

Université de Franche-Comté
U.P.F.R. Sports Besançon

Projet Tuteuré
Diplôme de MASTER Spécialité : EMIS

**INFLUENCE DU TERRAIN LORS D'UN EFFORT RÉALISÉ À
PUISSANCE MAXIMALE AÉROBIE EN CYCLISME**

Anthony BOUILLOD, Flavien SOENEN et Théo OUVRARD

Directeur Projet : Frédéric GRAPPE (MCU - HDR)
EA4660 Département Sport - Santé C3S

Année 2013 - 2014

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué à la réussite de ce travail :

Tout d'abord à Frédéric Grappe et Julien Pinot,

Pour leur investissement sans faille à nos côtés. Un grand merci pour leur disponibilité, pour la mise à disposition de matériel, mais également pour nous partager leur passion pour la recherche et pour l'optimisation de la performance en cyclisme.

Au Pôle espoir de cyclisme de Franche-Comté, au Pôle France VTT ainsi qu'à l'ensemble des cyclistes qui ont participé à cette étude,

Pour leur confiance et surtout pour leur implication et leur intérêt qui aura été l'un des piliers de l'avancement de nos travaux et qui les ont rendu aussi intéressants à tout point de vue.

A nos proches, qui nous aident et nous soutiennent dans la réalisation de nos projets.

A Alexandre Abel

	Temps (heures)		
	A. Bouillod	F. Soenen	T. Ouvrard
Organisation, gestion du planning, préparation des tests	5	5	5
Tests d'habituat	5	6	2
Passage des tests	25	22	22
Rédaction compte rendu individuel	5	5	0
Analyse des données	25	10	10
Rédaction du mémoire et recherche bibliographique	30	10	10
Total	95	58	49

TABLE DES MATIÈRES

I.	INTRODUCTION GÉNÉRALE	4
II.	MÉTHODOLOGIE	7
	Sujets	7
	Procédure expérimentale	7
	Test incrémental	7
	Tests de terrain	8
	Critère principal.....	8
	Critères secondaires.....	8
	Analyse statistique.....	9
III.	RÉSULTATS	9
	Relation entre PMA et $P_{\text{méca}}$ 4 min	9
	Influence du terrain sur la $P_{\text{méca}}$ 4 min.....	11
	Influence du terrain sur la charge affective sur 4 min	14
IV.	DISCUSSION	15
V.	PERSPECTIVES.....	18
VI.	BIBLIOGRAPHIE	19
	ABSTRACT	22

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le domaine du sport, les tests d'évaluation du potentiel physique sont destinés à évaluer la capacité de performance du sportif. C'est pourquoi ils nécessitent une approche spécifique pour chaque discipline. La performance dans les événements de longue distance a longtemps été déterminée par la consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) et par la capacité à exploiter un haut pourcentage de la VO_{2max} sur une durée prédéfinie [11]. À présent, l'analyse de la puissance mécanique ($P_{méca}$) offre une meilleure précision de la performance en cyclisme [26, 29]. Il est donc possible de mesurer la Puissance Maximale Aérobie (PMA) qui correspond au niveau de $P_{méca}$ à partir duquel la VO_2 n'augmente plus et commence à plafonner (VO_{2max}). Les différentes méthodes disponibles pour évaluer la PMA sont nombreuses dans la littérature. Cependant on observe une certaine disparité des protocoles de tests permettant de mesurer le potentiel maximal aérobie du cycliste. Chaque centre d'évaluation semble avoir son propre protocole, de même que les différentes variables mesurées sont très disparates d'un centre à l'autre. La question reste donc ouverte pour déterminer quel modèle devrait être utilisé parmi les nombreux disponibles dans la littérature, et comment les utiliser dans la prescription des intensités d'entraînement. Les premières études sur la relation entre l'intensité et la durée de l'effort, datant d'environ un demi siècle [32, 38], ont suscité de nouvelles investigations suite, 1) à la démocratisation des capteurs de puissance au sein du peloton et 2) du fait que la performance réalisée dans une série de tests fournit une description plus complète et probablement plus valide de la relation puissance-temps qu'une performance réalisée au cours d'un seul test. Ces dernières années, la plupart des données provenaient des laboratoires mais dorénavant on a la possibilité de mesurer la $P_{méca}$ développée par les cyclistes en conditions réelles de locomotion grâce à des capteurs de puissance embarqués sur les vélos. Les athlètes produisent durant toute l'année des efforts maximaux sur une large gamme de durées. Il faut tout de même préciser que la cohérence des performances reste dépendante de la fiabilité des capteurs de puissance utilisés [21].

Certains chercheurs se sont intéressés à la relation entre les variables physiologiques obtenues au cours de tests en laboratoire et les performances obtenues sur le terrain [2, 4, 6, 26]. Des corrélations ont d'ailleurs été trouvées entre des performances sur terrain plat et des valeurs de PMA obtenues au cours d'un test incrémental [3, 4, 6]. En revanche, ces auteurs ne se sont pas intéressés à la $P_{méca}$. Nimmerichter *et al.* [30] ont évalué la $P_{méca}$ à

travers des tests de terrain de 4 minutes sur parcours plat. Il en résulte que ce test de terrain était un bon prédicteur de la PMA mesurée au cours d'un test incrémental en laboratoire (25 W/min). Ces résultats semblent aller dans le même sens que ceux de Quod *et al.* [36] qui n'ont pas mesurés de différences significatives entre deux profils de puissance (entre 1 min et 10 min) établis dans deux conditions différentes de laboratoire et de terrain (compétition). Les données de $P_{méca}$ recensées ont également permis l'établissement d'un suivi longitudinal [25]. L'analyse des données en compétition [41, 42, 43] sur une très large gamme de durée d'exercices (entre 1 sec et 4h) et dans différentes conditions d'effort permet d'obtenir une quantité très importante de données qui autorisent l'établissement d'un Profil de Puissance Record (PPR) en fonction du temps d'exercice [34]. La relation hyperbolique observée entre la $P_{méca}$ et le temps peut être expliquée par les actions combinées des différents processus bioénergétiques [28]. Ainsi, le PPR moyen de dix sept cyclistes de haut niveau peut être exprimé par l'équation suivante: $P_{méca} = 9.85.t^{-0.17}$ avec des durées comprises entre 1s et 4h [34]. Le PPR est donc un outil de travail scientifique intéressant à prendre en considération pour l'évaluation et le suivi du potentiel physique du cycliste [33]. Dans la continuité de leurs travaux Pinot et Grappe [35] ont investigué une méthodologie de détermination de la PMA à partir du PPR en considérant que le temps de maintien à PMA est différent selon les athlètes. Cette méthode se base sur une détermination statistique de la PMA: un intervalle de confiance (± 2 écarts-types résiduels à la régression) est tracé autour de la régression linéaire entre les $P_{méca}$ record (entre 10 min et 4 h) et le logarithme du temps. L'extrapolation d'un intervalle de confiance à partir de la modélisation linéaire du métabolisme aérobie permet d'observer la dérive des $P_{méca}$ records en dehors de l'intervalle de confiance lorsque la part du métabolisme anaérobie devient prépondérante dans la production de puissance. La PMA est déterminée à partir du premier point record inclus dans l'intervalle de confiance. T_{MAP} correspond au temps de maintien de la PMA. Une étude préliminaire a été réalisée par Pinot et Grappe 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 al.* [8] et Faina *et al.* [16]. En effet, ces auteurs ont étudié la notion de temps limite à VO_{2max} chez des cyclistes de niveau national et les résultats ont montré que ces athlètes possédaient un temps limite à VO_{2max} moyen de 3,70 (1,52) minutes [8] et 3,75 (1,57) minutes [16]. Tous ces résultats suggèrent que le temps de maintien à PMA est plus proche de 4 min que de 5 min [1].

Afin de maximiser leurs performances, les athlètes doivent recourir à une intensité optimale déterminée en partie par la nature de la tâche et leurs propres aptitudes physiologiques et psychologiques. Cette capacité, appelée stratégie de gestion de l'allure peut être envisagée comme une négociation interne entre le niveau de perception associée à l'exercice à un instant donné et le niveau attendu de fatigue [18]. La lecture de travaux effectués en psychologie montre que les émotions d'ordre positif tel que le plaisir devraient également être prises en compte car elles existent durant l'exercice, au même titre que la motivation à un rôle primordiale dans la réalisation d'une performance. Afin de prendre en compte la motivation dans le processus de régulation de l'allure, Baron *et al.* [5] ont défini la charge affective (CA) comme la différence entre l'effort et le plaisir. La motivation correspond ici au niveau d'acceptation de CA. Selon le modèle proposé, le désir de sélectionner une intensité plus ou moins élevée à un moment de l'exercice dépend ainsi de la différence entre le niveau d'acceptation de CA pour une durée donnée et le niveau de cette CA à ce moment.

L'objet de cette étude est d'analyser 1) la relation entre la PMA et la $P_{méca}$ mesurée à partir d'un contre-la-montre de 4 min (CLM4min) réalisé en condition de laboratoire, plat et montée et 2) la stratégie de gestion de l'allure utilisé dans les différents CLM4min dans l'optique de réaliser la meilleure performance. Padilla *et al.* [31] ont étudié différents types de contre la montre chez des cyclistes professionnels. Dans de longs contre-la-montre sur le plat (1h06) et en montée (1h15), les auteurs ont rapporté des puissances moyennes respectives de 359 W et 376 W, soit une augmentation de 4,7 % pour l'effort en montée. Malgré le fait que cette différence n'était pas statistiquement différente, nous faisons l'hypothèse que la $P_{méca}$ devrait être supérieure en montée due au fait que le cycliste réalise un effort "en prise" en luttant contre la gravité.

II. MÉTHODOLOGIE

1. Sujets

Seize cyclistes hommes volontaires et en bonne santé (âge = $19,8 \pm 1,7$; taille = $179,1 \pm 5,9$; masse corporelle = $68,5 \pm 6,1$) ont participé à cette étude. Tous les sujets étaient des cyclistes compétiteurs de niveau régional à international. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant.

	M	SD
Âge	19,8	1,7
Taille (cm)	179,1	5,9
Poids (kg)	68,5	6,1
PMA (W)	361	42

Tableau 1. *Caractéristiques des sujets.*

2. Procédure expérimentale

L'étude comprenait quatre sessions séparés d'au moins 48 h chacune. Au cours de la première session, les sujets ont réalisé un test incrémental en laboratoire sur un cycloergomètre pour déterminer la PMA. Au cours de la session 2, les sujets ont réalisé deux tests d'habituation sur le terrain. Enfin, au cours des sessions 3, 4 et 5 les sujets ont réalisé dans un ordre randomisé, trois CLM4min dans différentes conditions expérimentales : en laboratoire sur un cycloergomètre, sur le plat et en montée (pente moyenne de 8%).

3. Test incrémental

Les sujets ont effectué les tests en laboratoire sur un SRM Indoor Trainer (Julich, Germany) équipé de pédales automatiques, en position assise. A noter que le système SRM est considéré comme un système valide pour la mesure de la $P_{m\acute{e}ca}$ [19, 24]. La charge de travail initiale était fixée à 100 W et était incrémentée de 30 W toutes les deux minutes. Le choix de la fréquence de pédalage était libre. Le test était conduit jusqu'à l'épuisement avec un CR_{10} compris entre 9 et 10 ainsi qu'une diminution significative de la fréquence de

pédalage. La PMA était déterminée de la façon suivante: lorsque le dernier palier d'effort était maintenu sur la durée totale, la PMA correspondait à la $P_{méca}$ moyenne maintenue sur le palier. En revanche, si l'athlète ne pouvait pas maintenir l'effort sur toute la durée du palier, la PMA était calculée en prenant en considération la $P_{méca}$ moyenne du palier inférieur et la $P_{méca}$ moyenne sur le dernier palier. Elle était calculée à partir de la formule suivante:

$$PMA = P_{méca \text{ palier inférieur}} + [(P_{méca \text{ dernier palier}} - P_{méca \text{ palier inférieur}}) \times \text{Temps}_{\text{dernier palier}}]$$

L'enregistrement de la $P_{méca}$, de la fréquence cardiaque et de la cadence de pédalage était réalisé sur l'ensemble du test. La difficulté de l'effort était également mesurée subjectivement grâce au CR₁₀ de Borg à la fin de chaque palier d'effort.

4. Tests de terrain

Les tests terrain ont été réalisés avec les vélos personnels des athlètes équipés d'un capteur de puissance de type Powertap (Madison, USA) et d'un compteur Garmin Edge 500 (Olathe, USA). Ce dernier se connecte aux capteurs de puissance ANT+ pour afficher la $P_{méca}$. La validité de la $P_{méca}$ du système Powertap est excellente car elle est similaire à celle du SRM, précision entre 1% et 2% [7]. Cet appareil constitue avec le SRM le système de référence de la mesure de la $P_{méca}$. Les tests sur cycloergomètre et sur le plat ont été réalisés en position assise alors que pour le test en montée, les athlètes n'avaient pas de consignes particulières et avaient la possibilité de se mettre en danseuse.

5. Critère principal

La $P_{méca}$ est le critère de jugement principal. Elle correspond à la quantité de travail (W, en joules, J) réalisée par unité de temps (t, s). $P_{méca}$ correspond donc à un débit d'énergie mécanique. Lors du pédalage, le pédalier est en rotation sous l'effet d'une force actionnée sur la pédale. Un couple (CM en N.m⁻¹) est alors généré avec une certaine vitesse angulaire instantanée (ω en rad.s⁻¹) pour produire la $P_{méca}$: $P_{méca} = \omega \times CM$

6. Critères secondaires

Le matériel utilisé a permis de mesurer différents paramètres remarquables dans la réalisation d'une performance en cyclisme: 1) la fréquence cardiaque, 2) la cadence de

pédalage et 3) la stratégie de gestion de l'effort avec l'analyse du coefficient de variation de la $P_{méca}$ et de l'évolution de la puissance par minute. Afin de prendre en compte la motivation dans le processus de régulation de l'allure, nous avons étudié la charge affective (CA) comme étant la différence entre l'effort [10] et le plaisir [5].

7. Analyse statistique

La moyenne et l'écart type étaient calculés pour l'ensemble des variables. L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel SigmaPlot 12.0 (Systat software Inc., San Jose, USA). Le coefficient de corrélation et le test de Bland et Altman [9] ont été réalisés pour établir la comparaison entre deux conditions d'évaluation, PMA et $P_{méca}$ développée durant le CLM4min ($P_{méca}$ 4min). La distribution Gaussienne des $P_{méca}$ 4min mesurées dans trois conditions a été vérifiée par le test de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors. L'ANOVA à deux facteurs a été utilisée pour étudier l'influence du temps par rapport aux différentes conditions d'évaluation. Dans le cas où le temps n'influçait pas la variable condition, un test post-hoc était utilisé: le LSD de Fisher. Le seuil de significativité choisit était: $p < 0,05$.

III. RÉSULTATS

1. Relation entre PMA et $P_{méca}$ 4 min

Le graphique de Bland et Altman entre la PMA et la $P_{méca}$ 4 min sur cycloergomètre indique en moyenne que la $P_{méca}$ 4min sur cycloergomètre surestime la PMA de $0,2 \text{ W.kg}^{-1}$ soit 4,6%. De plus, l'intervalle de confiance (IC) délimité par les limites d'accordance est de $0,81 \text{ W.kg}^{-1}$.

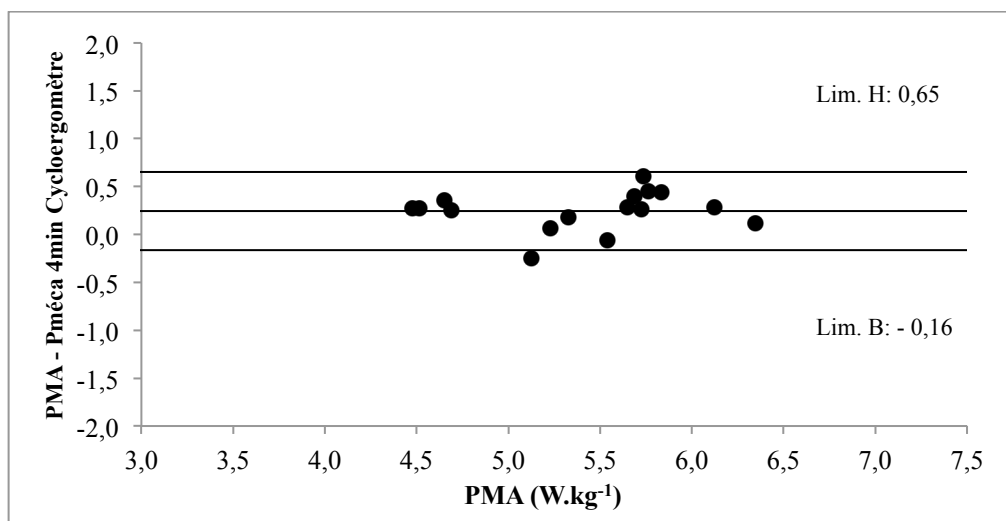


Figure 1. Représentation graphique de Bland et Altman, PMA vs. $P_{méca}$ 4 min Cycloergomètre.

Paramètres	Test PMA	CLM4min Cycloergomètre	Corrélation	Biais	IC 95%
Puissance brute (W)	360,8 ± 42,4	378,1 ± 50,9	0,96 (p<0,001)	17,4	-12,1 - 46,8
Puissance normalisée (W.kg ⁻¹)	5,3 ± 0,6	5,5 ± 0,6	0,94 (p<0,001)	0,2	-0,2 - 0,7
FC max (bpm)	191,2 ± 8,1	190,9 ± 5,9	0,75 (p<0,05)	-0,3	-10,9 - 10,2
Cadence moyenne (rpm)	96,7 ± 11,0	103,8 ± 6,8	0,68 (p<0,05)	7,1	-8,7 - 22,9

Tableau 2. Relation entre le test PMA et le CLM4min Cycloergomètre.

Le graphique de Bland et Altman entre la PMA et la $P_{méca}$ 4 min sur terrain plat indique en moyenne que la $P_{méca}$ 4min Plat surestime la PMA de 0,1 W.kg⁻¹ soit 1,8%. De plus, l'IC délimité par les limites d'accordance est de 1,61 W.kg⁻¹.

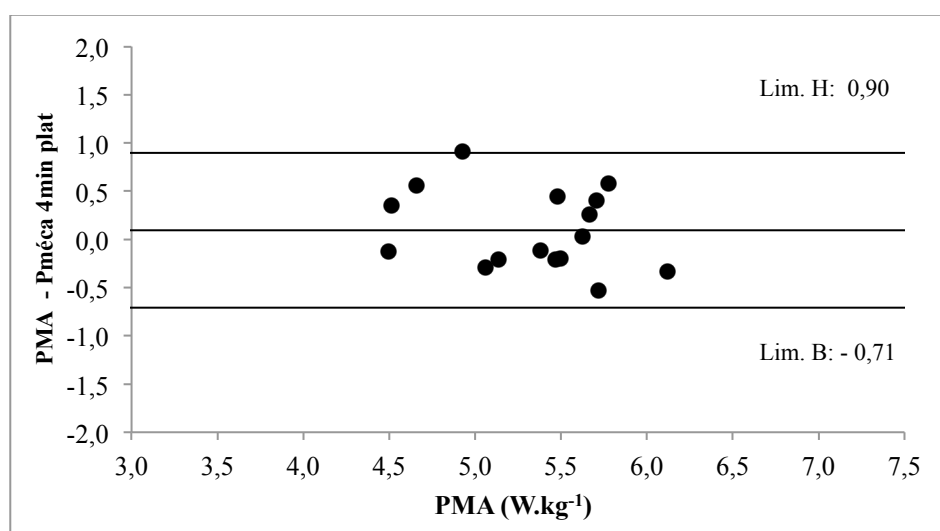


Figure 2. Représentation graphique de Bland et Altman, PMA vs. $P_{méca}$ 4 min Plat.

Paramètres	Test PMA	CLM4min Plat	Corrélation	Biais	IC 95%
Puissance brute (W)	360,8 ± 42,4	367,3 ± 37,5	0,76 (p<0,05)	6,5	-49,0 - 62,0
Puissance normalisée (W.kg ⁻¹)	5,3 ± 0,6	5,4 ± 0,5	0,71 (p<0,05)	0,1	-0,7 - 0,9
FC max (bpm)	191,2 ± 8,1	183,2 ± 7,7	0,79 (p<0,05)	-8,0	-18,0 - 2,0
Cadence moyenne (rpm)	96,7 ± 11,0	93,4 ± 6,4	0,23 (p>0,05)	-11,4	-25,5 - 19,0

Tableau 3. Relation entre le test PMA et le CLM4min Plat.

Le graphique de Bland et Altman entre la PMA et la $P_{méca}$ 4 min en montée indique en moyenne la $P_{méca}$ 4min Montée surestime la PMA de 0,7 W.kg⁻¹ soit 13,0%. De plus, l'IC délimité par les limites d'accordance est de 1,37 W.kg⁻¹.

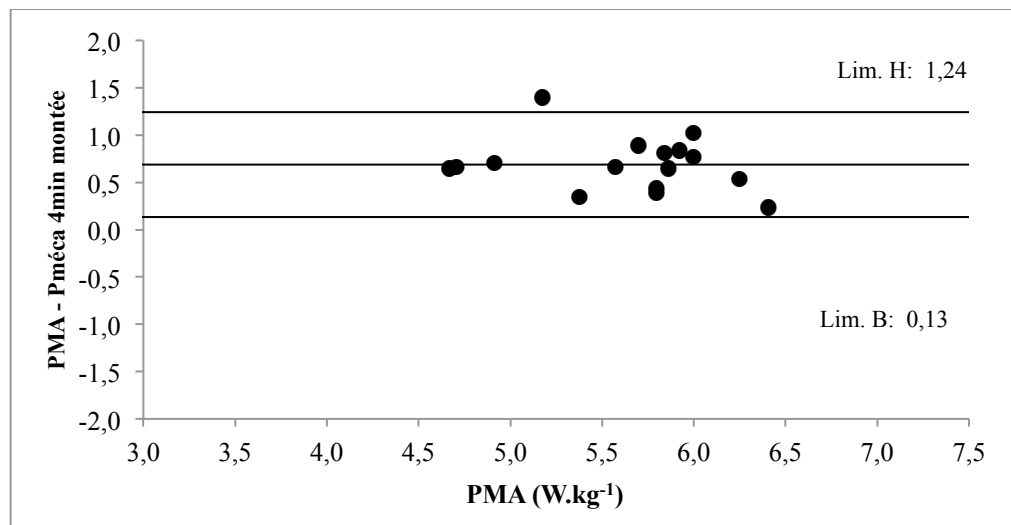


Figure 3. Représentation graphique de Bland et Altman, PMA vs. $P_{méca}$ 4 min Montée.

Paramètres	Test PMA	CLM4min Montée	Corrélation	Biais	IC 95%
Puissance brute (W)	360,8 ± 42,4	408,3 ± 45,2	0,89 (p<0,001)	47,5	7,3 - 87,7
Puissance normalisée (W.kg ⁻¹)	5,3 ± 0,6	6,0 ± 0,5	0,87 (p<0,001)	0,7	0,1 - 1,2
FC max (bpm)	191,2 ± 8,1	186,6 ± 6,1	0,75 (p<0,05)	-4,6	-15,1 - 5,9
Cadence moyenne (rpm)	96,7 ± 11,0	79,9 ± 5,6	0,64 (p<0,05)	-16,8	-33,6 - 0,0

Tableau 4. Relation entre le test PMA et le CLM4min Montée.

Pour terminer, l'analyse graphique de Bland & Altman nous montre que les valeurs sont bien dispersées au sein de l'intervalle de confiance, ce qui témoigne d'une bonne homogénéité de l'échantillon.

2. Influence du terrain sur la $P_{méca}$ 4 min

L'ANOVA à 2 facteurs indique dans un premier temps que le temps n'influence pas la $P_{méca}$ entre les différentes conditions. Ces dernières évoluent donc de la même manière en fonction du temps. D'après ce constat, il est possible de poursuivre la procédure d'analyse

statistique en étudiant les contrastes entre les différentes conditions. L'analyse indique qu'il existe des différences significatives de $P_{méca}$ ($p < 0,001$) entre les différentes conditions, que nous allons détailler.

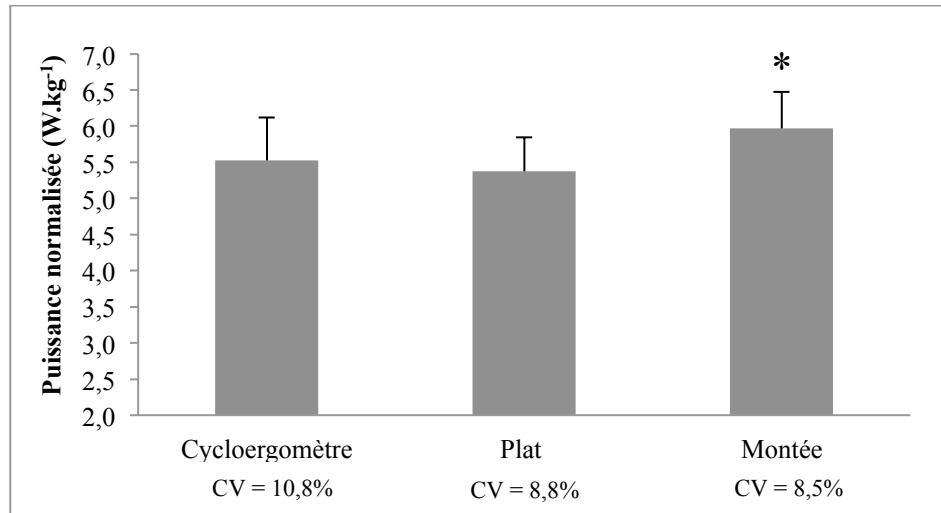


Figure 4. Influence du terrain sur la $P_{méca}$ normalisée lors d'un CLM4min.

D'un point de vue statistique, la puissance normalisée en montée est significativement plus élevée que la puissance normalisée sur le plat (+11,2%) et sur cycloergomètre (+8,0%) ($p < 0,001$). L'analyse indique également que le facteur temps présente des différences significatives ($p < 0,001$).

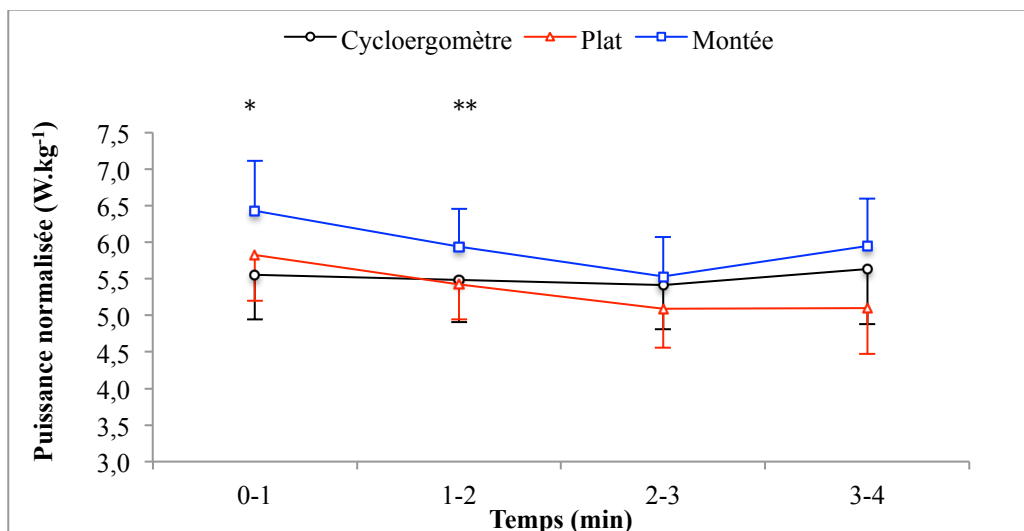


Figure 5. Influence du terrain sur l'évolution de la $P_{méca}$ normalisée lors d'un CLM4min.

* Différence significative entre la minute 1 et les minutes 2, 3, 4 ($p < 0,05$)

** Différence significative entre la minute 2 et la minute 3 ($p < 0,05$)

Malgré le fait que le temps n'influence pas la variable condition, il nous semblait incontournable d'évoquer la notion de stratégie de gestion de l'effort. Les courbes ci-dessous ont été obtenues en établissant la moyenne des valeurs de puissance pour les 16 sujets dans les différentes conditions expérimentales. De plus, le coefficient de variation (CV) était calculé dans l'optique de mesurer la dispersion autour de la moyenne obtenue ci-dessous.

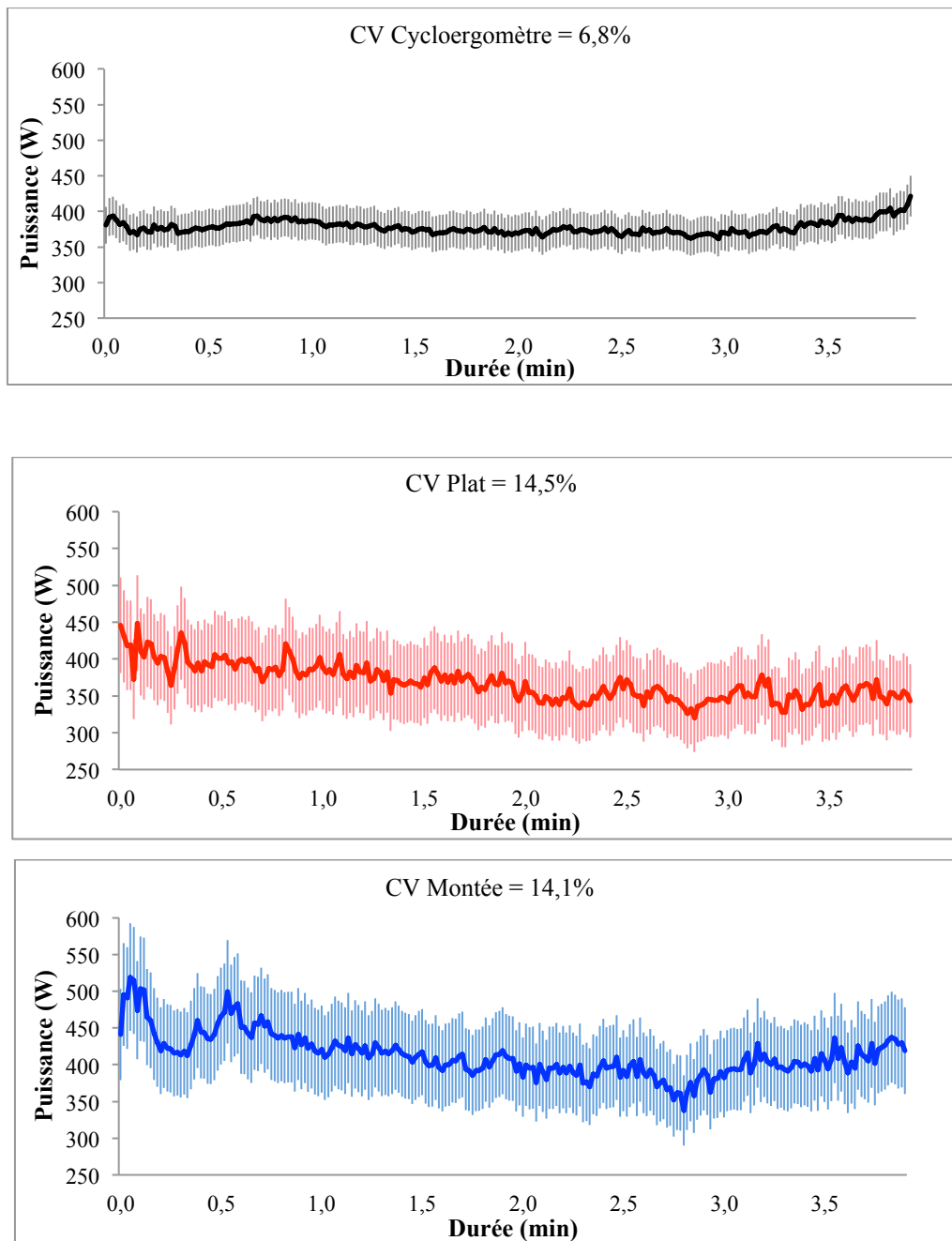


Figure 6. Représentation graphique du coefficient de variation et de l'évolution de la $P_{méca}$ dans différentes conditions expérimentales: Cycloergomètre, Plat et Montée.

Dans la condition Cycloergomètre, on observe que les athlètes accéléraient puis stabilisaient leur niveau de $P_{méca}$ de manière à être capable d'accélérer dans le final. Dans la condition Plat, le niveau de $P_{méca}$ avait tendance à diminuer tout le long du test excepté dans le final où la $P_{méca}$ se stabilisait. Enfin, dans la condition Montée, le niveau de $P_{méca}$ avait également tendance à diminuer tout le long du test mais l'accélération finale était toutefois bien présente.

Le CV calculé dans chaque condition expérimentale montre que la dispersion de la $P_{méca}$ autour de la moyenne est significativement plus élevée sur le terrain versus Cycloergomètre. En d'autres termes, il semble exister une part de bruit non maîtrisable sur le terrain, certainement due aux conditions environnementales qui déterminent certaines périodes d'incertitudes dans le choix de la $P_{méca}$.

3. Influence du terrain sur la charge affective sur 4 min

L'analyse statistique montre que le temps n'influence pas la CA dans les différentes conditions mais qu'il existe des différences significatives entre les conditions.

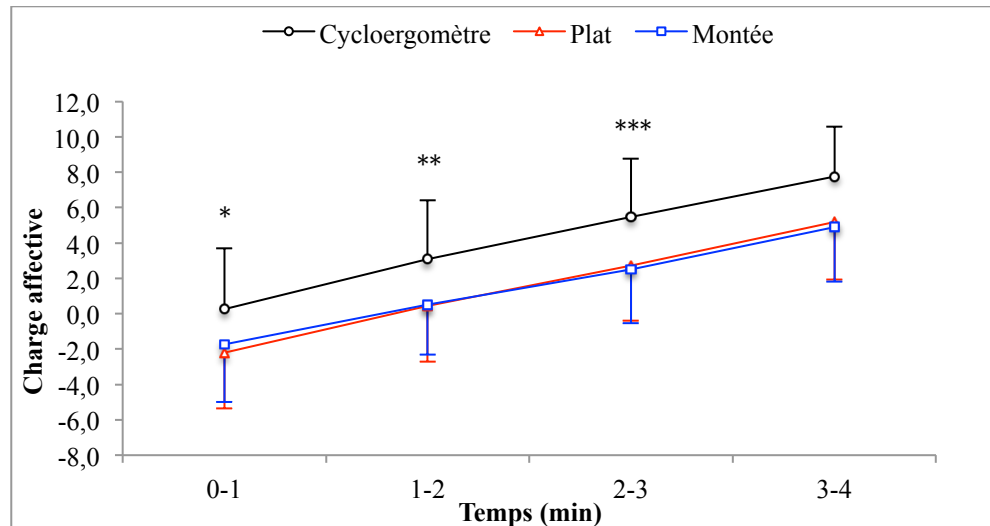


Figure 7. Influence du terrain sur la Charge Affective lors d'un CLM4min.

- * Différence significative entre la minute 1 et les minutes 2,3 et 4 ($p < 0,001$).
- ** Différence significative entre la minute 2 et les minutes 3 et 4 ($p < 0,001$).
- *** Différence significative entre la minute 3 et la minute 4 ($p < 0,001$).

La CA est significativement plus élevée en laboratoire que sur le terrain. Etant donné qu'elle représente la différence entre la difficulté et le plaisir, nous avons étudié ces deux

facteurs en détail. Il en ressort à la fois que la perception de la difficulté est significativement plus élevée en laboratoire ($p < 0,001$), mais également que le plaisir est significativement plus faible dans cette même condition ($p < 0,001$) comparée aux conditions de terrain.

IV. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était de mesurer l'influence des conditions de terrain lors d'un effort réalisé à PMA en cyclisme. L'analyse statistique a révélé plusieurs résultats intéressants qu'il convient d'interpréter pour mieux appréhender les perspectives qu'offre l'étude.

Les résultats entre PMA et $P_{méca}$ 4 min sont divergents selon les conditions. Concernant la condition Cycloergomètre, l'analyse de Bland & Altman indique un faible biais ($0,2 \text{ W.kg}^{-1}$) et un faible intervalle de confiance ce qui suggère que le CLM4min en laboratoire est un bon prédicteur de la PMA. Pour la condition Plat, l'analyse indique également un faible biais ($0,1 \text{ W.kg}^{-1}$) mais à contrario une dispersion plus importante au sein de l'échantillon. Enfin, pour la condition Montée, l'analyse statistique indique que le biais relativement élevé ($0,7 \text{ W.kg}^{-1}$) et les limites de l'intervalle de confiance réduites déterminent une condition qui surestime la PMA. Les résultats semblent aller dans le même sens que ceux de Nimmerichter *et al.* [30] qui se sont intéressés à l'évaluation de la performance à travers des tests de terrain maximaux de 4 min sur le plat. En revanche, le protocole du test incrémental était différent de celui de notre étude puisque les athlètes réalisaient 5 min à 50 W, puis incrémentaient la puissance de 25 W toutes les minutes. Il faut garder à l'esprit que la PMA est dépendante du protocole utilisé [12], les incrémentations et les durées des paliers différentes pouvant induire des PMA variables. En revanche, des protocoles différents peuvent déterminer les mêmes $VO_{2 \text{ max}}$ avec des PMA différentes [17]. Durant nos travaux de recherche, la consommation d'oxygène n'a pas été mesurée. Balmer *et al.* [4] ont également étudié la relation entre un test incrémental réalisé en laboratoire et un test de terrain de 16,1 km. Une relation très significative ($r = 0,99$) entre le pic de puissance brute du test progressif et maximal et la puissance moyenne du contre la montre de 16,1 km a été trouvée.

Concernant les CLM4min réalisés dans différentes conditions de terrain, la $P_{méca}$ 4min en montée est significativement plus élevée que la $P_{méca}$ 4min sur le plat et sur cycloergomètre. Il semblerait donc que le terrain influence la performance des athlètes. La

$P_{\text{méca}}$ 4 min en montée est plus élevée que la $P_{\text{méca}}$ 4 min sur le plat de 41,0 W soit 11,2 %. Cette différence est certainement due au fait que le cycliste se déplace en luttant contre des résistances à l'avancement différentes. Sur terrain plat, à des vitesses élevées, R_a constitue le principal obstacle au déplacement, R_r devenant négligeable. À 50 km.h⁻¹, environ 90% de la $P_{\text{méca}}$ est utilisée pour vaincre R_a [22, 23], R_r représentant seulement entre 7% et 10% de la $P_{\text{méca}}$ totale développée par le coureur. En revanche, lorsque la route s'élève, la vitesse diminue car le poids de l'ensemble coureur-bicyclette devient la résistance primordiale qui s'oppose au déplacement. Plus la pente est importante et plus la magnitude de P augmente. Après analyse des distances parcourues par les athlètes durant leur CLM4min en montée, il en ressort une relation entre la $P_{\text{méca}}$ normalisée et la distance parcourue en montée ($r = 0,96$; $p < 0,001$). Le rapport entre la $P_{\text{méca}}$ et la masse totale (W.kg⁻¹) est donc un bon prédicteur de la performance dans les ascensions alors que sur le plat, c'est le rapport entre la $P_{\text{méca}}$ et la surface frontale effective (W.m⁻²) qui est en mesure de prédire la performance. A titre d'exemple, lors du contre la montre de 18,7 kilomètres du dernier Tour de Romandie, deux coureurs professionnels de l'équipe FDJ ont développé des $P_{\text{méca}}$ moyennes respectives de 415 W et 405 W et sont séparés de 45 secondes au final. Cette différence est due au fait qu'un des athlètes possède un SCx plus élevé que l'autre. En extrapolant la traînée aérodynamique du plus performant au moins performant, le dernier aurait développé une $P_{\text{méca}}$ moyenne de 380 W. Jusqu'à présent la différence de puissance brute pour la même durée était inconnue dans la littérature scientifique entre un contre la montre sur le plat et un contre la montre en montée. Vogt *et al.* [42] ont également étudié les valeurs de $P_{\text{méca}}$ chez 15 cyclistes professionnels en compétition (Tour de France 2005). Les résultats ont été construits sur la base d'un profil de performance en fonction des différents types de terrain. La $P_{\text{méca}}$ 4 min sur le plat était de 457 W alors que la $P_{\text{méca}}$ 4 min en montée était de 474 W, soit une différence de 3,6 %. Enfin, il se pourrait également que la différence entre montée et plat soit due au fait qu'en montée, les athlètes avaient la possibilité de se mettre en danseuse. Malgré tout, nous ne pouvons pas tirer de conclusion à ce sujet car les études recensées dans la littérature sont contradictoires [27, 37].

Dans notre étude, la CA des athlètes montre une différence significative entre le laboratoire et le terrain. Le coefficient de variation de la puissance (Cycloergomètre = 6,8% ; Plat = 14,5% ; Montée = 14,1%) et la CA sont des paramètres intéressants pour analyser la gestion de l'effort. La particularité de la CA est qu'elle prend en compte la motivation dans le processus de régulation de l'allure. Le statut physiologique [39],

l'appréciation de la distance ou du temps restant [20], mais également le niveau de CA et d'acceptation de la CA interagissent de façon complexe dans le choix et le contrôle de la $P_{méca}$. En effet, pour atteindre la meilleure performance, les cyclistes doivent être capable de mobiliser la plus grande quantité d'énergie durant le test. Ainsi, meilleure est la condition physique des athlètes, meilleure est la capacité de performance. Mais en plus de la quantité totale d'énergie qui peut être produite durant le test, la distribution de cette énergie dans la durée est un facteur important de la performance [14, 18, 40]. Ainsi, l'idéal est que les sujets évitent d'utiliser l'intégralité de leurs ressources énergétiques avant d'avoir terminé le test. En d'autres termes, afin de pouvoir réaliser la meilleure performance autorisée par leur organisme, les cyclistes doivent savoir gérer leur effort pour parcourir la distance requise en un minimum de temps, tout en ayant la capacité d'en garder suffisamment sous la pédale pour éviter qu'une fatigue prématurée ne survienne avant la fin de l'épreuve [39]. Cette capacité, appelée "pacing strategy", peut faire la différence entre des cyclistes ayant des ressources énergétiques très proches. Une stratégie optimale de gestion de l'effort peut être définie comme celle permettant de réguler de façon continue et adaptée le niveau de dépense énergétique en s'adaptant par rapport aux ressources disponibles et à la durée d'effort à fournir [13, 18]. Malgré le fait que la performance soit influencée par la gestion de l'effort, la contribution aérobie n'est quant à elle pas influencée par la stratégie utilisée puisque les variations de $P_{méca}$ semblent être régulée par une dépense énergétique provenant du système anaérobie [20]. Afin d'optimiser leur capacité de performance, les athlètes doivent donc adopter une stratégie de gestion avec une intensité la plus constante possible durant toute la durée de l'exercice.

La fréquence cardiaque obtenue au cours des trois tests d'évaluation de la $P_{méca}$ 4 min suit la même cinétique, à savoir une évolution de type logarithmique en fonction du temps. Concernant la FC_{max} , la valeur moyenne obtenue au cours du CLM4min sur le plat est significativement plus faible que celles mesurées sur Cycloergomètre et en Montée. Enfin, la cadence de pédalage mesurée dans les trois conditions d'évaluation montre des résultats significativement différents entre toutes les conditions d'évaluation. Emanuele et Denoth [15] ont étudié la cadence de pédalage en fonction du profil du terrain. Les résultats montrent des valeurs de cadence significativement plus faibles en montée que sur le plat, certainement due aux changements des forces qui s'opposent au déplacement induisant des inerties de pédalage différentes.

Les résultats de notre étude montrent que le CLM4min peut être très utile car le processus pour établir le PPR est relativement long. En effet, il faut recueillir les données de $P_{méca}$ d'un athlète au minimum sur une saison complète (entraînement + compétition) pour obtenir un PPR valide. Ce processus étant long, les entraîneurs pourraient donc se baser dans un premier temps sur les résultats du CLM4min pour construire le processus de suivi d'entraînement et déterminer les différentes zones d'intensité du cycliste. De plus, les différences observées dans les différentes conditions d'exercice devront être prises en considération par les entraîneurs dans l'élaboration des différentes zones d'entraînement.

V. PERSPECTIVES

Ce projet s'inscrit totalement dans une démarche de recherche scientifique. De plus, il est dans le prolongement des travaux réalisés ces dernières années par Grappe et Pinot. Les résultats confirment une nouvelle fois que la PMA est protocole dépendant, mais surtout que les différences observées sur le terrain suggèrent d'individualiser et de conditionner le processus d'entraînement afin que les athlètes puissent travailler avec un maximum de précision. Une autre perspective serait de comparer la détermination de la PMA à partir du PPR et d'un CLM4min. Cela suppose qu'il faudrait travailler avec des athlètes dont on possède un PPR valide. Pour terminer, la différence significative mesurée entre la $P_{méca}$ sur parcours plat versus montée est probablement due au fait que la principale résistance à l'avancement diffère d'une condition à l'autre, mais nous pensons également que la position en danseuse pourrait contribuer à développer un niveau de $P_{méca}$ supérieure. En effet, Ryschon et Stray-Gundersen [37] se sont intéressés à la notion de coût énergétique dans différentes positions en cyclisme, et notamment entre une position danseuse et une position assise. Leurs résultats indiquent que le coût énergétique est significativement plus élevé en position danseuse. A contrario Millet *et al.* [27] se sont intéressés aux notions de rendement mécanique et de coût énergétique en condition sous maximale sur le terrain, chez des cyclistes de haut niveau, mais les résultats ne montrent pas de différences significatives (assis vs. danseuse). Les résultats apparaissent controversés sur les notions de coût énergétique et de rendement mécanique en danseuse en cyclisme. Il serait par conséquent intéressant d'étudier avec précision ces paramètres en laboratoire et sur le terrain pour un même groupe de sujets.

VI. BIBLIOGRAPHIE

1. Allen H, Coggan AR. *Training and racing with a powermeter*. Boulder, Colorado: VeloPress 2010
2. Amann M, Subudhi AW, Foster C. *Predictive validity of ventilatory and lactate thresholds for cycling time trial performance*. Scand J Med Sci Sports 2006; 16: 27-34
3. Anton MM, Izquierdo M, Ibanez J, Asiain K, Mendiguchia J, Gorostiaga EM. *Flat and uphill climb time trial performance prediction in elite amateur cyclists*. Int J Sports Med 2007; 28: 306-313
4. Balmer J, Davison RC, Bird SR. *Peak power predicts performance power during an outdoor 16.1-km cycling time trial*. Med Sci Sports Exerc 2000; 32: 1485-1490
5. Baron B, Moullan F, Deruelle F, Noakes TD. *The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events*. Br J Sports Med 2009; 45(6): 511-7
6. Bentley DJ, McNaughton LR, Thompson D, Vleck VE, Batterham A. *Peak power output, the lactate threshold and time trial performance in cyclists*. Med Sci Sports Exerc 2001; 33: 2077-2081
7. Bertucci W, Duc S, Villerius V, Pernin JN, Grappe F. *Validity and reliability of the powertap mobile cycling powermeter when compared the SRM device*. Sports Med 2005; 26: 868-873
8. Billat V, Faina M, Sardella F, Marini C, Fanton F, Lupo S, Faccini P, De Angelis M, Koralsztein JP, Dalmonte A. *A comparison of time to exhaustion at VO_{2max} in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners*. Ergonomics 1996; 39: 267-277
9. Bland JM, Altman DG. *Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading*. Lancet Medical Journal 1995; 346: 1085-1087
10. Borg G. *CR10 Scale*, Gunnar Borg, 1981, 1982, 1998
11. Bosquet L, Léger L, Legros P. *Methods to determine aerobic endurance*. Sports Med 2002; 32(11): 675-700
12. Davis JA, Whipp BJ, Lamarra N, Huntsman DJ, Frank MH, Wasserman K. *Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test*. Med Sci Sports Exerc 1982; 14(5): 339-43
13. De Koning JJ, Bobbert MF, Foster C. *Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model*. J Sci Med Sport 1999; 2(3): 266-77

14. De Koning JJ, Foster C, Lampen J, Hettinga F, Bobbert MF. *Experimental evaluation of the power balance model of speed skating*. J Appl Physiol 2005; 98(1): 227-33
15. Emanuele U, Denoth J. *Influence of road incline and body position on power-cadence relationship in endurance cycling*. Eur J Appl Physiol 2012; 112(7): 2433-41
16. Faina M, Billat V, Squadrone R, De Angelis M, Koralsztein JP, Dal Monte A. *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 1997; 76(1): 13-20
17. Faria EW, Parker DL, Faria IE. *The science of cycling: physiology and training - part 1*. Sports Med 2005; 35: 285-312
18. Foster C, Schragger M, Snyder AC, Thompson NN. *Pacing strategy and athletic performance*. Sports Med 1994; 17(2): 77-85
19. Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. *Accuracy of SRM and Powertap power monitoring systems for bicycling*. Med Sci Sports Exerc 2004; 36: 1252-1258
20. Hettinga FJ, De Koning JJ, Meijer E, Teunissen L, Foster C. *Effect of pacing strategy on energy expenditure during a 1500m cycling time trial*. Med Sci Sports Exerc 2007; 39(12): 2212-2218
21. Hopkins WG, Schabert EJ, Hawley JA. *Reliability of power in physical performance tests*. Sports Med 2001; 31: 311-34
22. Kyle CR. *Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners traveling in groups*. Ergonomics 1979; 22: 387-397
23. Kyle CR, Burke ER. *Improving the racing bicycle*. Mechanical engineering 1984; 9: 34-45
24. Lawton E, Martin DT, Lee H. *Validation of SRM power cranks using dynamic calibration*. Fifth IOC World Congress, Oct 31-Nov 5, 1999, Sydney: Int. Olympic Committee
25. Larrazabal I, Iriberry J, Muriel X. *Power output related to exposure time in professional road cycling*. Endurance Sports Science Conference Birmingham 2006
26. Lucia A, Hoyos J, Pérez M, Santalla A, Earnest C, Chicharro J. *Which laboratory variable is related with time trial performance time in the Tour de France?* Br J Sports Med 2004; 38: 636-640
27. Millet GP, Tronche C, Fuster N, Candau R. *Level ground and uphill cycling efficiency in seated and standing positions*. Med Sci Sports Exerc 2002; 34(10): 1645-52
28. Morton RH, Hodgson DJ. *The relationship between power output and endurance: a brief review*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1996; 73(6): 491-502

29. Nevill AM, Jobson SA, Davison RC, Jenkendrup AE. *Optimal power to mass ratios when predicting flat and hill climbing time trial cycling.* Eur J Appl Physiol 2006; 97(4):424-431
30. Nimmerichter A, Williams C, Bachl N, Eston R. *Evaluation of a Field Test to Assess Performance in Elite Cyclists.* Int J Sports Med 2010; 31: 160-166
31. Padilla S, Mujika I, Orbananos J, Angulo F. *Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling.* Med Sci Sports Exerc 2000; 32(4): 850-6
32. Péronnet F, Thibault G. *Consommation maximale d'oxygène, endurance et performance en course a pied.* Macolin 1984; 7: 15-8
33. Pinot J, Grappe F. *The "Power Profile" to determine the physical capacities of the cyclist.* 35ième Congrès annuel de la société de Biomécanique. Le Mans, 25-27 Août 2010
34. Pinot J, Grappe F. *The power profile to assess performance in elite cyclists.* Int J Sports Med 2011; 32: 839-844
35. Pinot J, Grappe F. *Détermination de la PMA à partir du profil de puissance record en cyclisme.* 3ième journée Gilles Cometti Dijon 2013
36. Quod M, Martin DT, Martin JC, Laursen PB. *The power profile predicts road cycling MMP.* Int J Sports Med 2010; 31: 397-401
37. Ryschon TW, Stray-Gundersen J. *The effect of body position on the energy cost of cycling.* Med Sci Sports Exerc 1991; 23(8): 949-53
38. Scherrer J, Monod H. *Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme.* J Physiol 1960; 52: 419-501
39. St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LH, Tucker R, Baden DA, Foster C, Noakes TD. *The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort.* Sports Med 2006; 36(8): 705-22
40. Van Ingen Schenau GJ, Cavanagh PR. *Power equations in endurance sports.* J Biomech 1990; 23(9): 865-81
41. Vogt S, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A, Heinrich L. *Cycling power output produced during flat and mountain stages in the giro d'Italia: a case study.* J Sports Sci 2007; 25(12): 1299-305
42. Vogt S, Schumacher YO, Roecker K, Dickhuth HH, Schoberer U, Schmid A, Heinrich L. *Power OutPut during the Tour de France.* Int J Sports Med 2007; 28(9): 756-61
43. Vogt S, Roecker K, Schumacher YO, Pottgiesser T, Dickhuth HH, Schmid A, Heinrich L. *Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France.* Int J Sports Med 2008; 29(3): 244-50

EFFECT OF FIELD ON MAXIMAL AEROBIC POWER IN CYCLING

Memory submitted in January 2014

Abstract

The purpose of this study was to analyse the agreement between the Maximal Aerobic Power (MAP) and the Power Output (PO) measured from the 4-min time trial (TT4) test in laboratory, level ground and uphill conditions and the pacing strategy used by the cyclists in the different TT4 tests to perform the maximal performance. We hypothesize that the levels of PO could be different according to the evaluation conditions. 16 male cyclists performed an incremental test to exhaustion in laboratory to determine MAP and three TT4 tests in different conditions: Cycle Ergometer (CE), Level Ground (LG) and Uphill (UP). Strong correlation and accuracy were observed between MAP and CE TT4 test for PO. The comparison between CE, LG and UP TT4 tests indicates that the PO measured on UP was significantly higher than the two other conditions. This difference is due to changes in resistance opposing motion during the locomotion. We can notify another interesting result for which affective loading (AL) was significantly higher during CE than in field conditions. The results suggest that the TT4 test is a good predictor of MAP and it allows the determination of different training intensities. Moreover, these intensities must be adapted to the training conditions. Taking into account the motivation in the pacing strategy process, it appears to have an important role in the achievement of performance.

Key Words: Cycling, power output, Maximal Aerobic Power, field test.