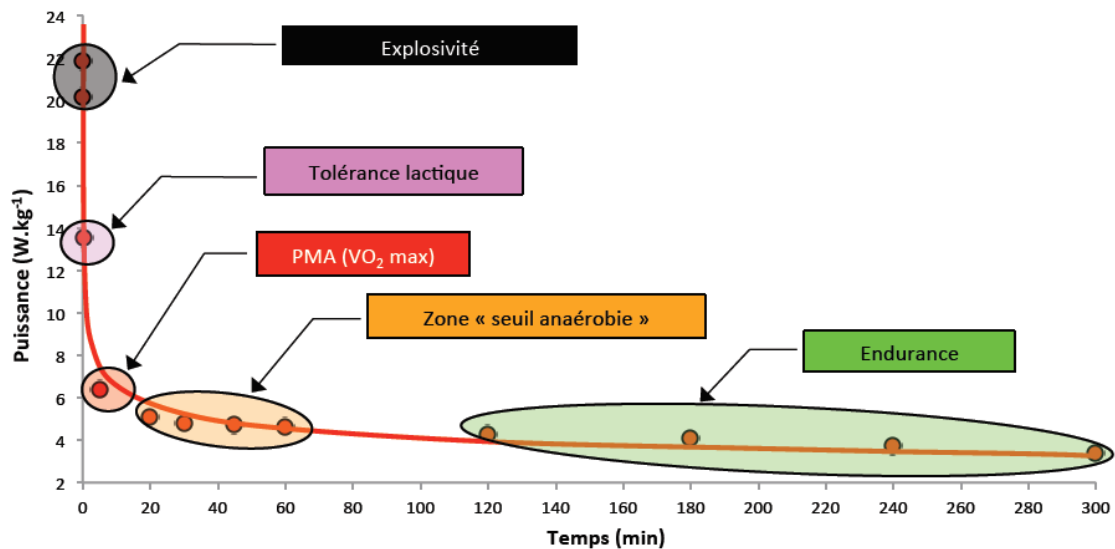


Figure 1: Profil de puissance record qui permet de déterminer les différentes aptitudes physiques du cycliste (Grappe, 2012).

Dans la continuité de leurs travaux, Pinot et Grappe (2014) ont établi une méthodologie statistique de détermination de la PMA. A partir du PPR, une droite de régression linéaire est tracée entre les Pméca record (10 min et 4 h) et le logarithme du temps. Un intervalle de confiance est tracé autour de cette régression. La droite est ensuite extrapolée autour des Pméca record comprises entre 3 et 7 min. La PMA est déterminée à partir du premier point record inclus dans l'intervalle de confiance. T_{PMA} correspond au temps de maintien de la PMA. Cette étude préliminaire a été réalisée sur un groupe de 15 cyclistes de haut niveau. Les valeurs moyennes de PMA et T_{PMA} étaient respectivement de 459 ± 42 W ($6,86 \pm 0,6$ W/kg) et de $4,17 \pm 0,7$ min. Ces valeurs s'étendaient entre 387 et 511 W pour la PMA et entre 3 et 5,5 min pour le T_{PMA} . Ces résultats sont en accord avec les travaux réalisés par Billat *et coll.* (1996) et Faina *et coll.* (1997).

En revanche, les tests de T_{PMA} n'ont pas été effectués sur le terrain afin de vérifier si cette méthode était valide.

L'objectif de l'étude était de déterminer le T_{lim} sur différents types de terrain (plat et en montée) à une intensité égale à PMA déterminée à partir du PPR auprès de 4 jeunes cyclistes. Bouillod *et coll.* (2014) ont montré que la Pméca obtenue lors d'un test maximal de 4 min en montée était significativement supérieure (+11,2%) par rapport à un test de 4 min sur terrain plat. Nous pouvons donc nous attendre à obtenir des T_{lim} différents en fonction de la nature du terrain.

Les hypothèses attendues sont :

- Le T_{lim} à PMA devrait être plus élevé en montée par rapport au plat dû au fait que la $P_{méca}$ sur un effort max de 4 min a été montrée supérieure (+11,2%) en montée.
- La PMA déterminée par le PPR devrait correspondre d'avantage à une valeur obtenue lors d'un effort en montée.

II. Revue de littérature

1) Méthodes de détermination de la PMA

- Mesure en laboratoire :

Les protocoles de mesure de la PMA en cyclisme s'inspirent des tests triangulaires effectués en course à pied (Léger-Boucher 1980, Cazorla 1990). Lors de ces tests, la puissance d'exercice croît régulièrement par paliers de 1 à 4 min jusqu'à l'épuisement du sujet. La PMA est ensuite calculée à partir de l'équation suivante :

$$PMA = P_{\text{méca avant dernier palier}} + [(P_{\text{méca dernier palier}} - P_{\text{méca avant dernier palier}}) \times t_{\text{dernier palier}}].$$

Faria *et coll.* (2005) ont montré que le PMA était dépendante du protocole utilisé et qu'il n'existe pas encore de protocole de référence pour la mesurer.

Le tableau 1 illustre les protocoles recensés en France pour déterminer la PMA :

Tableau 1: Protocoles recensés en France sur divers plateaux techniques médico-sportifs labellisés pour les cyclistes de haut-niveau (Grappe, 2012)

Départ du test (en W)	Incrémentations (en W)	Temps des paliers (en minutes)	Matériel utilisé
50 W	50W	3 min	Ergocycle
80W	80W	2 min	Home trainer Elite
100W	50W	3 min	Cycloergomètre
100W	25W	2 min	Cycloergomètre
100W	30W	2 min	
100W	25W	1 min	Cycloergomètre
120W	30W	incrémentations=30W/min à 360W, 30 W/2min	Vélo SRM
120W	40W	2 min	Cycloergomètre
125W	50W	2 min	Vélo SRM
150W	50W	4 min	??
160W	40W	2 min	Monark
170W	30 W	2 min	??
200W	30W	2 min	Cycloergomètre
200W	50W	2 min	Cycloergomètre

- Mesure sur le terrain :

Il existe peu d'articles dans la littérature qui s'intéressent à la détermination de la PMA à partir de tests de terrain. Les recherches sont plutôt récentes du fait que les capteurs de puissance n'étaient pas encore démocratisés. La plupart des tests ont été effectués sur vélodrome où les facteurs externes varient peu.

Léger *et coll.* (1982) ont effectué un test incrémental sur piste en utilisant la vitesse de locomotion comme incrément. Le cycliste débutait le test à 35 km/h, avec un incrément de 2 km/h toutes les 2 min. La PMA était déterminée à partir de l'équation de Di Prampero *et coll.* (1979) :

$$P = (0.045 \times M \times v) + \left[0.041 \times A_{SCT} \times \left(\frac{PB}{T} \right) \times v^3 \right]$$

$$A_{SCT} = 0.007184 \times m_c^{0.425} \times h_c^{0.725}$$

Equation 1 : Mesure de la puissance à partir de la méthode Di Prampero *et coll.* (1979). Pour l'équation, la puissance P est exprimée en Watts, M représente la masse du cycliste et de sa bicyclette en kg, v est la vitesse de déplacement en $m \cdot s^{-1}$, PB est la pression barométrique en mmHg, T est la température absolue en kelvin et A_{SCT} est la surface cutanée corporelle totale en m^2 . Elle peut être déterminée à partir de la masse corporelle du cycliste (m_c , en kg) et de la taille du cycliste (h_c , en m).

Ricci et Léger (1983) ont poursuivi les travaux en comparant les VO_{2max} et les PMA obtenues sur cycloergomètre, tapis roulant et sur vélodrome lors d'un test incrémental amenant le sujet à épuisement. Ils ont aussi utilisé la méthode indirecte de mesure de la PMA avec l'équation Di Prampero *et coll.* (Equation 1). Les résultats obtenus ne montraient aucune différence significative entre les tests de laboratoire et les tests effectués sur vélodrome (Tableau 2).

Tableau 2 : Comparaison des PMA et VO_{2max} obtenus sur vélodrome et cycloergomètre (Ricci et Léger, 1983).

	$\dot{V}O_{2max}$ l min ⁻¹ (Watt) ^a	\dot{W} max Watt (ms ⁻¹)
Stationary ergometer	3.71 (1,292.3)	262.5
Track cycling	3.15 (1,097.3)	254.4 ^b (10.9)

^a 1 ml O₂ = 20.9 Joule for RQ = 0.96

^b $\dot{W} = 0.765 \dot{s} + 0.19 \dot{s}^3$ (Di Prampero et al. 1979; Davies 1980)

Marion et Léger (1988) ont effectué un test incrémental sur piste chez des cyclistes élites afin de comparer le pourcentage de la PMA par rapport au pourcentage de la Vitesse Maximale Aérobie (Tableau 3). Ils ont obtenu les résultats suivants :

Tableau 3 : Pourcentage de la PMA (MAP) en fonction du pourcentage de la VMA (MAS) (Marion, Léger 1988).

% MAP	50	60	70	80	85	90	95	100
% MAS	75	81	87	92	94	96	98	100

MAP = maximal aerobic power; MAS = maximal aerobic speed

Padilla *et coll.* (1996) ont aussi effectué un test sur vélodrome afin de comparer les valeurs de PMA, de VO_{2max} , FC max et de lactate sanguin obtenues en laboratoire à celles relevées sur le terrain. Le protocole était différent des études précédentes : le coureur effectuait 8 tours de piste (2280 m) avec un incrément de 1,5 km/h toutes les min. Les valeurs de PMA, VO_{2max} et FC max ne présentaient aucune différence significative entre les deux conditions. Les résultats étaient respectivement de 372 W (± 50 W), 195 bpm (± 8 bpm) et 4,49 l.min⁻¹ (± 0.56 l.min⁻¹) pour les tests sur vélodrome, contre 365 W (± 36 W), 196 bpm (± 9 bpm) et 4,49 l.min⁻¹ (± 0.46 l.min⁻¹) pour les tests de laboratoire. En revanche le taux de lactate sanguin (en mmol/L) prélevé sur vélodrome était significativement supérieur (14%) par rapport aux valeurs de laboratoire.

Gonzalez-Haro *et coll.* (2007) ont comparé une méthode de détermination de la PMA en laboratoire à un test incrémental effectué sur un vélodrome. De nombreuses variables

physiologiques comme la PMA, VO_{2max} ont été relevées (Tableau 4) Les résultats ont montré que la PMA obtenue sur le vélodrome était significativement supérieure à celle obtenue en laboratoire.

Tableau 4 : Comparaison des résultats obtenus sur les tests de laboratoire aux tests de terrain (Gonzalo-Haro et coll. 2007).

	Laboratory test (test)	Field test avg. (retest)
P_0 (%)	28.6 (3.4)	51.5 (5.4)***
ΔP (W/min)	7.7 (0.8)	11.7 (1.4)***
MAP (W)	354.7 (41.3)	407.8 (61.9)***
HR_{max} (ppm)	185 (11)	184 (12)
$[La^-]_{max}$ (mM)	8.4 (2.6)	6.9 (1.6)**
PC_{max} (rpm)	87.7 (10.0)	99.7 (3.9)***
T (min:s)	23:54 (03:27)	17:55 (01:53)***
T^a (°C)	21.8 (1.9)	20.7 (4.0)
H (%)	59.7 (7.3)	65.0 (13.0)*
Pb (mm Hg)	747.7 (12.0)	728.2 (2.8)***

P_0 =Puissance initiale; ΔP = incrément ; MAP=Puissance Maximale aérobie; HR_{max} =FC max; $[La^-]_{max}$ = lactatémie maximale ; PC_{max} = cadence maximale; T=Temps total; T^a = température; H =taux d'humidité; Pb=pression barométrique

Seules deux études ont rapporté des tests sur route. Il est important de préciser que les tests réalisés dans ces études n'étaient pas effectués à une intensité égale à PMA mais représentaient un test d'effort maximal sur 4 min.

Nimmerichter *et coll.* (2010), ont recueilli des mesures physiologiques (seuils ventilatoires, « Respiratory Compensation Point ») et mécaniques ($P_{méca}$) sur un test d'effort maximal de 4 min comparé à un test PMA en laboratoire. Une forte corrélation a été trouvée ($r = 0,84$) entre la PMA et la $P_{méca}$ moyenne obtenue sur le test de 4 min. Les auteurs rapportent que le test de terrain 4 min est un prédicteur fiable de la PMA en cyclisme.

Dans la continuité de cette étude, Bouillod *et coll.* (2014) ont comparé les données de $P_{méca}$ sur un test d'effort maximal de 4 min selon 3 conditions expérimentales (test en laboratoire, sur le plat et en montée) à un test PMA sur ergocycle. Les tests en laboratoire et sur terrain

plat étaient de bons prédicteurs de PMA. Le test en montée, quant à lui, déterminait des valeurs significativement supérieures (13%) par rapport au test PMA sur ergocycle.

2) PMA et T_{lim}

De nombreuses études se sont intéressées au T_{lim} à un certain pourcentage de VO_{2max} pour évaluer les qualités d'endurance. Toutefois, il est important de préciser que ces tests n'étaient pas effectués à PMA mais à la plus petite puissance atteinte à VO_{2max} (pVO_{2max}). Effectivement, un test de détermination de la PMA se déroule jusqu'à épuisement du sujet. La VO_{2max} est atteinte lors du test mais l'athlète peut toutefois poursuivre son effort et maintenir un plateau de VO_{2max} pendant une courte période. La pVO_{2max} est quant à elle atteinte avant la fin d'un test incrémental. La Pméca utilisée lors de ces études était donc inférieure à la PMA.

Les études du T_{lim} dans le cyclisme sont peu nombreuses. Billat *et coll.* (1997) ont montré que le T_{lim} à pVO_{2max} chez 9 cyclistes de niveau national était de 222 ± 91 secondes (Tableau 5).

Tableau 5 : T_{lim} à vVO_{2max} et VO_{2max} obtenus chez des cyclistes, kayakistes, nageurs et coureurs (Billat *et coll.* 1997), vVO_{2max} représentant la plus petite Pméca atteinte à VO_{2max}.

Sportsmen	vVO _{2max}	VO _{2max} incremental test (ml min ⁻¹) (% of cyclists' values)	VO _{2max} incremental test (ml min ⁻¹ kg ⁻¹) (% of cyclists' values)	Time limit at vVO _{2max} (s)
Cyclists	419 ± 49†	5632 ± 649 (100%)	72.4 ± 5.4 (100%)	222 ± 91
Kayak paddlers	239 ± 56†	4034 ± 624.6 (72%)	53.8 ± 6.1 (74%)	376 ± 134
Swimmers	1.46 ± 0.09‡	4444 ± 729 (79%)	59.6 ± 6.7 (82%)	287 ± 160
Runners	6.22 ± 0.22‡	5129 ± 332 (91%)	74.9 ± 3.0 (103%)	321 ± 84
Mean ± SD	—	4809 ± 710	65.2 ± 10.1	302 ± 65

p < 0.05.

† Units are watts.

‡ Units are m s⁻¹.

En revanche, les recherches concernant le T_{lim} en course à pied sont nombreuses. Le tableau 6 résume les études ayant évoqué le T_{lim} à VO_{2max} (Bosquet *et coll.* 2002). Les résultats obtenus montrent que le T_{lim} en course à pied se situerait à environ 5,92 ± 1,78 min. Le tableau évoque aussi 2 études de T_{lim} réalisées sur ergocycle. Lavoie et Mercier (1997) rapportent un T_{lim} de 3,83 min (± 1,11 min) chez 5 sujets ayant un VO_{2max} de 61,4 ml/min/kg. Villeneuve (1996) a cherché à définir le T_{lim} à 100% de la VO_{2max} chez 10 sujets. Les résultats obtenus étaient de 6,43 min (± 0,87 min).

Tableau 6 : Récapitulatif de différentes études qui se sont intéressées au T_{lim} à la vitesse de locomotion associée à VO_{2max} (course à pied et ergocycle) (Bosquet et coll. 2002).

Study	n	Ergometer	VO_{2max} (ml/min/kg)			t_{lim} (min)		
			mean	SD	CV	mean	SD	CV
Higgs ^[46]	20	Treadmill	41.32			4.60		
Volkov et al. ^[47]	4	Treadmill	60.80	3.20	5.26	5.40	3.25	60.19
Lavoie and Mercer ^[42]	5	Cycle ergometer	61.40	4.50	7.32	3.83	1.11	28.98
Adopo et al. ^[43]	10	Treadmill	69.80	6.30	9.03	7.60	1.60	21.05
Padilla et al. ^[45]	14	Track	65.30	5.00	7.66	7.00	2.20	31.43
	24	Track	71.90	4.20	5.84	8.40	2.10	25.00
Billat et al. ^[24]	13	Treadmill	74.90	3.10	4.14	5.35	1.45	27.10
Billat et al. ^[41]	12	Treadmill	69.40	3.70	5.33	6.57	1.73	26.40
Billat et al. ^[40]	38	Treadmill	71.40	5.50	7.70	6.00	1.78	29.72
Billat et al. ^[48]	8	Treadmill	69.50	4.20	6.04	6.70	1.88	28.11
	8	Treadmill	69.50	4.20	6.04	6.73	1.68	25.00
Billat et al. ^[49]	16	Treadmill	75.50	5.30	7.02	5.50	1.50	27.27
Billat et al. ^[50]	15	Treadmill	69.30	3.30	4.76	5.75	2.00	34.78
Billat et al. ^[51]	15	Treadmill	77.70	6.40	8.24	6.12	1.97	32.15
	15	Treadmill	68.40	4.70	6.87	6.22	2.82	45.31
	14	Treadmill	63.20	4.20	6.65	7.02	2.15	30.64
Hill and Rowell ^[52]	13	Treadmill	52.10	5.10	9.79	4.83	1.02	21.03
Villeneuve ^[53]	10	Cycle ergometer	59.60	6.00	10.07	6.43	0.87	13.52
	10	Treadmill	60.40	4.70	7.78	6.47	1.19	18.39
Gazeau et al. ^[54]	7	Treadmill	69.20	6.80	9.83	5.03	1.38	27.39
Billat et al. ^[55]	8	Treadmill	71.20	5.00	7.02	5.02	0.90	17.94
Renoux et al. ^[56]	14	Treadmill	68.90	4.60	6.68	4.48	1.28	28.62
Demarie et al. ^[44]	15	Track	56.30	4.40	7.82	5.12	3.05	59.57
Billat et al. ^[57]	7	Track	61.20	3.40	5.56	5.78	1.83	31.70
Morton and Billat ^[58]	10	Treadmill	59.30	5.20	8.77	6.08	1.77	29.04
Blondel et al. ^[59]	10	Track	61.80	6.20	10.03	5.95	1.83	30.76
Mean	13		65.36	4.77	7.14	5.92	1.78	30.04
SD	7		7.96	1.04	1.66	1.02	0.61	10.91

CV = coefficient of variation (%); n = number of participants; SD = standard deviation.

Les résultats obtenus dans les différentes expérimentations (Tableau 6) montrent que le T_{lim} moyen à VO_{2max} (course à pied et cyclisme confondu) serait de 5,92 min. En cyclisme, le T_{lim} à PMA serait environ de 4,17 min chez des cyclistes professionnels selon la méthode de détermination de la PMA par le PPR (Pinot et Grappe 2014). Le T_{lim} à VO_{2max} se situerait entre 3 et 9 min (Billat et Koralsztein 1996). Cette variabilité tient en partie à la nature exponentielle de la relation entre la vitesse de course et le T_{lim} . De faibles différences de vitesse se traduisent en effet par des variations importantes de T_{lim} (Kachouri *et coll.* 1996). Le T_{lim} serait donc dépendant du protocole de détermination de la PMA ou de VMA (Bosquet *et coll.* 2002). De plus, le T_{lim} serait influencé par le niveau d'entraînement des athlètes (Billat *et coll.*, 1996). Enfin, Faina *et coll.* (1996), Kachouri *et coll.* (1996) montrent que le temps pendant lequel la pVO_{2max} peut être maintenue dépend également des possibilités anaérobies des sujets.

Dans ce contexte, l'utilisation du PPR peut être un moyen approprié pour déterminer la PMA et son T_{lim} puisqu'il prend en compte les données de $P_{méca}$ sur le terrain, durant chaque

entraînement et compétition. De plus, il inclut des durées d'efforts maximales comprises entre 1 sec et 4 h (Pinot J. et Grappe, 2011). Selon le modèle de Peronnet et Thibault (Peronnet et Thibault, 1984 ; Peronnet *et coll.*, 1987), il est théoriquement possible d'évaluer le potentiel aérobique du cycliste à partir de la régression linéaire entre les Pméca records et le logarithme du temps ($\log t$).

III. Méthodes

1) Sujets

4 cyclistes volontaires ont participé à cette étude. Les coureurs étaient de niveau régional. Leurs caractéristiques sont déterminées dans le tableau 7 suivant :

Tableau 7 : Caractéristiques des sujets.

	Moyenne	Ecart type
Age	22,3 ans	± 0,95 ans
Taille (cm)	181 cm	± 5,30 cm
Poids (kg)	64,5 Kg	± 3 kg

2) Matériel

Les tests ont été effectués avec les vélos personnels des coureurs. Les sujets étaient équipés de la même façon afin de « standardiser » les tests. Ils devaient se munir du même vélo, de la même tenue, du même casque, de gonfler leurs roues avec la même pression de pneus.

La mesure de la Pméca a été réalisée via le capteur de puissance Powertap (Madison, USA) situé dans la roue arrière qui transmettait l'ensemble des données grâce au système ANT+ à un moniteur type « Garmin ». La fréquence d'échantillonnage de la roue Powertap correspondait à 1 Hz. Les données de Pméca ont été analysées avec le logiciel GoldenCheetah.

Afin de maintenir leur PMA, les sujets avaient accès aux données affichées sur leurs compteurs lors de la totalité des tests. Le Garmin (500 ou 800) était fixé à l'avant du cintre grâce à un support pour faciliter la lecture des données. La Pméca affichée sur le compteur correspondait à une moyenne lissée sur 3 secondes pour éviter des variations trop brusques de lecture des valeurs de puissance lors de l'effort.

A la fin de chaque test, la charge affective (CA) (Baron *et coll.*, 2009) était mesurée. Elle correspondait à la différence entre l'effort et le plaisir ressenti au cours du test. L'échelle CR 10 de Borg (1981) a été utilisée pour mesurer les variables « Effort » et « Plaisir ».

D'autres variables ont été mesurées comme la fréquence cardiaque (en bpm) et la cadence de pédalage (RPM).

3) Protocole

a) Détermination de la PMA à partir du PPR

Quatre mois ont été nécessaires pour la validation du PPR de chaque coureur. Le recueil des données de Pméca de chaque sujet a été effectué à la fin de chaque entraînement ou compétition afin d'obtenir la courbe curvilinéaire entre la Pméca et la durée de l'exercice (en sec) selon la méthode de Pinot et Grappe (2011).

Pour établir le PPR, les Pméca records sur 1, 5 et 30 secondes, 1 ; 3 ; 3,5 ; 4 ; 4,5 ; 5 ; 5,5 ; 6 ; 6,5 ; 7 ; 10 ; 20 ; 30 ; 45 et 60 min, 2, 3 et 4 heures ont été relevées. La PMA et le T_{lim} associé ont été calculés selon la méthode Pinot et Grappe (2014).

b) Tests de T_{lim} à PMA

Les sujets devaient réaliser 2 tests de T_{lim} à PMA (préalablement définie par le PPR) dans 2 conditions expérimentales différentes (sur le plat et en montée) pour vérifier si la méthode de détermination de la PMA à partir du PPR était applicable chez les cyclistes concernés par cette étude. Chaque sujet a effectué 4 tests séparés d'une semaine. Les tests ont été placés selon le souhait des coureurs afin qu'ils arrivent relativement « frais » physiquement et mentalement le jour du test.

Le test consistait à maintenir la PMA le plus longtemps possible. Dès que celle-ci n'était plus tenue, le test se terminait. La puissance maintenue devait se situer à plus ou moins 2% de la PMA. Si le maintien moyen n'était pas dans cette zone, le test était considéré comme nul et était à refaire. Par exemple, pour un cycliste ayant une PMA à 350 W il devait produire son effort entre 343 et 357 W. Les sujets connaissaient les zones de puissance dans lesquelles ils devaient rester. Une première session d'habituance a été nécessaire afin que les coureurs soient capables de maintenir leurs PMA. Il était primordial que les sujets soient capables de conserver leur PMA pour ne pas fausser les résultats de T_{lim} .

Les tests sur terrain plat s'effectuaient sur un parcours rectiligne, sans virage afin que le coureur puisse se focaliser uniquement sur la qualité de son effort. Le coureur avait pour consigne de rester assis sur son vélo. Le test en montée s'effectuait sur une pente moyenne de

8% qui correspondait à une pente régulièrement rencontrée sur les courses cyclistes. Le coureur n'avait aucune consigne particulière et pouvait alterner les positions assis et danseuse.

4) Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel XL STAT. Pour l'ensemble des variables, les moyennes et les écarts types ont été calculés.

Un test non paramétrique de Friedman (1937) a été utilisé afin de comparer les valeurs de T_{lim} entre les 2 conditions expérimentales (plat et montée) et la valeur déterminée par le PPR. Un coefficient de corrélation a été établi entre le T_{lim} déterminé par le PPR et ceux obtenus sur le terrain. Un test de Bland et Altman a été utilisé pour comparer les T_{lim} réalisés par le PPR et ceux obtenus sur le terrain. Enfin, un coefficient de variation (CV) a été calculé pour la Pméca maintenue lors des 2 conditions expérimentales pour vérifier si la PMA était correctement maintenue lors des tests.

IV. Résultats

Avant d'effectuer les tests de terrain, la PMA et son T_{lim} ont été calculés pour chaque sujet (Figure 2).

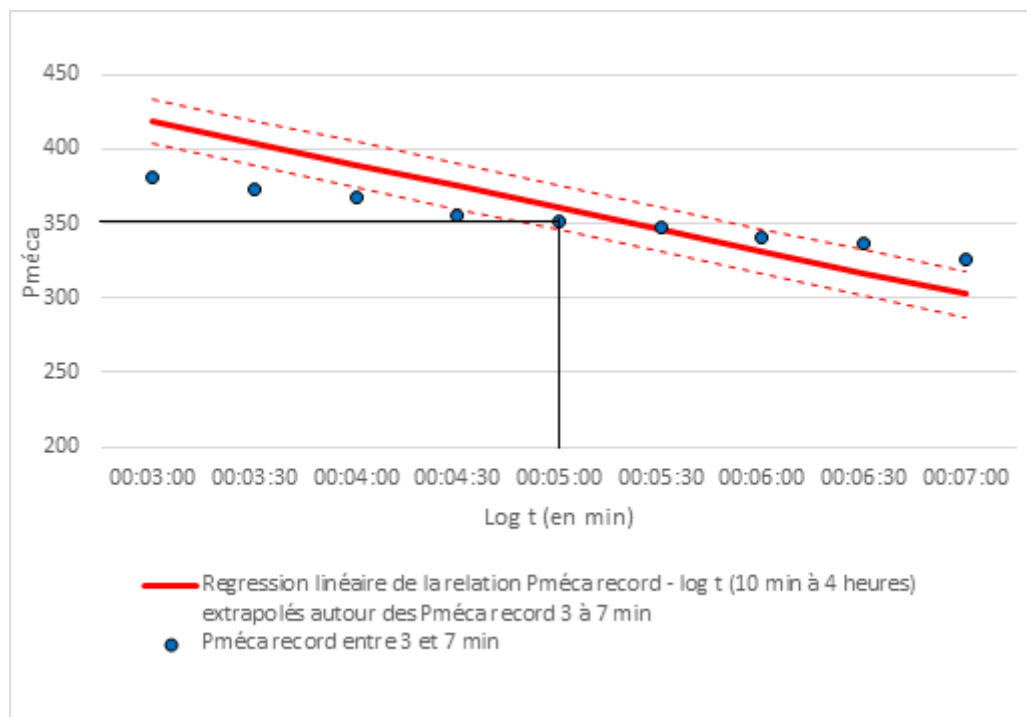


Figure 2 : Méthodologie de détermination de la PMA et de son T_{lim} selon la méthode Pinot et Grappe (2014). La relation Pméca record et log t (10 min à 4 heures) est extrapolée autour des Pméca records 3 à 7 min (droite rouge). Un écart-type résiduel est calculé autour de cette régression (lignes pointillées). La PMA et son T_{lim} correspond à la première Pméca record (point bleu) à l'intérieur de l'intervalle de confiance. Pour ce coureur, elle correspond à 351 W et 5 min.

Les PMA et T_{lim} de chaque sujet sont ensuite exposés dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Représentation des PMA et de leurs T_{lim} de chaque sujet, selon la méthode Pinot et Grappe (2014).

Sujets	PMA (définie par le PPR, en W)	Tlim associé à la PMA (en sec)
Sujet 1	368	240
Sujet 2	339	300
Sujet 3	399	300
Sujet 4	351	300
Moyenne	364 ± 26	285 ± 30

Les résultats de T_{lim} obtenus sur le plat sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 9 : T_{lim} à PMA maintenu par chaque sujet sur terrain plat et en montée (exprimé en secondes).

	T_{lim} PPR	T_{lim} plat	T_{lim} montée
Sujet1 T1	240	210	224
Sujet 1 T2	240	214	233
Sujet 2 T1	300	254	277
Sujet 2 T2	300	265	273
Sujet 3 T1	300	248	287
Sujet 3 T2	300	266	278
Sujet 4 T1	300	267	284
Sujet 4 T2	300	254	275

1) Relation entre T_{lim}/PPR et $T_{lim}/Tests$ montée

Le graphique Bland et Altman entre le T_{lim} défini par le PPR et les tests de T_{lim} réalisés en montée (Figure 2) indique que le T_{lim} réalisé en montée est inférieur de 18,6 sec par rapport au T_{lim} défini par le PPR. De plus, l'intervalle de confiance (IC) délimité par les limites d'accordance est de 26,6 sec.

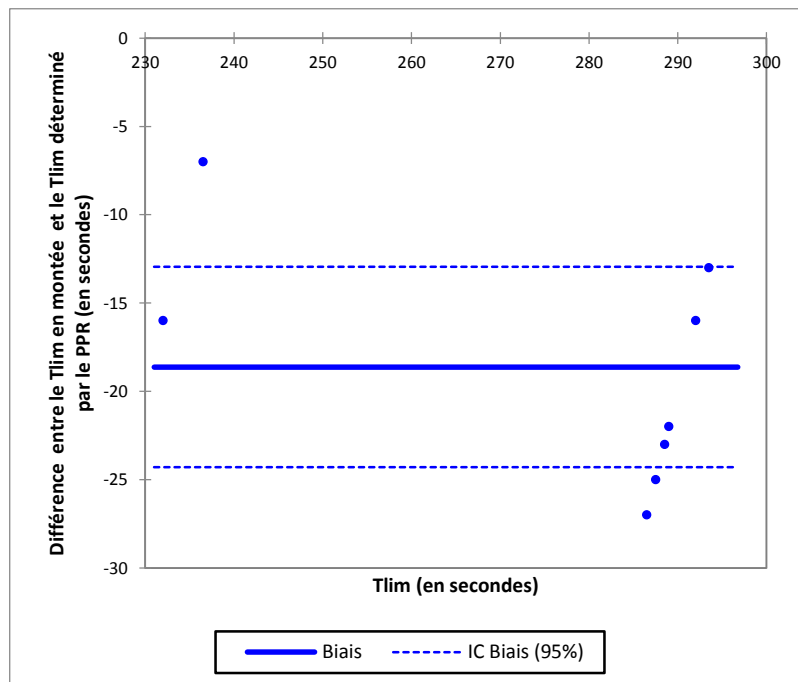


Figure 3 : Graphique Bland et Altman, entre les T_{lim} définis par le PPR et les T_{lim} réalisés en montée. Les 2 tests de chaque sujet sont représentés dans le graphique

Tableau 9: Relation entre les T_{lim} définis par le PPR et le T_{lim} en montée.

T_{lim} moyen défini par le PPR (sec)	T_{lim} moyen réalisé en montée (sec)	Corrélation	Pvalue	Biais	Intervalle de confiance (IC) 95%
285	266	0,93	P = 0,0001	-18,6	(-24,3;-12,3)

2) Relation entre T_{lim}/PPR et $T_{lim}/Tests$ sur le plat

Le graphique Bland et Altman entre le T_{lim} défini par le PPR et les tests de T_{lim} réalisés sur le plat (Figure 3) indique que le T_{lim} réalisé sur le plat est inférieur de 37,8 sec par rapport au T_{lim} défini par le PPR. De plus, l'intervalle de confiance (IC) délimité par les limites d'accordance est de 15,325 sec.

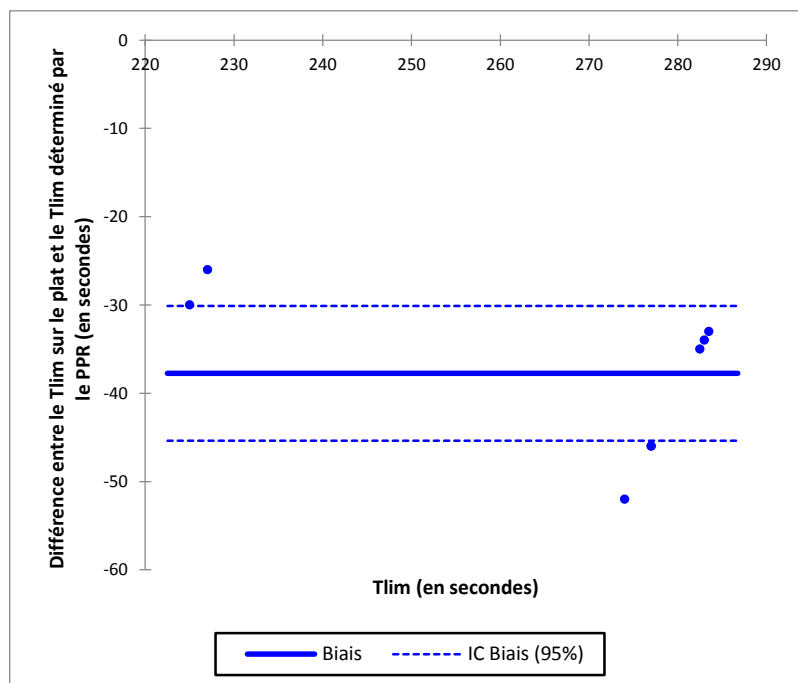


Figure 4 : Graphique Bland et Altman entre le T_{lim} déterminé par le PPR et les T_{lim} réalisés sur le plat. Les 2 tests de chaque sujet sont représentés dans le graphique

Tableau 10 : Relation entre les T_{lim} définis par le PPR et le T_{lim} sur le plat.

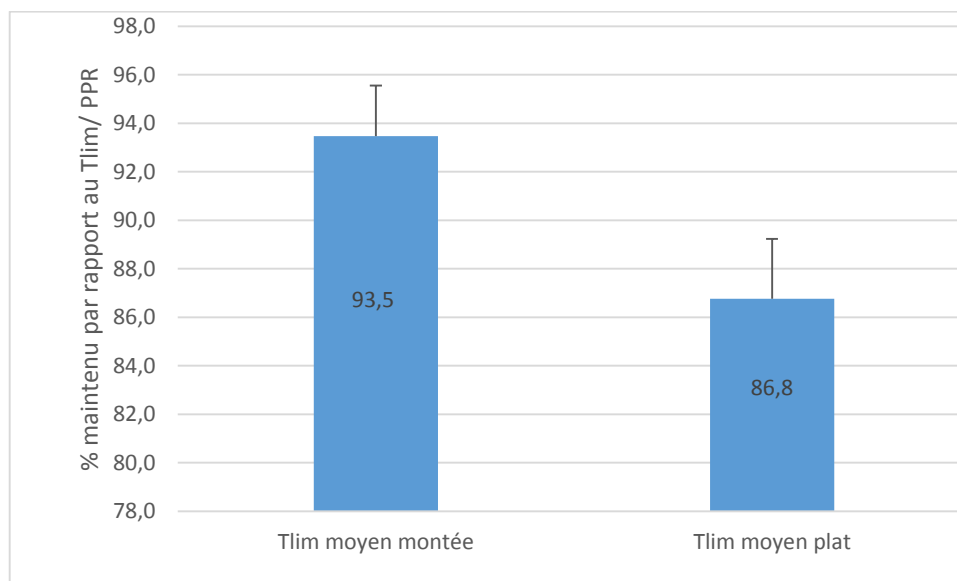
T_{lim} moyen défini par le PPR (sec)	T_{lim} moyen réalisé sur le plat (sec)	Corrélation	P-value	Biais	Intervalle de confiance (IC) 95%
285	247	0,86	P=0,0001	-37,8	(-45,4;-30,1)

3) Test de significativité

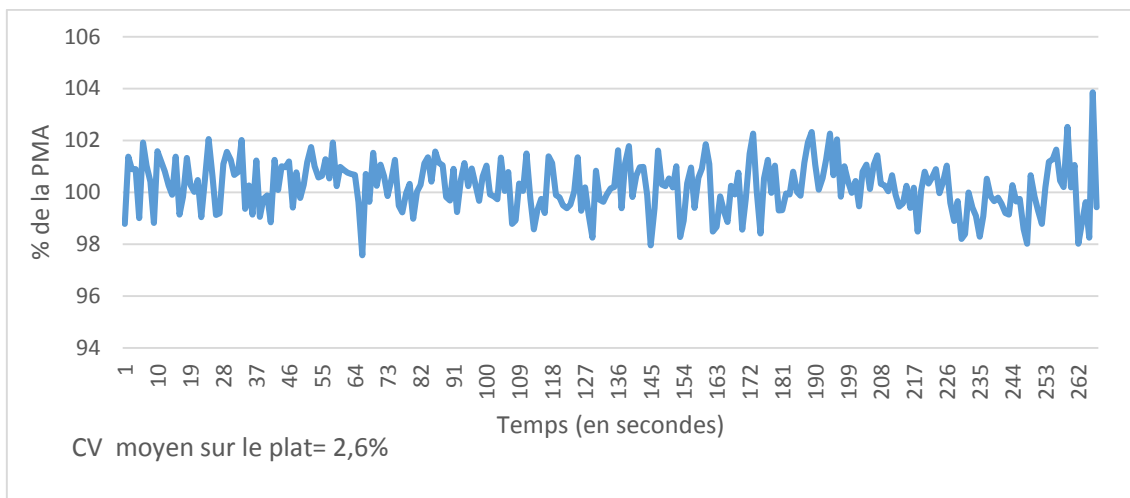
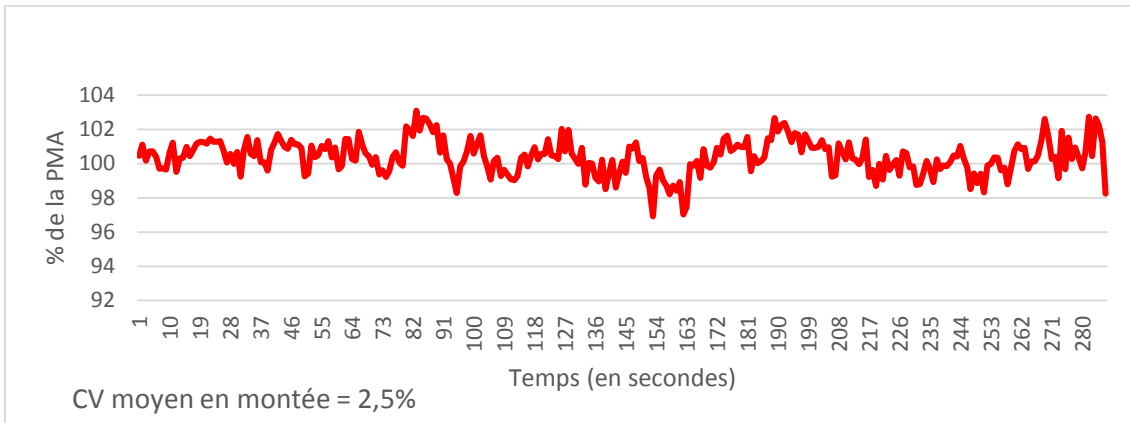
Le test non-paramétrique de Friedman a été utilisé en présence de k échantillons appariés correspondant à k traitements portant sur les mêmes blocs, afin de mettre en évidence une différence entre les traitements. Le test a montré dans un premier temps qu'il existait une différence significative ($p < 0,05$) entre le T_{lim} déterminé par le PPR et les T_{lim} maintenus sur terrain plat et en montée. La méthode de comparaisons multiples (Nemenyi, 1963) permettait ensuite de comparer les différentes conditions (PPR et terrain) entre elles. Le T_{lim} maintenu sur le plat était significativement inférieur à celui déterminé par le PPR. Aucune différence significative n'a été trouvée entre le T_{lim} en montée et celui déterminé par le PPR.

Le T_{lim} moyen en montée correspondait à 93% du T_{lim} déterminé par le PPR contre 86% pour le T_{lim} sur le plat. Le T_{lim} en montée était supérieur de 19,4 sec soit 7,3%, comparé au T_{lim} sur le plat (Figure 5.).

Figure 5 : Influence du terrain sur le T_{lim} à PMA en fonction du % du T_{lim} déterminé avec le PPR.



4) Evolution des Coefficients de Variation, Charge Affective et Fréquence Cardiaque lors des tests



Les écarts-types n'ont pas été introduits dans les graphiques représentant l'évolution des CV de la PMA et de la FC au cours des tests afin de faciliter la lecture des différentes figures.

Figure 6 : CV et évolution moyenne de la Pméca (en % de la PMA) lors des tests de T_{lim} en montée (1^{ère} courbe) et sur le plat (2^{ème} courbe).

Les faibles CV lors des tests en montée et sur le plat (respectivement 2,5 et 2,6%) montrent que la PMA a bien été maintenue lors des différents tests. La PMA a tout de même été plus difficile à maintenir sur le plat ou une faible variation de vent ou de revêtement font varier la Pméca. Plusieurs essais ont donc été nécessaires avant de réussir les tests.

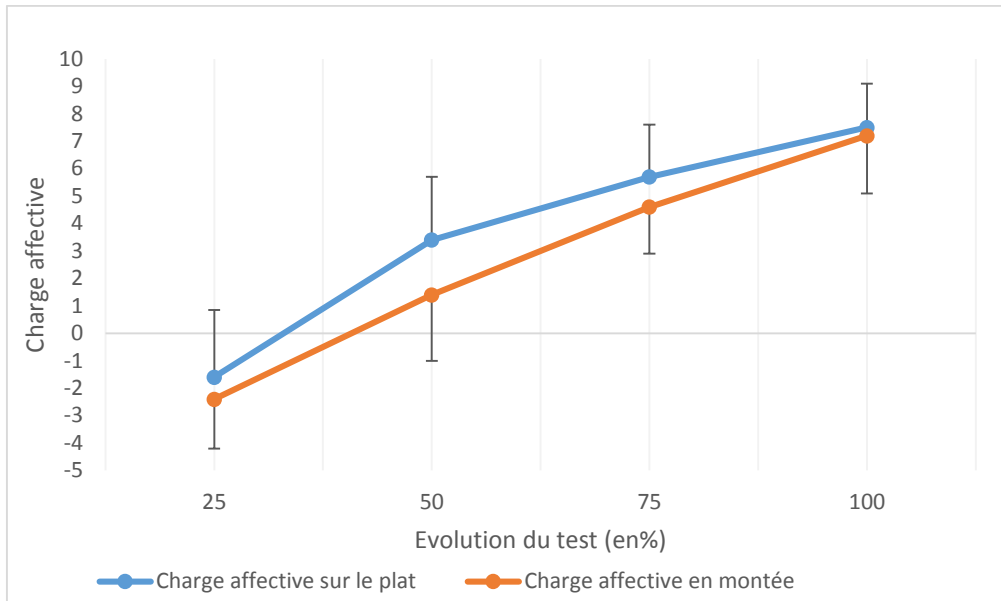


Figure 7 : Evolution de la CA lors des tests de T_{lim} sur le plat et en montée.

La nature du terrain n'influait pas la CA lors des tests de T_{lim} . La difficulté perçue était semblable (aucune différence significative) entre les 2 conditions. En revanche, le plaisir était supérieur en montée. Une différence significative ($p < 0,05$) sur l'échelle du plaisir a été relevée lors du premier quart de l'épreuve.

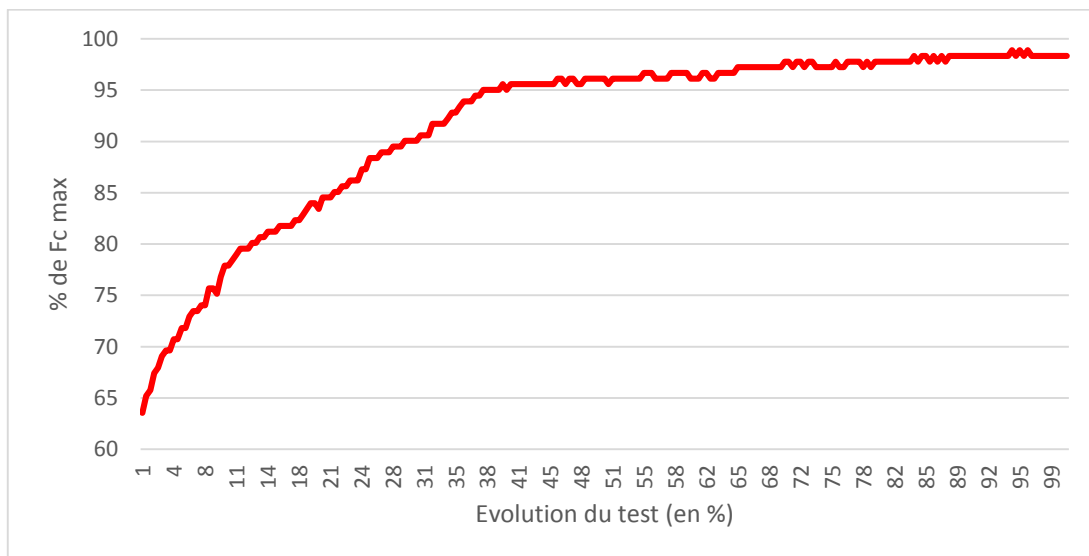


Figure 8 : Evolution moyenne de la FC lors des tests de T_{lim}

L'évolution de la FC lors des différents tests montre que les sujets n'ont en moyenne pas atteint leur FC max. Aucune différence significative n'a été relevée entre les pourcentages de FC max atteints par les sujets à la fin des tests. En revanche, on remarque un plateau de FC vers la fin des tests (85% de la fin).

V. Discussion

Les résultats de cette étude montrent que le T_{lim} moyen maintenu en montée est de 266 sec (soit 4,26 min,) pour les tests en montée soit 93% du T_{lim} déterminé par le PPR contre 247 sec (soit 4,07 min) soit 86% du T_{lim} PPR. Il existe une différence significative ($p < 0,0001$) entre le T_{lim} déterminé par le PPR et le T_{lim} obtenu sur terrain plat. En revanche, aucune différence significative n'a été trouvée entre le T_{lim} PPR et le T_{lim} en montée. Effectivement, les graphiques de Bland et Altman montrent un biais important lors des tests de terrain plat (-38 secondes) contre un faible biais lors des tests en montée (-18 secondes). La dispersion des valeurs autour de l'intervalle de confiance est plus importante lors des tests de terrain plat. On observe des valeurs de T_{lim} inférieures (jusqu'à 52 sec sur terrain plat contre 27 sec en montée si l'on se réfère au T_{lim} déterminée par le PPR). Les sujets avaient donc plus de difficultés à maintenir la PMA sur terrain plat.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences de résultats. Lorsque le cycliste se déplace, il fait face à 3 principales résistances à l'avancement. La traînée aérodynamique de l'air (R_a) dépendant de l'aérodynamisme du sujet (SC_x , coefficient de pénétration dans l'air), la force de gravité due au poids du cycliste et de son équipement et la résistance aux roulements (R_r). Sur terrain plat, R_a constitue le principal obstacle à l'avancement. À 50 km.h⁻¹, environ 90% de la $P_{méca}$ est utilisé pour vaincre R_a (Kyle, 1979). En revanche, lorsque la route s'élève, le poids de l'ensemble coureur-bicyclette devient la résistance principale qui s'oppose au déplacement. Le SC_x sur terrain plat et le poids du cycliste et de son équipement en montée sont donc 2 paramètres qui pourraient avoir un effet sur le T_{lim} des athlètes.

Si on observe le PPR de chaque coureur, les puissances record enregistrées entre 3 et 7 min ont été obtenues en montée. Les valeurs de T_{lim} réalisées en montée se rapprochent plus du T_{lim} déterminé par le PPR. Il serait intéressant de faire des tests auprès de coureurs aux profils totalement différents afin de voir si le T_{lim} à PMA est systématiquement supérieur en montée.

Pour l'ensemble des tests effectués, le T_{lim} maintenu est systématiquement inférieur au T_{lim} PPR quelles que soient les conditions (plat et monté). Les $P_{méca}$ qui apparaissent dans ces profils correspondent à des puissances record, qui sont généralement réalisées en compétition ou l'aspect motivationnel a un rôle prépondérant dans la production de performance (Gillet *et coll.* 2009). La CA prend en compte la motivation de l'athlète lors de son effort. En observant l'évolution de la CA au fil des tests, l'effort perçu croît de manière linéaire lors de chaque test quelle que soit la condition. Quant au plaisir perçu, celui-ci diminuait de manière linéaire.

Le niveau de CA atteint à la fin des tests montre que les athlètes sont allés au maximum de leur capacité car l'effort perçu moyen était de 9,1 (échelle CR 10). En revanche, le plaisir moyen perçu en fin de test était de 1,7 (échelle CR 10). Sans réel enjeux, l'athlète percevait l'effort comme étant maximal mais en ressentant un plaisir moindre. Sa performance était donc affectée par ce manque de motivation. Ces résultats suggèrent que le T_{lim} est certainement influencé par l'impact motivationnel de l'athlète.

Les coureurs participant aux tests de T_{lim} ne disposaient pas de capteur de puissance auparavant. Ils n'avaient donc pas de données de $P_{méca}$ des années précédentes et donc pas de PPR. Les valeurs de $P_{méca}$ record étaient donc récentes. Il est possible que le PPR ne soit donc pas encore bien établi. Si les $P_{méca}$ record entre 10 min et 4 heures viennent à être modifiées, la régression linéaire est elle aussi directement affectée par un changement de ces $P_{méca}$. La PMA et le T_{lim} seront donc dépendants de cette régression. Un PPR valide est donc primordial pour utiliser cette méthode de détermination de la PMA et son T_{lim} .

Les T_{lim} en montée se rapprochaient des valeurs de T_{lim} déterminées par le PPR. Pour des sujets disposant de capteur de puissance depuis plusieurs années, il pourrait y avoir des différences plus importantes de temps de maintien dû à l'évolution de l'état de forme du sujet au cours des saisons. Sassi *et coll.* (2008) ont notamment observé une augmentation significative de la PMA pour un groupe de 13 cyclistes professionnels entre la période de repos hivernal (418 ± 46 W), la fin de l'entraînement hivernal (443 ± 48 W) et la période compétitive (455 ± 48 W). Cela suggère d'utiliser cette méthode en période compétitive. Il serait intéressant de comparer le PPR de plusieurs coureurs au fil des années afin de vérifier si la PMA et son T_{lim} varient significativement.

L'intervalle de confiance tracé autour de la régression linéaire du log t entre 10 min et 4 heures correspond à un écart type résiduel. Cet intervalle permet d'accepter des valeurs de $P_{méca}$ record qui ne passent pas par la droite de régression. Les valeurs de PMA et T_{lim} peuvent donc être surestimées ou sous-estimées. Pour le sujet représenté sur la Figure 2, la PMA déterminée est de 351 W. La valeur estimée par la droite de régression est quant à elle de 360 W soit une différence de 2,5%. La méthode de détermination accepte donc une faible marge d'erreur qui pourrait influencer le T_{lim} .

Les valeurs de $P_{méca}$ utilisées pour déterminer la PMA et son T_{lim} sont comprises entre 3 et 7 minutes et espacées de 30 secondes en 30 secondes. Des $P_{méca}$ intermédiaires pourraient intégrer l'intervalle de confiance avant les valeurs utilisées. La PMA et son T_{lim} pourraient

donc être différents si l'on propose un nombre plus importants de valeurs de $P_{méca}$ entre 3 et 7 minutes.

Plusieurs applications pratiques pour le processus d'entraînement peuvent être tirées de cette étude. La PMA déterminée à partir du PPR peut être utilisée dans un processus d'entraînement à condition d'avoir un coureur en pleine possession de ses moyens et apte à effectuer des exercices à intensité égale à la PMA. Le T_{lim} associé à la PMA est quant à lui plus difficile à utiliser car il est dépendant de multiples facteurs (internes et externes). Un exercice à PMA semble plus facilement soutenable en montée que sur le plat mais il dépendrait du profil de coureur qui effectue le test.

VI. Conclusion

L'objectif de l'étude était de déterminer le T_{lim} sur différents types de terrain (plat et en montée) à une intensité égale à PMA déterminée à partir du PPR auprès de 4 jeunes cyclistes.

La PMA et son T_{lim} semblent être surestimés car les temps de maintien sur terrain plat et en montée sont systématiquement inférieurs aux valeurs données par le PPR. Le type de terrain influence directement le temps de maintien de la PMA. Celle-ci peut être soutenue en moyenne 19 secondes de plus en montée que sur terrain plat. Les résistances à l'avancement expliqueraient cette différence, tout comme le profil des coureurs qui effectuent les tests. Le T_{lim} à PMA semble reproductible en montée, où de faibles variations des conditions externes permettent d'obtenir des valeurs de T_{lim} assez proches. Le T_{lim} semble aussi dépendant de la motivation et la forme du coureur. L'utilisation de cette méthode semble être fiable mais elle doit être utilisée avec précaution. En effet, elle nécessite un PPR valide, car les valeurs de PMA et T_{lim} sont directement affectées par la droite de régression du $\log t$ entre 10 min et 4 heures. De plus, les valeurs de PMA varient au cours de l'année, il serait donc judicieux d'utiliser ces valeurs en période compétitive. Les futures investigations devraient se faire auprès d'un groupe de coureurs plus conséquent, disposant d'un PPR valide, et de profils différents. Une légère modification de la méthode de détermination permettrait aussi de disposer de valeurs de PMA et T_{lim} plus précises.

VII. Bibliographie

Baron B, Moullan F, Deruelle F, Noakes TD (2009). The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events. *Br J Sports Med*, 45(6): 511-7.

Bertucci W, Duc S, Villerius V, Pernin JN, Grappe F (2005). Validity and reliability of the powertap mobile cycling powermeter when compared the SRM device. *Sports Med*; 26: 868-873.

Billat LV, Koralsztein JP (1996). Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med* 22: 90-108.

Billat V, Faina M, Sardella F, Marini C, Fanton F, Lupo S, Faccini P, de Angelis M, Koralsztein JP, Dalmonte A (1996). A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics* 39: 267-277.

Borg, G (1990). Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scand J Work Environ Health*, 16 Suppl 1, 55-58.

Bosquet, L, Leger, L, & Legros, P (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Medicine*, 32(11), 675-700.

Bouillod A, Pinot J, Soenen F, Ouvrard T, Grappe F (2014). Maximal aerobic power assessment is dependent of the nature of the pedaling activity, *IJSPP (in press)*.

Caldwell G E, Li L, McCole S D, & Hagberg, J M (1998). Pedal and Crank Kinetics in Uphill Cycling. *J Appl Biomech*, 14, 245-259.

Cazorla G (1990). Test de terrain pour évaluer la capacité aérobie et la vitesse aérobie maximale. *Eds : ACTSCHNG & AREAPS* : 151-173.

Cooper K H (1968). A means of assessing maximal oxygen intake. *JAMA*. 203(3): 201-4.

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

Faina M, Billat V, Squadrone R, De Angelis M, Koralsztein JP, Dal Monte A (1997). Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 76(1): 13-20.

Faria E W, Parker D L, Faria I E (2005). The science of cycling: factors affecting performance - part 2. *Sports Med* 35: 313-337.

Faria E W, Parker D L, Faria I E (2005). The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med* 35: 285-312.

Friedman M (1937). The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *Journal of the American Statistical*, 32 (200): 675-701.

Gardner, A S, Stephens, S, Martin, D T., Lawton, E, Lee H, & Jenkins D (2004). Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(7), 1252-1258.

Gillet N, Berjot S et Paty B (2009). Profil motivationnel et performance sportive. *Psy fr*54(2), 173-190.

Grappe, F. (2009). *Cyclisme et optimisation de la performance: Science et méthodologie de l'entraînement*. Bruxelles: de Boeck Université.

Grappe, F. (2012). *Puissance et performance en cyclisme*. Bruxelles: de Boeck Université.

Gonzalez-Haro C, Galilea PA, Drobnic F, Escanero JF (2007). Validation of a field test to determine the maximal aerobic power in triathletes and endurance cyclists. *Br J Sports Med* 41: 174-179.

Kachouri, M, Vandewalle H, Billat V, Huet M, Thomaïdis M, Jousselin E, Monod H (1996b). Critical velocity of continuous and intermittent running exercise. An example of the limits of the critical power concept. *European Journal of Applied Physiology*, 73, 484-487.

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

Lavoie N F, Mercer T H (1987). Incremental and constant-load determinations of VO₂max and maximal constant-load performance time. *Can J Sport Sci*, 12: 229-32.

Léger L, Boucher R (1980). An Indirect Running Multistage Field Test. *University of Montreal Track Test, UM-TT*.

Leger L, Thibault M G, Gode M J - M (1982). Épreuve cycliste progressive sur piste pour déterminer la puissance aérobie maximale et fonctionnelle. *Med Sport*, 56454-460.

Marion G A, Leger L A (1988). Energetics of indoor track cycling in trained competitors. *Int J Sports Med* 9:234–239.

McCole S D, Claney K, Conte J C (1990). Energy expenditure during bicycling. *J Appl Physiol*, 68:748–753.

Nemenyi P B (1963). Distribution-free Multiple Comparisons. *PhD thesis, Princeton University*.

Nimmerichter A, Williams C, Bachl N, Eston R (2010). Evaluation of a Field Test to Assess Performance in Elite Cyclists. *Int J Sports Med* 31: 160-166.

Padilla S, Mujika I, Cuesta G et al. (1996). Validity of a velodrome test for competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol*, 73:446–451.

Peronnet F, Thibault G (1987). Physiological analysis of running performance: revision of the hyperbolic model. *J Physiol* 82: 52-60.

Péronnet F, Thibault G (1984). Consommation maximale d'oxygène, endurance et performance en course à pied. *Macolin*, 7: 15-8.

Peronnet F, Thibault G (1989). Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol*, 67: 453-465.

Pinot J, Grappe F (2011). The power profile to assess performance in elite cyclists. *Int J Sports Med*, 32: 839-844.

Pinot J, Grappe F (2014). Détermination de la PMA à partir du profil de puissance record en cyclisme. *3ième journée Gilles Cometti, Dijon*.

Pinot J, Grappe F. Determination of maximal aerobic power on the field in cycling. *Journal Science of Cycling*, 3(1): 26-31, 2014.

Ricci J, Leger L A (1983). VO_{2max} of cyclists from treadmill, bicycle ergometer and velodrome tests. *Eur J Appl Physiol*, 50:283–289.

Sassi A, Impellizzeri F M, Morelli A, Menaspà P, Rampinini E (2008). Seasonal changes in aerobic fitness indices in elite cyclists. *Appl Physiol Nutr Metab*, 33: 735-742.

Scherrer J, Monod H (1960). Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme. *J Physiol*, 52: 419-501

Villeneuve A (1996). Mesure de la durée maximale d'un exercice à une puissance de 100% du VO₂max. *[MSc thesis], Montréal:Université de Montréal.*