



UNIVERSITE DE FRANCHE COMTE – U. SPORTS BESANCON

MASTER 2 RECHERCHE :
Sport Performance Activités Physiques Adaptés

Le Profil de Puissance Record

(PPR)

Une nouvelle méthode d'analyse du
potentiel physique du cycliste

Julien PINOT

Sous la direction :

Fred Grappe (MCU – HDR)

Pôle Activité Physique et Sportive EA-4267/2SBP

Année universitaire 2009 – 2010

REMERCIEMENTS

Je tiens ici à exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui ont participées à la réussite de ce travail :

Tout particulièrement à Fred Grappe,

Qui m'a transmis cette passion de l'entraînement et de la recherche dans l'optimisation de la performance en cyclisme. Un grand merci pour sa grande disponibilité ainsi que pour le partage de sa rigueur scientifique et de ses réflexions toujours très constructives.

A Jérôme Gannat et à l'ensemble du Club Cyclistes d'Etupes,

Pour m'avoir permis de mener à bien ce travail de Master, parallèlement à mon rôle d'entraîneur au sein de l'équipe.

A tous les cyclistes,

Pour leur confiance et leur application au quotidien car c'est en partie grâce à eux que cette étude a été aussi intéressante à tout point de vue.

A la société Matsport et principalement Michael Georges,

Pour leur disponibilité et leur soutien matériel,

A Coralie Brouillet,

Pour son soutien et son aide à la rédaction de ce manuscrit.

A Arnaud Ménétrier...

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION GENERALE	5
II.	REVUE DE LITTERATURE	6
	1. Les modèles empiriques.....	6
	2. Les modèles bioénergétiques.....	8
	a. Le modèle hyperbolique simple de Monod et Scherrer.....	9
	b. Les révisions du modèle hyperbolique.....	11
	c. Etat des connaissances physiologiques actuelles.....	13
	3. L'évaluation de l'endurance.....	16
	4. Applications dans le cyclisme.....	24
	5. Perspectives.....	31
III.	SUJETS ET METHODES	32
	1. Sujets	32
	2. Matériel	33
	3. Analyse fichiers SRM	35
	4. Analyse statistique.....	36
IV.	RESULTATS	37
	1. Le Profil de Puissance Record (PPR).....	37
	2. PPR Anaérobie.....	39
	3. PPR Aérobie.....	41
	4. $P_{méca}$ record et profil-type de cycliste.....	43
	5. Zone « seuil anaérobie ».....	44
	6. PPR exprimé sur une échelle de temps logarithmique.....	46
	7. PPR en fonction de la catégorie de pratique	49
	8. Suivi longitudinal du PPR.....	50
	9. Différence PPR Entraînement – PPR Compétition.....	51

V.	DISCUSSION.....	53
VI.	CONCLUSION GENERALE.....	60
	BIBLIOGRAPHIE.....	61
	TABLE DES ANNEXES.....	67

I. INTRODUCTION GENERALE

La Fontaine prétendait que « la raison du plus fort est toujours la meilleure » car c'est le plus fort qui gagne. C'est le cas dans certains sports individuels où les performances physiques déterminent le résultat des compétitions comme l'athlétisme (courses) ou la natation. Dans ces activités, il est possible de quantifier les performances par un temps ou une vitesse afin de pouvoir comparer les prestations entre elles au fil d'une saison, d'une carrière ou des décennies. Dans ces sports, nous pouvons établir des comparaisons, uniquement car les conditions environnementales de mesure de la performance sont en grande partie standardisées (piste d'athlétisme, longueur de bassin, conditions atmosphériques stables...). En cyclisme, nous ne pouvons pas établir ce type de comparaison basé sur un temps ou une vitesse puisque les conditions de course ne sont jamais les mêmes : gestion de la course par le peloton, types de parcours ou de revêtement, météo... Et ce n'est pas toujours le plus fort qui gagne !

Toutefois les capteurs de puissance fixés sur les vélos (SRM, PowerTap) se sont démocratisés et permettent aujourd'hui de mesurer en routine et en condition réelle de déplacement la puissance développée ($P_{\text{méca}}$, W) par le sportif. $P_{\text{méca}}$ représente l'effort réel produit par le cycliste puisqu'elle renvoie à l'énergie mécanique dépensée. De ce fait, la mesure en regard de l'effort réalisé est plus précise qu'avec la vitesse (dépendante du terrain ou du vent) ou la fréquence cardiaque (dépendante de la fatigue, température, déshydratation...).

Aujourd'hui avec un cycliste qui s'entraîne et qui pratique les compétitions en permanence avec un capteur de puissance, on a la possibilité d'établir son Profil de Puissance Record (PPR) à partir de la relation $P_{\text{méca}}$ record en fonction du temps sur une plage de durée d'exercice très étendue (plusieurs heures). Ce PPR se base sur le fonctionnement physiologique de l'homme qui veut que plus on souhaite développer un niveau d'intensité d'effort élevé, plus la durée de l'effort est courte. C'est dans ce cadre que nous allons nous intéresser à l'étude du PPR chez plusieurs athlètes de différents niveaux. Les purs physiologistes de laboratoire ne sont pas toujours d'accord avec le fait d'utiliser des données acquises dans des conditions réelles de terrain mais pourquoi ne pas ouvrir notre domaine de recherche à l'entraînement et à la compétition ? Il faut reconnaître que le fait d'avoir un grand nombre d'enregistrements réalisés en compétition donne une certaine légitimité et crédibilité à ce profil car on sait que c'est dans les conditions de compétition que les sportifs réussissent à exploiter le maximum de leur potentiel physique pour établir des performances maximales.

Les objectifs de ce travail sont d'évaluer et de mieux comprendre, à travers le PPR, les performances et l'évolution du potentiel physique de l'athlète en fonction de son niveau et de ses caractéristiques physiques. Pour débiter, une synthèse bibliographique permettra de dresser un état des lieux des connaissances accumulées depuis plus d'un siècle sur la relation entre l'intensité maximum soutenue et le temps d'exercice. Nous poursuivrons par la description de la méthodologie de recherche employée pour ce travail réalisé au cours de mon Master. Enfin, nous présenterons et discuterons les résultats obtenus.

II. REVUE DE LITTÉRATURE

La relation entre l'intensité maximum maintenue (que ce soit une vitesse, une distance ou une puissance) en fonction du temps a largement été étudiée au cours du XX^{ème} siècle. Cela a commencé par l'analyse descriptive des différents records du monde en course à pied. Ces modèles empiriques ont ensuite été utilisés pour prédire des performances avant de se baser sur les caractéristiques des différents métabolismes énergétiques de l'homme. Ces derniers modèles, appelés théoriques ou bioénergétiques [5, 6] ont intéressé de nombreux scientifiques, voulant modéliser et comprendre les mécanismes de l'endurance humaine. Toutes les équations ne sont pas recensées, car la finalité n'est pas mathématique et statistique mais plutôt de comprendre les mécanismes et apports de chacun des nouveaux modèles.

1. Les modèles empiriques

Les modèles empiriques qui s'appuient sur l'expérience et l'observation ne font que reporter des données pour les décrire mais ils ne cherchent pas à les expliquer, ni à les interpréter physiologiquement. Dans le cadre de l'étude de la relation puissance – temps, ces modèles mathématiques ne font que tracer la relation entre la P_{meca} et le temps de maintien maximum (t_{lim}), pour en ressortir une équation la décrivant.

Le premier article relatant la relation entre la vitesse et le temps est l'œuvre de Kennelly [3, 26] en 1906, qui a étudié les records en course à pied. Il a également comparé la pente de la relation vitesse – temps dans différents sports comme le cyclisme, le patinage, la natation...

Par la suite de nombreux auteurs dont Meade (1916) [34], Grosse-Lordemann et Müller (1937) [21], Francis (1943) [16], Tornvall (1963) [55] ont continué à étudier de façon empirique la relation qui lie la vitesse au temps avec chacun des équations de type

logarithmique ou hyperbolique différentes, toujours en étudiant les records selon la distance. Frederick, en 1986 [18], après avoir longtemps également étudié cette relation dans plusieurs sports a recensé tous les records du 100m au marathon année par année. La figure 1 illustre donc l'évolution des records sur chaque distance au fil des années.

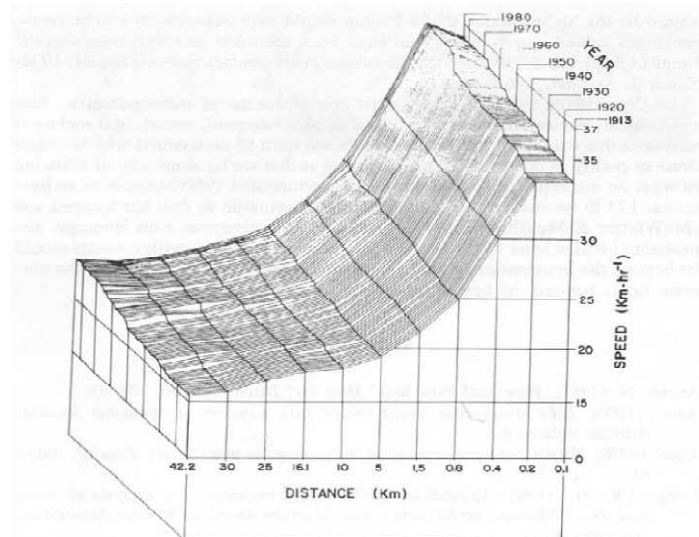


Figure 1 : Evolution des records du Monde en course à pied de 1913 à 1985, du 100 m au marathon (Temps de chaque épreuve rapporté en vitesse moyenne) (d'après Frederick [18])

Morton et Hodgson [39] ont recensé de nombreux articles traitant de la relation entre la $P_{méca}$ et l'endurance (jusqu'à des durées de 2 heures). Ils ont comparé plusieurs modèles mathématiques de la deuxième partie du XX^{ème} siècle et les a superposés dans un graphique (figure 2), en reprenant les équations logarithmiques et exponentielles suivantes :

- $\text{Log } t = a \log P_{méca} + b$ (trait plein) : Grosse – Lordeman et Müller (1973)
- $\text{Log } t = a - bP_{méca}$ (grands pointillés) } Bigland – Ritchie et Woods (1984),
- $P_{méca} = a + be^{-ct}$ (petits pointillés) } Hopkins et coll (1989), Aunola et coll (1990)...

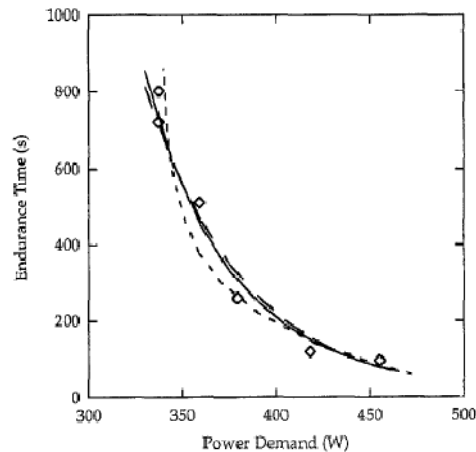


Figure 2 : Comparaison de 3 modèles mathématiques à partir d'un cas concret (Grosse – Lordeman et Muller (trait plein), Bigland – Ritchie et Woods (grands pointillés) et Hopkins et coll (petits pointillés)) (d'après Morton et Hodgson [39])

Il a souligné que pour cet exemple, c'est l'équation de Grosse Lordeman et Müller ($R^2=0,98$) qui décrivait le mieux le cas concret auquel il avait appliqué ces 3 modèles.

Meade, dès 1934 [35], après avoir beaucoup étudié empiriquement la relation vitesse – temps, poursuivant les travaux de Kennelly, en a déduit, qu'elle ne correspondait pas au logarithme décrit par ce dernier. Il affirme que la relation doit permettre d'identifier les aptitudes énergétiques qui produisent la performance et s'aperçoit qu'il est nécessaire de connaître les différentes caractéristiques bioénergétiques d'un athlète afin de mieux comprendre la forme de la relation $P_{méca}$ – temps. Il soulève donc le problème des modèles empiriques qui sont essentiellement descriptifs (issus d'expériences) mais qui ne permettent pas de mieux appréhender les mécanismes de l'endurance humaine.

En effet, ce que nous recherchons afin de l'appliquer dans le domaine de l'entraînement, c'est à comprendre les mécanismes mis en jeu dans la capacité à soutenir une vitesse donnée le plus longtemps possible (ou la capacité à développer la plus haute $P_{méca}$ possible sur un temps donné) : ce que Billat définit comme « l'endurance athlétique » d'un sujet [4].

2. Modèles bioénergétiques

Un modèle théorique est différent d'un modèle empirique ; il est censé établir une explication à la tendance observée, et non d'uniquement la décrire.

Le premier véritable chercheur à avoir essayé d'apporter une argumentation physiologique sur la relation vitesse – temps, est le physiologiste A.V. Hill [25] (1927). Il explique la forme hyperbolique de la relation (figure 3) par les concepts de consommation maximale d'oxygène et dette d'oxygène (il est le précurseur de ces concepts). En effet, en établissant l'équation ci-dessous il prend en compte la capacité des stocks énergétiques, la consommation d'oxygène au cours de l'exercice et des composantes propres à chaque athlète :

$$V = S / (t * B) + (R - A) / B$$

Où V est la vitesse, S la capacité énergétique (S comme stock), t est le temps de course et R le débit d'énergie au cours de l'exercice. A et B sont des paramètres dépendants des caractéristiques physiologiques du coureur : A étant la consommation d'oxygène de repos et B , le débit d'énergie pour une vitesse donnée, exprimée en équivalent d'oxygène à une vitesse donnée

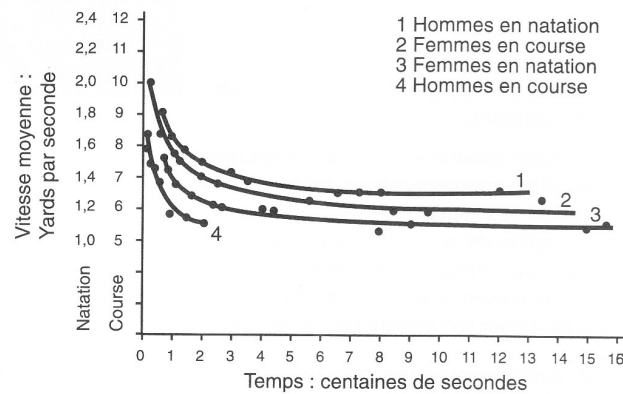


Figure 3 : Relation Vitesse - Temps en course et en natation (Hill (25), adapté par Billat [4])

Henry [24] (1954) tenta d'expliquer la décroissance de la vitesse soutenue avec la durée par un épuisement des réserves de carburant. Or nous savons aujourd'hui que cela est faux (sauf pour les stocks de phosphagènes : ATP = énergie chimique) puisque l'énergie ne provient pas du même carburant selon la durée et le niveau de l'exercice et que les réserves énergétiques pour la glycolyse et le processus aérobie ne sont pas des facteurs limitant.

a. Modèle hyperbolique simple de Monod et Scherrer

S'inspirant des travaux de Hill et de Henry, Scherrer et coll. [50] ont étudié le modèle hyperbolique qui décrit la relation entre la durée maximale d'un exercice et son intensité, qui peut être une vitesse ou une puissance, lors de l'exercice local (mobilisant moins d'un tiers de la masse musculaire totale) (1954).

Ses travaux avec Monod [51] ont démontré qu'à partir de la relation hyperbolique entre la $P_{méca}$ et le temps limite, il existe :

- une limite selon laquelle une $P_{méca}$ peut être maintenue, sans épuisement, et dépendant seulement de la voie énergétique aérobie, appelée puissance critique (b).
- une composante dans la production d'énergie par la voie anaérobie appelée énergie de réserve (a), pouvant être utilisée à tout moment d'un exercice et aboutissant à l'épuisement lorsqu'elle est totalement consommée.

Ainsi cette relation s'exprime pour calculer la quantité totale de travail (W) :

$$W = P_{méca} \cdot t = a + b \cdot t \text{ d'où } P_{méca} = a/t + b$$

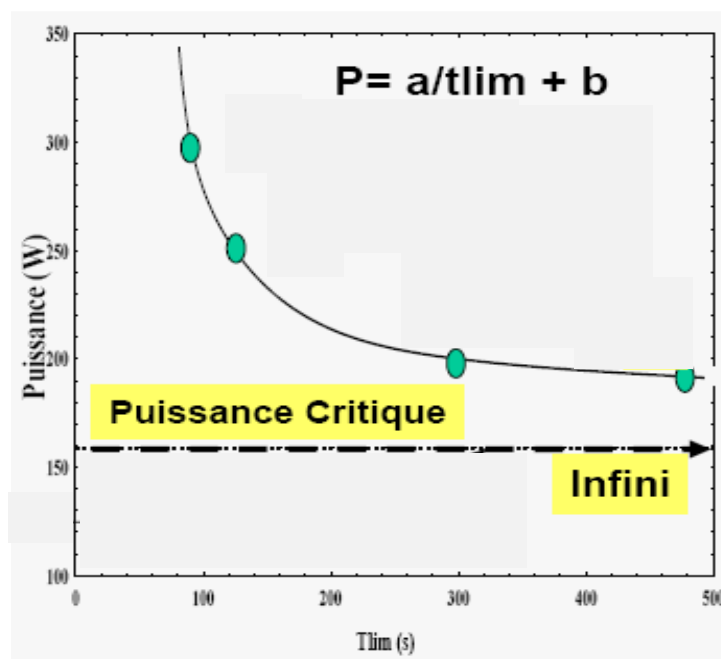


Figure 4 : Modèle hyperbolique simple de Monod et Scherrer (graphique tiré de Léger [31])

Monod et Scherrer sont donc les premiers à avoir observé qu'en exprimant t_{lim} en fonction de la $P_{méca}$ on obtient une courbe caractéristique qui montre que le temps limite du travail dynamique est une fonction hyperbolique.

Le Chevallier et coll. [29] ont montré que la puissance critique locale est un indice d'endurance locale car elle est très proche de la limite supérieure des états stables concernant la consommation d'oxygène, la lactatémie, l'activation musculaire...

Ettema [15] a également démontré, à partir de l'étude des différents records du Monde de l'époque, que cette notion de puissance critique pouvait être étendue aux activités de course à pied, de cyclisme et de natation mais seulement sur des temps de quatre à trente minutes.

Le modèle hyperbolique simple qui décrit la relation entre la durée maximale d'un exercice et son intensité a donc été d'abord mis au point lors d'exercice local. Moritani et coll [38] ont été les premiers à extrapoler cette relation à l'échelle de l'homme à travers l'ensemble de ses masses musculaires et de son système cardiorespiratoire. Ils en dégagent 4 affirmations :

- L'énergie produite pendant l'exercice provient uniquement des voies anaérobies et aérobie, leur part d'intervention étant déterminée selon le niveau de l'intensité d'exercice.
- La capacité de production d'énergie par la voie aérobie est infinie mais la puissance du système est limitée par la puissance critique.
- A l'inverse, le système anaérobie n'est pas limité en puissance mais en capacité par l'énergie de réserve (autrement appelé : capacité de travail anaérobie)
- L'épuisement atteint lors de l'impossibilité de continuer une intensité d'exercice survient lorsque la capacité de travail anaérobie a été épuisée.

Moritani a également prouvé que cette puissance critique est hautement corrélée au seuil anaérobie ventilatoire.

Cependant, ce modèle hyperbolique a été utilisé pour décrire un modèle théorique simple mais de nombreux physiologistes l'ont remis en cause puisqu'il omet de nombreuses considérations comme les mécanismes physiologiques de la contraction musculature et de la fatigue, de l'endurance (durée d'exercice inférieure à 30 minutes), du déficit accumulé en oxygène en début d'exercice... Il ne permet pas également de définir précisément le délai d'intervention de chacun des processus métaboliques.

b. Les révisions du modèle hyperbolique

Wilkie [60] a apporté une correction au modèle hyperbolique simple en ajoutant un facteur à la puissance critique puisque la puissance aérobie n'est pas optimale immédiatement dès le début d'un exercice mais le devient suivant une cinétique d'environ 50 secondes. Certes, cet apport devient négligeable sur des exercices de grandes durées, mais il est important sur des efforts plus courts.

Busso et Chatagnon [7] ont proposé une extension du modèle $P_{méca}$ – temps limite permettant d’estimer la production d’énergie aérobie d’une part et anaérobie d’autre part à partir de la différenciation entre la puissance critique et la puissance maximale aérobie.

Peronnet et Thibault [44] ont mis au point un modèle physiologique d’analyse de la performance en course à pied à partir d’une révision du modèle hyperbolique. Il prend en compte les contributions et caractéristiques des différents métabolismes énergétiques c'est-à-dire du délai d’ajustement de la consommation d’oxygène, de la glycolyse au début de l’exercice et de la réduction de la puissance aérobie en fonction du temps total de course pour les épreuves de longue durée. De plus, ils supposent que la vitesse correspondant à la puissance maximale aérobie peut être maintenue pendant un temps limite de 7 minutes (d’après une moyenne des données de la littérature) et que la puissance d’origine aérobie décroît de façon logarithmique pour des temps de course supérieurs à 7 minutes. Leur modélisation de la performance donne une très bonne description de la courbe de performance du 200m au marathon.

Morton [40] a également proposé un modèle théorique sur la relation $P_{méca}$ -temps basé sur les trois voies métaboliques de l’utilisation des phosphagènes, de la glycolyse anaérobie et de la puissance aérobie. Il est censé représenter la mise en jeu des différents processus bioénergétiques pendant l’exercice (figure 5). Comme les modèles de Wilkie et Peronnet, il ajoute au modèle hyperbolique simple, le délai de mise en jeu des processus aérobies, et le déclin progressif de la puissance aérobie plus la durée d’exercice est importante. Cependant, il ajoute une asymptote horizontale au temps à la courbe. En effet, selon lui, l’hyperbole doit croiser le temps 0 afin de prendre en compte une valeur de puissance instantanée maximale (valeur représentant la voie des phosphagènes), contrairement au modèle de Peronnet et Thibault. Le modèle de Morton prend également en compte la notion de seuil anaérobie dans son modèle, puisque selon lui, dans la relation $P_{méca}$ – endurance, ce seuil entraîne un retard dans la mise en route de la glycolyse anaérobie.

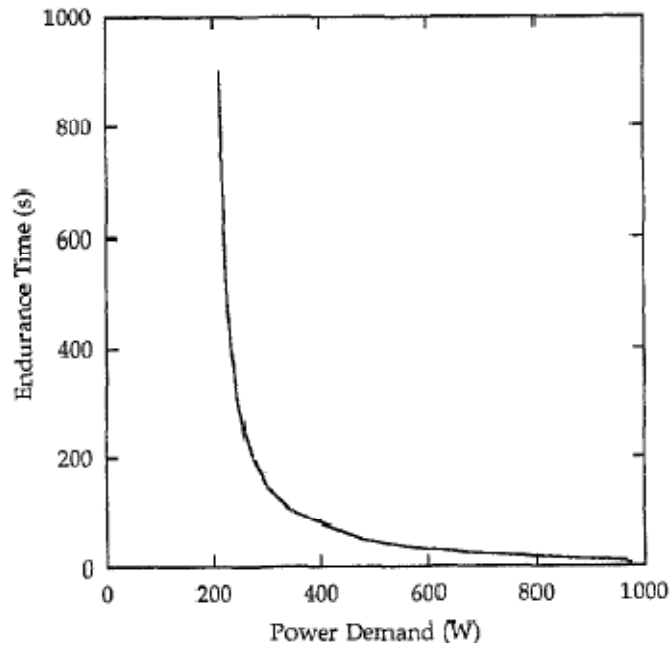


Figure 5 : Illustration du modèle bioénergétique à 3 composantes de Morton [40]

c. Etat des connaissances physiologiques actuelles

L'amélioration des connaissances en physiologie de l'exercice, parallèlement aux différentes modélisations de la relation $P_{\text{méca}} - \text{temps}$, ont permis de mieux comprendre la mise en jeu des différentes voies métaboliques ainsi que leurs caractéristiques.

Billat [4] note que l'on peut diviser la courbe $P_{\text{méca}} - \text{temps}$ en plusieurs tranches de durée d'exercices pour lesquelles la perte de vitesse est peu sensible (entre 10 et 20 secondes...) ou au contraire la perte de vitesse est importante (entre 1 et 2 minutes...). Pour expliquer cela, elle soumet l'idée que l'homme aurait plusieurs façons de produire l'énergie nécessaire à la contraction musculaire selon la durée de l'effort.

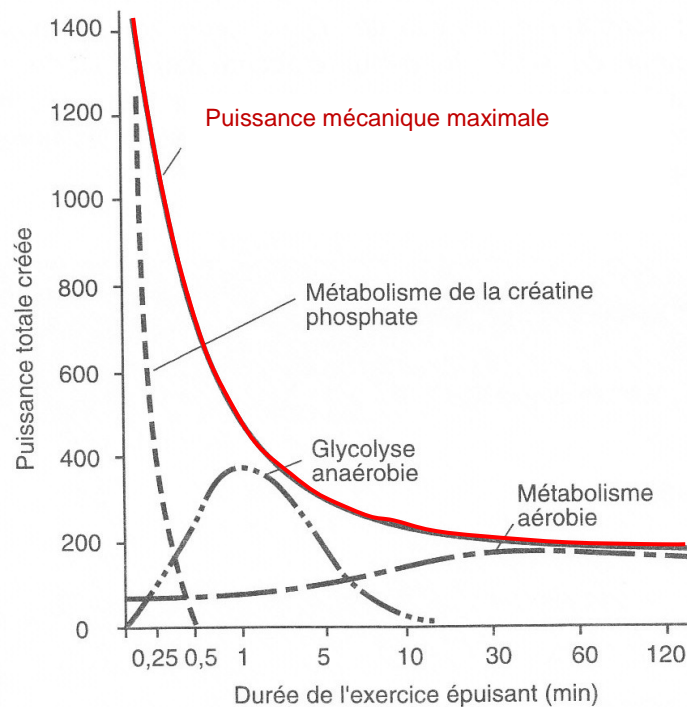


Figure 6: Diminution de la puissance mécanique maximale expliquée par rapport à la part de production énergétiques des différents métabolismes (adapté de la courbe d'Howald, Billat[4])

La figure 6 (courbe d'Howald, 1974) illustre bien ce constat en schématisant la mise en jeu et la part des différents métabolismes énergétiques dans la production de l'énergie. Comme nous le voyons, le métabolisme anaérobie (ATP + métabolisme de la créatine phosphate + glycolyse anaérobie) permet des exercices de grande puissance puisque la resynthèse est rapide, de plus leur délai d'intervention est nul comme l'ATP se trouve directement à l'endroit de la contraction musculaire, ce qui explique la puissance maximale dès le début. Par contre, leur capacité est très faible car les stocks de phosphagènes sont faibles. La glycolyse anaérobie, à travers la voie d'Embden Meyerhof permet une production d'ATP à partir de glucose et de glycogène mais sa capacité est également réduite car la forte production de lactate (acidose) limite ces puissances dans la durée. Enfin, le métabolisme purement aérobie (Cycles de Krebs, chaînes respiratoires...) a une capacité quasi-infinie en stock mais sa puissance est nettement inférieure aux deux métabolismes précédemment décrits.

Margaria [33] (1976) a innové en conceptualisant les mécanismes bioénergétiques lors de l'exercice à partir d'un modèle hydraulique. Le principe est simple : on considère un liquide, contenu dans différents réservoirs où les réservoirs représentent les différentes sources

d'énergie métabolique et l'écoulement du liquide la $P_{méca}$ durant l'exercice. Margaria avait pour commencer conceptualisé les différentes affirmations du concept de puissance critique. Wilkie [60] (1980) puis à nouveau Margaria ont amélioré ce modèle à partir des nouvelles connaissances physiologiques de l'époque. Mais le modèle le plus élaboré provient de Morton [41] (1990) avec son modèle hydraulique à composantes : le « M – M Model ».

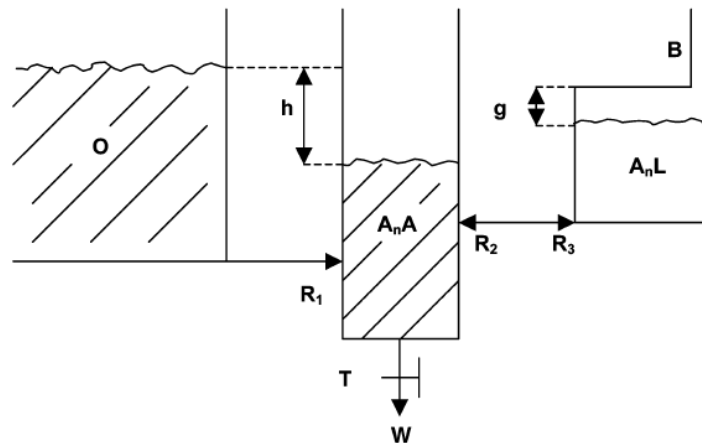


Figure 7 : le modèle hydraulique à 3 composantes de Morton [41]

Le modèle de Morton (figure 7) comporte 3 réservoirs :

- un représentant les voies oxydatives (métabolisme aérobie : cycle de Krebs, chaînes respiratoires...) (O) non limité en capacité,
- un autre le métabolisme anaérobie alactique (phosphagènes) (A_nA),
- un dernier schématisant la voie anaérobie lactique (glycolyse anaérobie ou voie d'Embden Meyerhof) (A_nL) comportant un tuyau B censé représenter la production énergétique via la glycolyse anaérobie au tout début d'un exercice.

Le liquide contenu dans ces récipients représente l'énergie disponible et s'écoule par le robinet (T) ; l'écoulement étant censé schématiser une dépense énergétique plus ou moins puissante (W) selon le débit (au repos T étant fermé). Ces réservoirs sont raccordés par des tubes (R_1 , R_2 et R_3) qui assurent l'apport des différentes sources d'énergie vers le réservoir A_nA d'où la production d'énergie provient.

Si le robinet T est ouvert, ce qui correspond à une charge de travail W , le niveau d' AnA diminue, entraînant un écoulement à travers R_1 (augmentation de la consommation d'oxygène) en relation avec la différence de niveau h entre O et A_nA . L'écoulement entraîne un ralentissement de la diminution du liquide A_nA , et si P n'est pas très élevée, un équilibre est atteint au dessus du tube R_2 . Tout ceci conceptualise un exercice modéré d'intensité sous

maximale avec production énergétique essentiellement par le métabolisme aérobie et qui peut donc durer très longtemps.

Si le robinet est largement ouvert (exercice intense), la situation initiale est comme décrit ci-dessus, mais le niveau de A_nA diminue sous le niveau du tube R_2 . C'est alors qu'une production de lactate commence et si l'exercice dure ou devient plus intense, le niveau d' A_nL diminue. Il peut y avoir état stable au niveau de R_2 : ce qui correspond à un exercice constant au seuil anaérobie accompagné de la composante lente de VO_2 (due à une production énergétique en partie de la glycolyse anaérobie = écoulement à débit modéré à travers R_2). L'athlète arrive à épuisement lorsque A_nL est vide et que le débit de liquide à travers R_1 n'est plus suffisant pour maintenir le débit de T ; c'est-à-dire lorsque l'athlète n'arrive plus à produire assez d'énergie pour maintenir cette intensité supra maximale. De la même manière, nous pouvons imaginer un exercice très intense (débit maximal à travers T) comme un sprint maximal sur quelques secondes où le réservoir A_nA se vide sans que les deux autres réservoirs n'aient le temps de compenser cette baisse du niveau du liquide, l'intensité de cet exercice se voit donc obligatoirement diminué au bout de quelques secondes.

Si le robinet est maintenant fermé, c'est-à-dire que l'exercice s'arrête, A_nA commencera à se remplir à travers R_1 et R_2 , puis à travers R_1 et R_3 mais très lentement jusqu'à ce que A_nA retrouve son niveau de repos. Ce remplissage correspond au remboursement de la dette d'oxygène. L'inversement de l'écoulement de R_2 à R_3 , suggère que la cinétique de récupération de la VO_2 a deux phases bi exponentielle. Comme R_3 est très étroit, A_nL met beaucoup de temps pour se remplir, alors que A_nA est déjà remplie. Ainsi, le modèle prévoit que pendant un long moment après la fin de l'exercice, la VO_2 ne revient pas à sa valeur de repos, mais reste légèrement au dessus.

Voici donc brièvement expliqués, à travers deux concepts (courbe d'Howald et modèle hydraulique) les mécanismes bioénergétiques lors de l'exercice, en partie responsable de la forme hyperbolique de la relation $P_{meca} - \text{temps}$.

3. L'évaluation de l'endurance

Selon Thibault [54], une performance de longue durée dépend à la fois du débit de consommation maximale d'oxygène, de l'efficacité du geste et de l'endurance. Ce que nous recherchons à évaluer à travers l'étude de la relation $P_{meca} - \text{temps}$, c'est le potentiel d'endurance d'un athlète. Pour lui, l'endurance se caractérise plus comme le déclin de la

vitesse en fonction de plusieurs distances de course : comme la vitesse maximale d'un athlète ne peut que diminuer à mesure que les distances des compétitions augmentent, la chute de vitesse plus ou moins prononcées (pente plus ou moins forte) traduit respectivement une endurance plus ou moins faible [53]. Billat définit « l'endurance athlétique » d'un sujet comme sa capacité à soutenir une vitesse donnée le plus longtemps possible [4] (ou la capacité à développer la plus haute $P_{méca}$ possible sur un temps donné). Pour Cazorla, l'endurance aérobie se définit comme la fraction ou le pourcentage de VO_2max ou de PMA ou de VMA susceptible d'être maintenu au cours d'une épreuve d'une durée donnée [8]; cette vision étant plus proche de celle de Billat. L'endurance est définie différemment selon les auteurs, c'est pourquoi il existe d'autant plus de méthodes pour l'évaluer selon le sens qu'on lui donne.

Le premier indice ayant pour objectif de calculer cette notion d'endurance est l'œuvre d'Henry et Farmer, qui, en 1949, ont calculé un indice (« dropp-off index »), à partir de la différence entre les temps sur deux distances différentes (70 et 300 yards), servant à juger de la condition physique et de l'état d'entraînement d'un athlète [23].

Un peu plus tard, Lietzke (1954) proposa une équation pour représenter la relation distance (en logarithme) – temps (en logarithme) comportant une constante, appelée « constante d'épuisement » [32]. Cette valeur représentait donc une seconde quantification de la résistance à la fatigue, c'est-à-dire de l'endurance.

Frederick, déjà référencé précédemment, a également beaucoup étudié ce concept entre 1959 et 1977, où il a proposé un « coefficient de fatigue » pour quantifier la diminution de la vitesse en fonction du temps à partir d'une régression linéaire entre l'allure de course et le logarithme de la distance [17]. Il classait ensuite les athlètes, à partir de la valeur de ce coefficient, entre les coureurs de 1500m, ceux de 5000 – 10000m et les marathoniens. Il ne chercha pas à expliquer ce coefficient, précisant juste qu'il dépendait de facteurs psychologiques, physiologiques et morphologiques.

Harman (1987) a lui étudié cette notion sur des cyclistes [22]. Cet auteur a proposé un index d'endurance à partir de la relation $P_{méca}$ - temps de l'exercice en pourcentage de la $P_{méca}$ maximale (puissance maximum sur une seconde) puisqu'il a observé qu'en $P_{méca}$ relative, les courbes étaient superposables alors qu'en $P_{méca}$ absolue, il était impossible de les comparer.

Son équation intègre donc un facteur F, censé évaluer la capacité d'endurance d'un athlète mais il a une valeur seulement en le comparant avec la moyenne du groupe (lors de son étude).

En reprenant la définition de Billat (ci-dessus), on peut apparenter la notion d'endurance à celle de temps limite (t_{lim}). En effet, de nombreuses études ont porté sur le temps limite à un certain pourcentage de VO_2max pour évaluer les qualités d'endurance, notamment Coyle [6] sur des épreuves de t_{lim} à 80% de VO_2max chez des cyclistes. Il a également démontré que le seuil anaérobie était corrélé au t_{lim} à 80% de VO_2max .

Selon la classification de Bosquet et coll [6], l'analyse des seuils lors d'épreuves triangulaires serait une méthode de mesure indirecte de l'endurance ; que ce soit le seuil anaérobie lactique ou les seuils ventilatoires. Concernant les méthodes de mesure directe de l'endurance, il en recense un certain nombre.

Tout d'abord, les épreuves de t_{lim} à un pourcentage de VO_2max comme précédemment cités. La puissance critique (décrite dans le chapitre précédent), définie par Monod et Scherrer comme une intensité que l'on pourrait tenir indéfiniment, s'apparente également comme un indice de l'endurance [51]. Cependant, sa méthode de détermination reste assez complexe et difficile pour un athlète ; et elle fait l'objet de nombreux ouvrages.

Le modèle de Gimenez d'exercice en créneau s'apparente à une méthode de mesure directe [20]. Le principe repose sur la succession pendant 45 minutes de 4 minutes à intensité de base (50% de la PMA) suivi de 1 minute à intensité pic (100% PMA) soit 9 répétitions. La première évaluation se déroule donc avec une intensité de base de 50%, la seconde à 55% et il faut répéter cet exercice, en augmentant de 5% la base à chaque fois, jusqu'à l'intensité de base, où le sujet n'arrive pas à terminer les 45'. On calcule ensuite le rapport base /pic le plus élevé que le sujet ait pu tenir pour obtenir un indice d'endurance aérobie. Gimenez et coll ont expérimenté ce protocole sur cycloergomètre alors que Prédine et coll, sur une population d'enfants en course à pied [46].

Bosquet et coll ont également repris les nombreuses analyses d'évolution de la fraction d'utilisation du débit de consommation maximale d'oxygène avec le temps. Les aspects curvilinéaire de la relation entre le pourcentage de VO_2max et la durée d'une course sont

attribués à Costill et Fox (1969) [11] et à Astrand et Rodhal (1970) [1]. Cette curvilinearité est observable pour des durées inférieures ou égales à 30 minutes, au-delà cette relation devient linéaire.

On référence de nombreuses modélisations de la décroissance de la fraction de $VO_2\text{max}$ utilisée suivant le temps d'exercice.

Di Prampero (1986) a étudié cette relation et il a établi 3 équations différentes selon le niveau et le sexe [12] :

- Coureurs amateurs : $F = 0,905 - 0,00091 * T$
- Athlètes féminines : $F = 1,00 - 0,050 * \ln (0,14 * T)$
- Athlètes masculins : $F = 1,00 - 0,056 * \ln (0,14 * T)$

(Avec F la fraction moyenne de $VO_2\text{max}$ et T la durée d'exercice)

Saltin (1973) a également modélisé cette relation avec une équation différente, pour des durées comprises entre 30 et 300 minutes [47] :

- $F = 0,940 - 0,001 * T$

Si l'on reprend les travaux de Léger, Mercier et Gauvin (1986), ils ont proposé quatre équations suivant l'intervalle de temps dans lequel était compris l'exercice [30] :

- Si $T < 4.6 \text{ min}$: $\ln F = 4.93 - 0.186 \ln T$
- Si $4.6 < T < 70.4 \text{ min}$: $\ln F = 4.79 - 0.096 \ln X$
- Si $70.4 < T < 173.7 \text{ min}$: $\ln F = 4.90 - 0.121 \ln T$
- Si $T > 173.7 \text{ min}$: $\ln F = 5.08 - 0.156 \ln T$

Ils ont également proposé une autre équation standard (1986) :

- $F = 126.69 - 11.056 \ln T$

Tout comme Montmayer et Villaret (1989) en ont modélisé une [8] :

- $F = 109.837 \ln T^{0.202}$

La figure 8 recense toutes ces modélisations afin de les comparer une à une ; certains modélisant une fonction linéaire, d'autre une fonction logarithmique curvilinéaire. On note de grandes différences entre les modèles, par exemple pour un exercice de 100 minutes, un athlète masculin pourrait soutenir 87% de sa $VO_2\text{max}$ selon Di Prampero alors que Léger pronostiquerait plus une fraction de 77%...

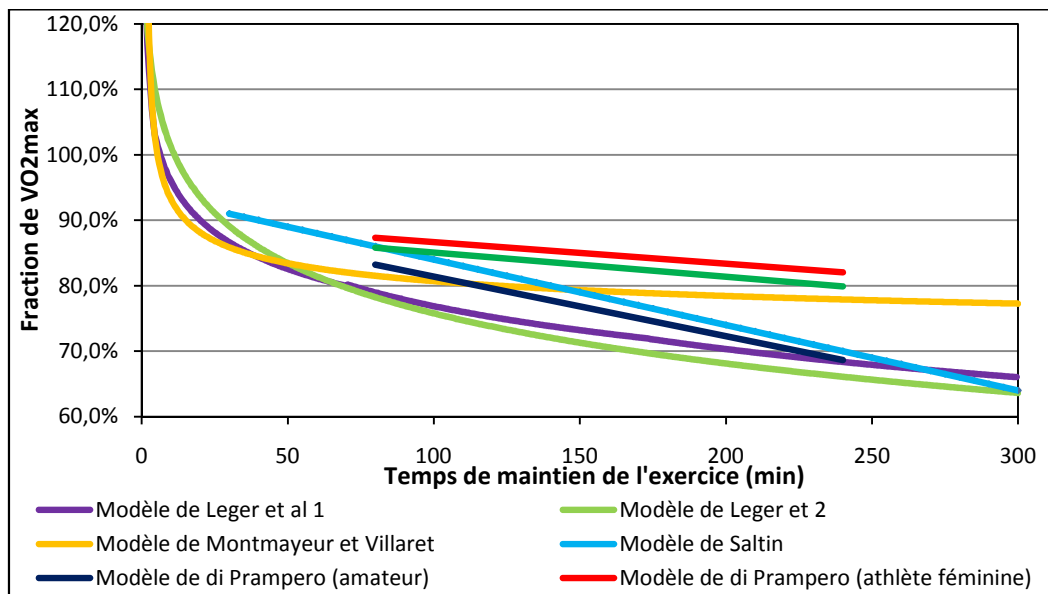


Figure 8: Comparaison des différentes modélisations d'évolution de la fraction de VO₂max soutenue selon le temps d'exercice (d'après les données de Léger et coll [30], de Montmayeur et Villaret [8], de Saltin [47] et de di Prampero [12])

Enfin, le modèle le plus connu est celui défini par Peronnet et Thibault [43, 53] avec le concept d'indice d'endurance (IE), qui correspond à la pente de la relation entre la fraction de consommation maximale d'oxygène utilisée et le temps d'exercice, mais propre à un sujet. En effet, alors que les modèles précédemment étudiés sont censés calculer la fraction de VO₂max sur un temps donné à partir de la VO₂max d'un athlète, le modèle de Peronnet et Thibault donne une valeur de l'endurance d'un athlète à partir de plusieurs performances établies sur le terrain. Ce qui est doublement intéressant avec ce modèle c'est qu'il est possible de calculer l'IE à partir du temps de maintien d'un pourcentage de la vitesse maximale aérobie (aérobie), c'est-à-dire en basculant sur la relation vitesse – temps. A partir de ce modèle, les auteurs affirment être capables d'évaluer l'endurance d'un sujet. Selon Thibault, l'endurance se caractérise par le déclin de la vitesse en fonction de plusieurs distances de course : la chute de vitesse plus ou moins prononcée traduit respectivement une endurance plus ou moins faible. Il quantifie cette décroissance par la relation logarithmique qui lie la durée de l'effort et l'intensité exprimée en pourcentage du débit de consommation d'oxygène, et la pente de cette régression correspond à une valeur d'endurance ; plus la pente est faible, meilleur est l'endurance

Prenons l'exemple concret de deux coureurs (Dupont et Durant d'après les données de Peronnet et Thibault) [43]. Voici les records de ces athlètes :

	3000m	5000m	10000m	20000m	21100m	30000m	42195m
Dupont	9 :15	16 :07	34 :21	1h13 :36	1h18 :05	1h34 :10	2h48 :15
Durant	9 :34	16 :27	34 :25	1h12 :07	1h16 :22	1h31 :34	2h40 :28

En reportant ces records, par rapport à leur débit de consommation maximale d'oxygène, on arrive à tracer ces relations logarithmiques, qui nous permettent de calculer à partir de la pente les indices d'endurance de Dupont et Durant.

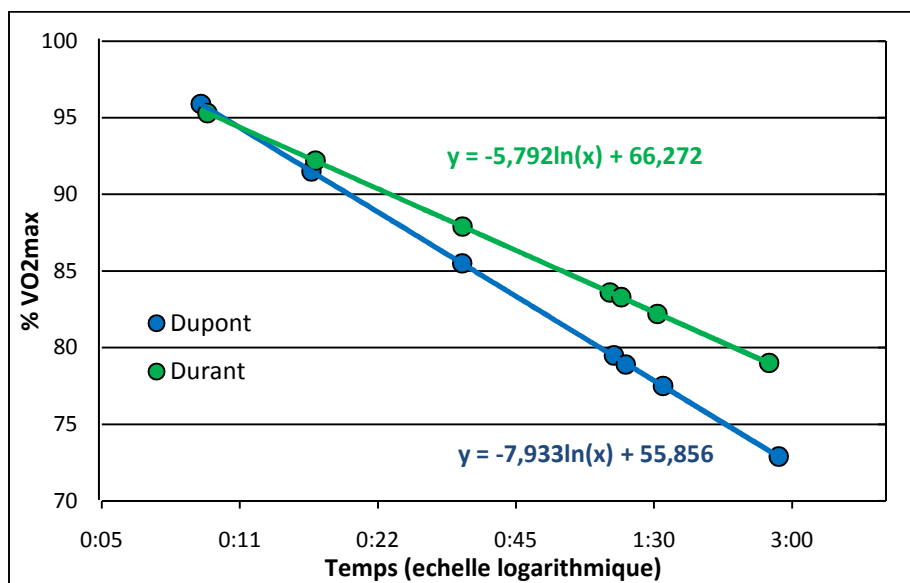


Figure 9 : Illustration graphique et mathématique de l'évaluation de l'indice d'endurance des deux athlètes Durant et Dupont (d'après les données de Peronnet et Thibault [43])

Dupont a une plus grande VO_{2max} mais une plus faible endurance (IE : 7,9, pente de la courbe) que Durant (IE : 5,8) : ce qui fait que sur des distances supérieures à 10000 mètres, Durant est plus fort. Au regard de la fraction de VO_{2max} maintenue, Durant est plus « endurant » (en reprenant la définition de Cazorla) que Dupont à partir d'efforts de 11 minutes.

Cazorla a beaucoup étudié la relation entre l'endurance et la Vitesse Maximale Aérobie (VMA) [8]. Il en ressort les mêmes constats qu'avec la VO_{2max} : une curvilinearité de la

relation % de VMA en fonction du temps avant 30 minutes, et une linéarité pour les efforts plus longs (figure 10).

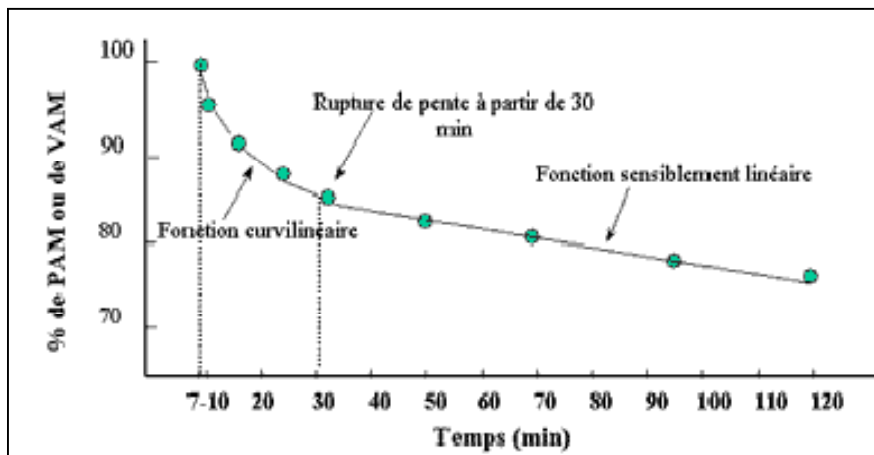


Figure 10 : *Décroissance de la durée limite maintenue en fonction du %de VO₂max ou de VMA utilisée (d'après Cazorla [8])*

Il a également mis au point une méthode évaluant l'endurance aérobie d'un sujet. En reprenant le même principe que Peronnet et Thibault, mais en le simplifiant afin de l'utiliser avec un public scolaire : la méthode consiste à évaluer la VMA, puis à enregistrer une performance (une distance) sur un temps donné (il a beaucoup travaillé sur le test Cooper de 12'). On calcule ensuite un indice d'endurance aérobie en pourcentage en calculant le rapport distance parcourue / distance théorique à VMA sur le même temps de course ou le rapport vitesse moyenne sur la distance/ VMA.

Enfin, on peut citer une dernière méthode directe d'évaluation de l'endurance : le nomogramme de Mercier, Léger et Desjardins [36]. Ce nomogramme (figure 11) permet à partir de plusieurs performances en course à pied, de prédire l'endurance (une note de 1 à 100 : plus l'athlète est endurant plus l'indice est élevé). Reprenons les cas de Durant et Dupont pour évaluer l'indice d'endurance à partir de ce nomogramme, où nous retrouvons logiquement la même hiérarchie.

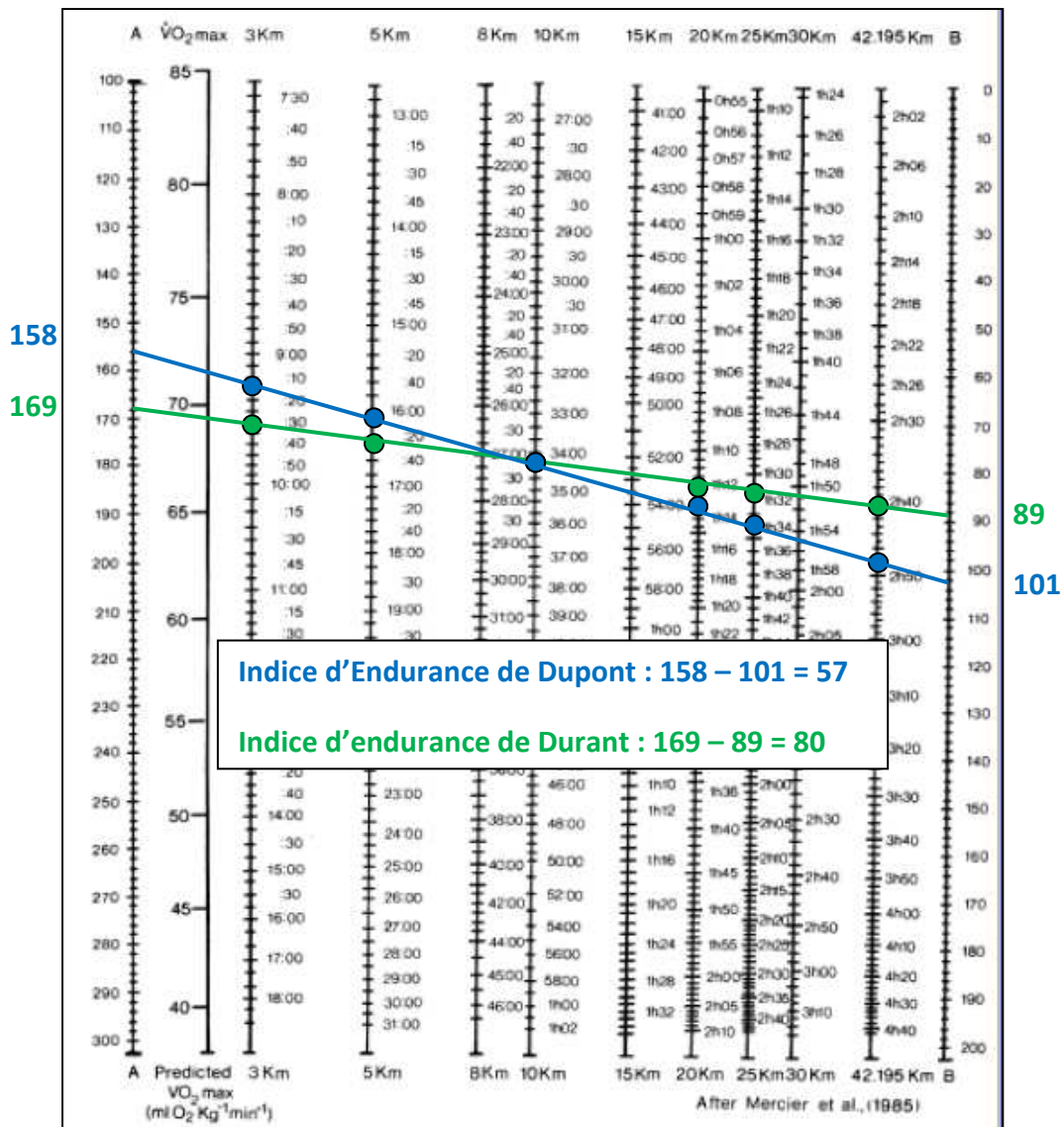


Figure 11 : Nomogramme de Mercier, Leger et Desjardins [36] : calcul de l'indice d'Endurance de Dupont et Durant (d'après les données de Peronnet et Thibault [43])

C'est notamment à l'aide de ce nomogramme que Daniel Mercier défend l'idée cohérente selon laquelle un bon dosage des intensités et des durées des entraînements, ne doit se faire qu'après analyse de la courbe entière de performance et non pas à partir d'une seule VMA.

Il existe donc de nombreux modèles permettant de calculer un indice d'endurance, chacun ayant ses points forts et ses limites. Le plus reconnue est celui de Peronnet et Thibault, bien que sa principale limite soit de taille : il généralise le temps limite à $\dot{V}O_2 \text{ max}$ pour chaque athlète à 7 minutes, alors que la littérature rapporte des différences de maintien d'entre 4 et 11 minutes...

4. Applications dans le cyclisme

La relation $P_{\text{méca}}$ - temps a déjà beaucoup été étudiée dans le cyclisme. En effet, dès les débuts et les analyses de Kennelly [26], la relation vitesse en fonction du temps en bicyclette était calculée, il s'en servit notamment afin de comparer la pente de la relation vitesse – temps en fonction du type de locomotion : marche, patinage, aviron, cyclisme...

De nombreuses études empiriques se sont donc également intéressés au cyclisme mais en bien moins grand nombre que la course à pied : en effet, la standardisation des temps est beaucoup plus compliqué puisque le cyclisme se déroule sur tout type de terrain. C'est pourquoi, les vitesses et records en cyclisme sur piste, où les conditions sont standardisés ont été préférées pour ces analyses. On peut citer Frederick, qui établit la relation entre la distance et le t_{lim} à partir des records du monde de l'époque (1959) [39]. De plus, le calcul de la $P_{\text{méca}}$ sur bicyclette ergométrique a été possible beaucoup plus tard (annexe 1) ; cependant tout comme avec la vitesse en fonction du temps, on observe une diminution de la $P_{\text{méca}}$ suivant la durée de l'exercice.

Ettema [15] a poursuivi les travaux de Monod et Scherrer sur la puissance critique d'un exercice au niveau local en élargissant sur différents sports. Il a défini la notion de vitesse critique, notamment dans le cyclisme, à partir de l'étude des records du monde de 1965 ; cette vitesse critique se définissant comme une vitesse proche de l'état stable qu'il est possible de tenir sur un temps prolongé.

On peut également citer les travaux d'Harman, décrits précédemment, qui évaluaient l'endurance de cyclistes à l'aide d'un index provenant de la relation temps – $P_{\text{méca}}$ relative de l'exercice en pourcentage de la $P_{\text{méca}}$ maximale (puissance maximum sur une seconde) [22].

Le docteur en physiologie Andrew Coggan a largement utilisé la relation $P_{\text{méca}}$ – temps à travers son « power profiling » (profil de puissance) [9, 10]. Pour lui, il permet avant tout de comparer les cyclistes entre eux. A partir d'un grand échantillon de sujets, il a établi une échelle permettant de classer les sujets dans différentes catégories de niveau (figure 12). Il a choisi différentes durées cibles censées évaluer directement des aptitudes clés du cyclisme à savoir la puissance du système neuromusculaire (5 secondes), la capacité anaérobie (1 minute), la consommation maximale d'oxygène (5 minutes) ou autrement dit la puissance

maximale aérobie et enfin le seuil lactique (30 minutes). Cette échelle de niveau classe les cyclistes en 8 niveaux : de la classe mondiale au non – entraîné, selon chaque pic de puissance maximale de l'intervalle de temps correspondant (5s, 1', 5', 30'). C'est-à-dire qu'il est rarement possible qu'un cycliste ait ses 4 pics de puissance dans le même niveau, mais plutôt qu'il a une répartition, propre à son potentiel, dans les différents intervalles, en fonction de ses qualités physiques.

		Maximal power output (in W/kg)							
		Men				Women			
		00:00:05	00:01:00	00:05:00	00:30:00	5 s	1 min	5 min	FT
World class (e.q., international pro)		24,04	11,50	7,60	6,40	19,42	9,29	6,61	5,69
		23,77	11,39	7,50	6,31	19,20	9,20	6,52	5,61
		23,50	11,27	7,39	6,22	18,99	9,11	6,42	5,53
		23,22	11,16	7,29	6,13	18,77	9,02	6,33	5,44
		22,95	11,04	7,19	6,04	18,56	8,93	6,24	5,36
		22,68	10,93	7,08	5,96	18,34	8,84	6,15	5,28
		22,41	10,81	6,98	5,87	18,13	8,75	6,05	5,20
		22,14	10,70	6,88	5,78	17,91	8,66	5,96	5,12
		21,86	10,58	6,77	5,69	17,70	8,56	5,87	5,03
		21,59	10,47	6,67	5,60	17,48	8,47	5,78	4,95
Exceptional (e.q., domestic pro)		21,32	10,35	6,57	5,51	17,26	8,38	5,68	4,87
		21,05	10,24	6,46	5,42	17,05	8,29	5,59	4,79
		20,78	10,12	6,36	5,33	16,83	8,20	5,50	4,70
		20,51	10,01	6,26	5,24	16,62	8,11	5,41	4,62
		20,23	9,89	6,15	5,15	16,40	8,02	5,31	4,54
Excellent (e.q., cat. 1)		19,96	9,78	6,05	5,07	16,19	7,93	5,22	4,46
		19,69	9,66	5,95	4,98	15,97	7,84	5,13	4,38
		19,42	9,55	5,84	4,89	15,76	7,75	5,04	4,29
		19,15	9,43	5,74	4,80	15,54	7,66	4,94	4,21
		18,87	9,32	5,64	4,71	15,32	7,57	4,85	4,13
Very good (e.q., cat. 2)		18,60	9,20	5,53	4,62	15,11	7,48	4,76	4,05
		18,33	9,09	5,43	4,53	14,89	7,39	4,67	3,97
		18,06	8,97	5,33	4,44	14,68	7,30	4,57	3,88
		17,79	8,86	5,22	4,35	14,46	7,21	4,48	3,80
		17,51	8,74	5,12	4,27	14,25	7,11	4,39	3,72
Good (e.q., cat. 3)		17,24	8,63	5,01	4,18	14,03	7,02	4,30	3,64
		16,97	8,51	4,91	4,09	13,82	6,93	4,20	3,55
		16,70	8,40	4,81	4,00	13,60	6,84	4,11	3,47
		16,43	8,28	4,70	3,91	13,39	6,75	4,02	3,39
		16,15	8,17	4,60	3,82	13,17	6,66	3,93	3,31
Moderate (e.q., cat. 4)		15,88	8,05	4,50	3,73	12,95	6,57	3,84	3,23
		15,61	7,94	4,39	3,64	12,74	6,48	3,74	3,14
		15,34	7,82	4,29	3,55	12,52	6,39	3,65	3,06
		15,07	7,71	4,19	3,47	12,31	6,30	3,56	2,98
		14,79	7,59	4,08	3,38	12,09	6,21	3,46	2,90
Fair (e.q., cat. 5)		14,52	7,48	3,98	3,29	11,88	6,12	3,37	2,82
		14,25	7,36	3,88	3,20	11,66	6,03	3,28	2,73
		13,98	7,25	3,77	3,11	11,45	5,94	3,19	2,65
		13,71	7,13	3,67	3,02	11,23	5,85	3,09	2,57
		13,44	7,02	3,57	2,93	11,01	5,76	3,00	2,49
Untrained (e.q., non-racer)		13,16	6,90	3,46	2,84	10,80	5,66	2,91	2,40
		12,89	6,79	3,36	2,75	10,58	5,57	2,82	2,32
		12,62	6,67	3,26	2,66	10,37	5,48	2,72	2,24
		12,35	6,56	3,15	2,58	10,15	5,39	2,63	2,16
		12,08	6,44	3,05	2,49	9,94	5,30	2,54	2,08

Figure 12 : Tableau de Coggan classifiant le niveau d'un coureur en fonction de la relation puissance – temps (en rouge : cas du cycliste 1, en vert : cas du cycliste 2) [10]

C'est ce que nous voyons dans la figure 12 ; deux exemples : le cycliste 1 a un niveau qualifié d'excellent dans la zone « seuil lactique » alors que plus l'effort est court, moins son niveau est performant : ce type de répartition correspond à un spécialiste de l'effort contre la montre. A l'inverse, la cycliste 2, est une sprinteuse puisqu'elle a un niveau exceptionnel pour un record sur 5 secondes alors que plus la durée augmente, moins elle est performante. Ce

tableau permet donc d’orienter les athlètes sur tel ou tel type de profil (sprinter, puncheur, rouleur, grimpeur...) en fonction de leur qualité et permet de situer dans une hiérarchie son niveau physique.

La figure 13, reprend le tableau de Coggan en traçant la relation de chacun des niveaux. On remarque bien la forme hyperbolique de la relation avec une $P_{méca}$ qui diminue avec l’augmentation du temps d’exercice ; cela est bien conforme à tous les travaux décrits précédemment. On note aussi, un grand écart de $P_{méca}$ selon le niveau : par exemple pour le pic de $P_{méca}$ maximale sur 5 minutes : la limite supérieur d’un cycliste de niveau mondial est de 7,6 W/kg alors que celle d’un cycliste non entraîné est de 3,05 W/kg ; ce qui correspond à une différence d’environ 320 W pour deux sujets de 70 kg (niveau mondial 532 W pour 70kg contre 213 W au niveau non entraîné).

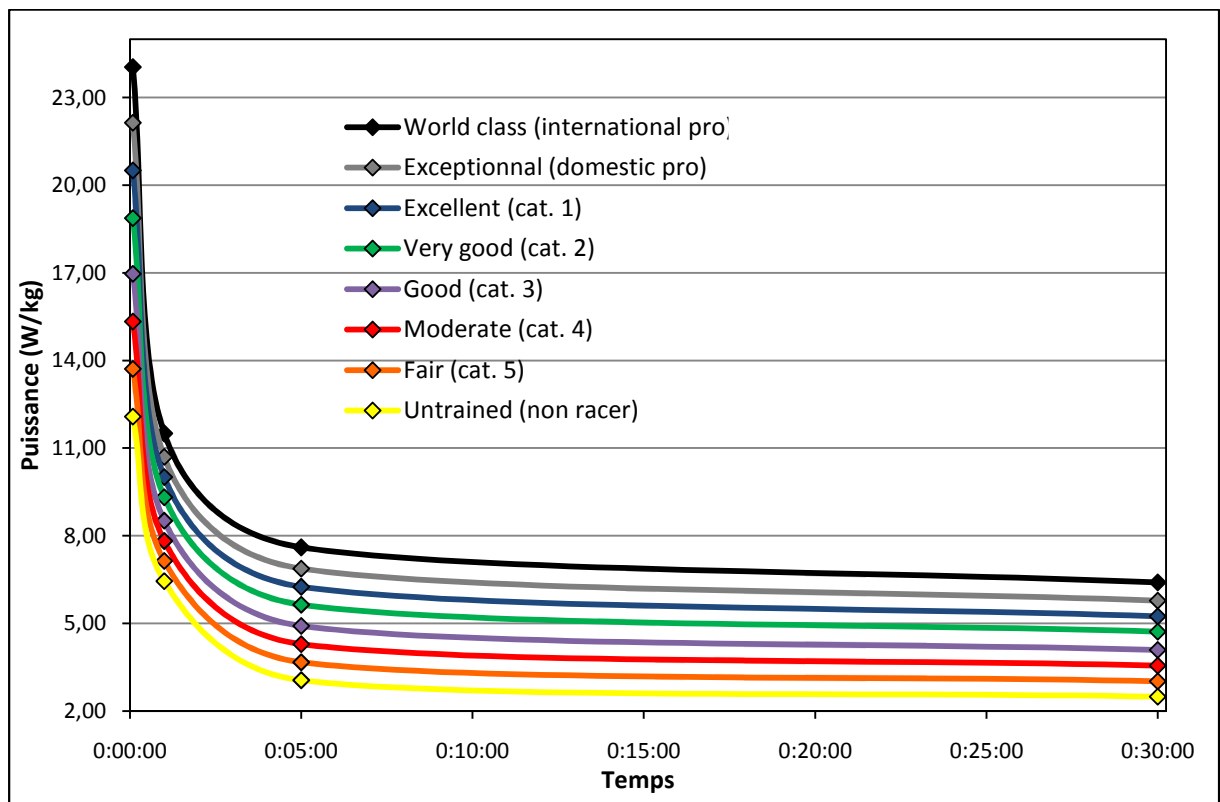


Figure 13 : Relation $P_{méca}$ - Temps adaptée à partir du tableau de Coggan [10] (pour des athlètes masculins)

Depuis l’apparition des capteurs de puissance mobiles (type SRM ou Powertap), plusieurs études se sont intéressées à la répartition de la $P_{méca}$ développée par des cyclistes en compétition, afin de mieux se rendre compte de la charge de travail fourni. Ainsi, dans plusieurs d’entre elles, Vogt et coll [57, 58, 59] rapportent des valeurs de pics de $P_{méca}$

maximale sur différents intervalles de temps (figures 14 et 16), permettant d'établir la relation $P_{méca}$ – temps sur ces compétitions.

		MMP 15	MMP 30	MMP 60	MMP 120	MMP 180	MMP 240	MMP 300	MMP 1800
Flat	(W)	895 ^{a,b}	775 ^{a,b}	657 ^{a,b}	549 ^{a,b}	481 ^{a,b}	457 ^{a,b}	435 ^{a,b}	347 ^{a,b}
	(W)	(710–1179)	(627–1115)	(525–1035)	(429–807)	(385–690)	(365–652)	(354–560)	(281–386)
	(W/kg)	13.0 ^{a,b}	11.5 ^{a,b}	9.7 ^{a,b}	8.2 ^{a,b}	7.1 ^{a,b}	6.8 ^{a,b}	6.6 ^{a,b}	4.8 ^{a,b}
Semi-mountainous	(W/kg)	(9.7–19.7)	(8.6–18.6)	(7.1–17.3)	(6.6–13.5)	(5.1–11.5)	(5.6–10.9)	(5.5–9.3)	(4.2–5.6)
	(W)	1029 ^b	801 ^b	650 ^b	557 ^b	526 ^b	505 ^b	491 ^b	389
	(W)	852–1338	685–960	611–692	553–577	497–564	474–542	454–533	349–427
Mountain	(W/kg)	14.9 ^b	11.4 ^b	9.0 ^b	8.0 ^b	7.7 ^b	7.1 ^b	6.9 ^b	5.4
	(W/kg)	(13.1–17.8)	(10.7–12.8)	(8.6–9.5)	(7.8–8.5)	(7.3–8.0)	(6.7–7.5)	(6.5–7.4)	(5.1–6.0)
	(W)	836	666	557	497	489	466	459	394
Mountain	(W)	(710–1047)	(605–750)	(508–658)	(483–524)	(470–491)	(457–476)	(443–475)	(335–427)
	(W/kg)	12.6	10.0	8.2	7.3	7.2	6.9	6.7	5.6
	(W/kg)	(10.7–16.4)	(8.9–11.2)	(7.1–9.4)	(6.6–7.7)	(6.4–7.5)	(6.2–7.3)	(6.1–7.2)	(5.0–6.1)

Figure 14 : Pics de $P_{méca}$ maximale sur différents intervalles de temps d'un groupe de cyclistes lors du Tour de France (Vogt et coll [57])

Ainsi, on peut donc analyser cette relation en fonction des étapes, du type de terrain (plat, moyenne montagne, montagne), du profil des coureurs (sprinter, grimpeur...) puisque suivant ces aspects, la relation n'a pas la même allure.

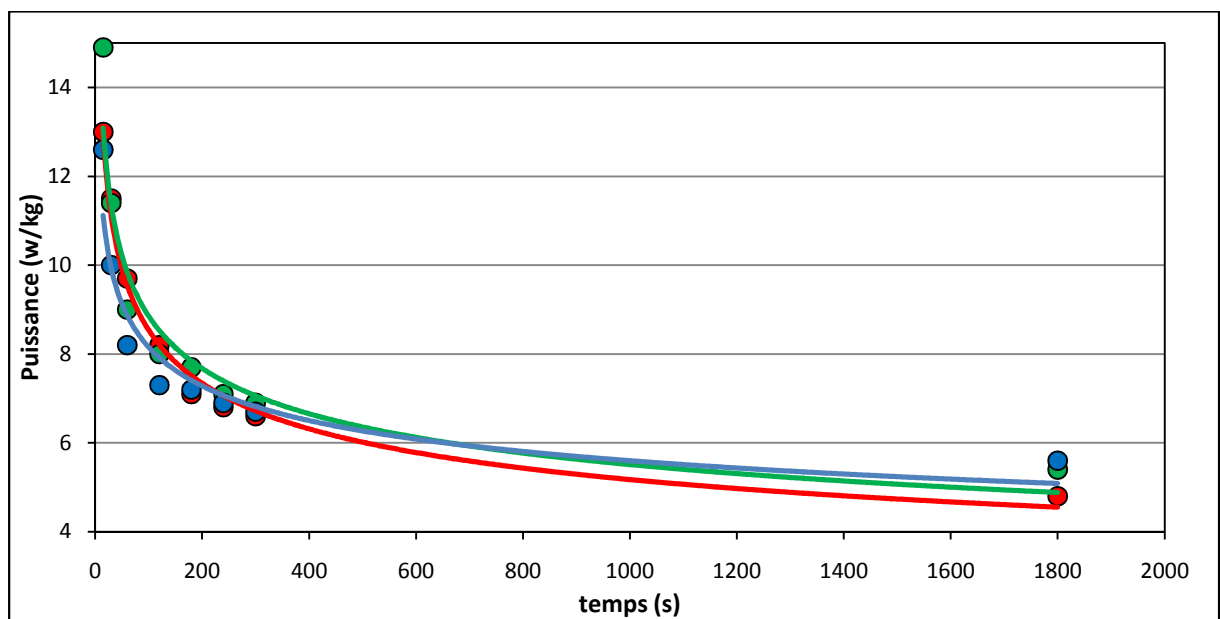


Figure 15 : Relation $P_{méca}$ - temps à partir des puissances sur le Tour de France (en rouge : plat, en vert : moyenne montagne, en bleu : montagne) (d'après les données de Vogt et coll [57])

Par exemple, sur la figure 15, on remarque bien une forme différente de la relation suivant le terrain avec des $P_{m\acute{e}ca}$ plus élevées en montagne sur des intervalles longs puisque le niveau de $P_{m\acute{e}ca}$ développée est plus important et constant dans les cols. Cependant ces résultats sont à relativiser car ce sont les moyennes d'un échantillon contenant différents profils de cyclistes.

Type of stage	Stage	MMP 15	MMP 30	MMP 60	MMP 120	MMP 180	MMP 240	MMP 300	MMP 1800
Flat	10	660	585	485	454	414	388	379	279
	12	668	505	434	329	326	317	308	275
	15	523	434	407	343	343	305	280	179
	16	416	353	302	277	269	263	252	199
	20	692	566	441	388	375	365	329	261
Mountain	11	651	584	475	450	444	432	429	373
	13	680	577	531	461	448	441	438	389
	14	662	620	547	481	460	448	447	370
	19	519	476	461	446	434	419	410	336

Figure 16 : Pics de $P_{m\acute{e}ca}$ maximale sur différents intervalles de temps (15, 30, 60, 120, 180, 240, 300 et 1800 secondes) d'un cycliste lors du Tour d'Italie (Vogt et coll [58])

L'étude de Vogt et coll qui porte sur les $P_{m\acute{e}ca}$ lors du Tour d'Italie [58] est centrée sur un seul cycliste : ce qui nous a permis de tracer sa relation $P_{m\acute{e}ca}$ maximale record – temps sur cette épreuve. La figure 17 présente les records de $P_{m\acute{e}ca}$, avec en pointillés les niveaux de Coggan, afin d'évaluer la performance de cet athlète sur cette épreuve.

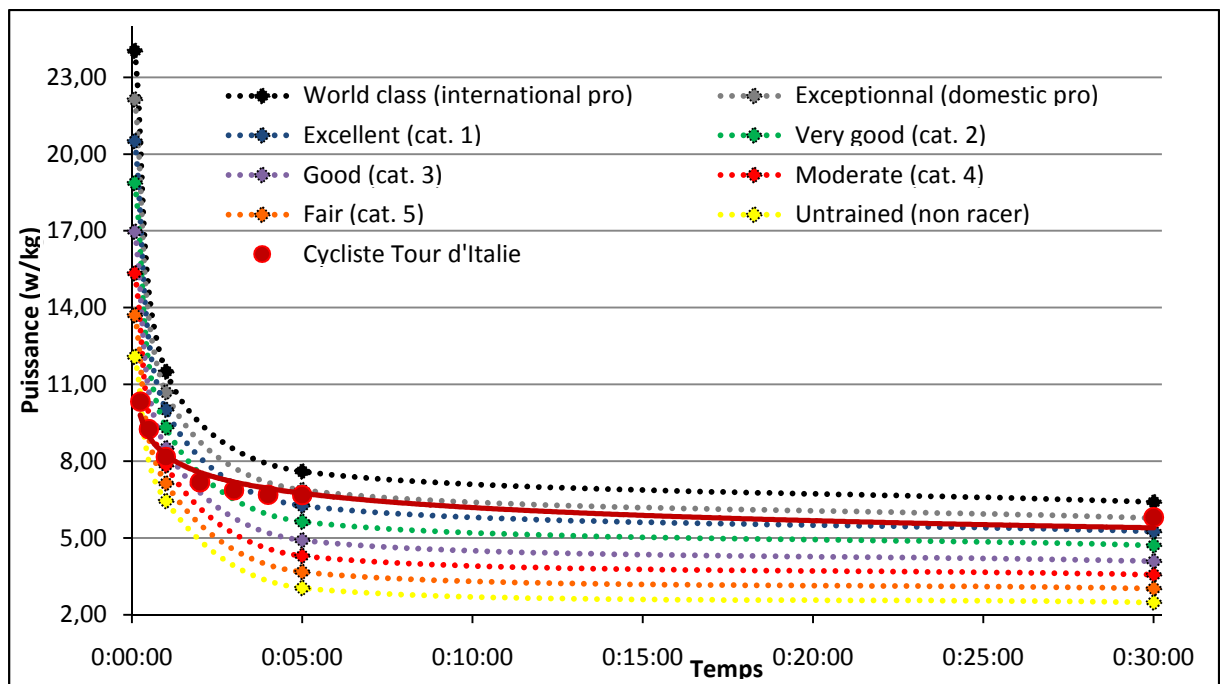


Figure 17 : Relation $P_{m\acute{e}ca}$ – temps (en rouge foncé) d'un cycliste lors du Tour d'Italie par rapport aux niveaux définis par Coggan [10] à partir des records de $P_{m\acute{e}ca}$ maximale développés sur cette course à étapes (d'après les données de Vogt et coll [58])

Ainsi, ce profil s'apparente plutôt à celui d'un grimpeur. En effet, ses $P_{méca}$ sur des intervalles courts sont de faible niveau (ce cycliste n'a sûrement pas produit d'efforts au maximum de ses possibilités sur ces durées). En revanche, pour le record de $P_{méca}$ sur 5', il est de niveau exceptionnel alors que son record sur 30' fait partie du meilleur niveau décrit par Coggan, niveau mondial, ce qui correspond probablement à un grimpeur puisque cet effort a été enregistré lors d'une étape de montagne.

Sassi et coll ont eux, beaucoup travaillé sur la relation $P_{méca} - t_{lim}$ pour évaluer l'endurance d'un cycliste (méthode de mesure directe de l'endurance) à partir de l'analyse du taux de lactate sanguin [48]. A partir d'un grand nombre de cyclistes testés, ils ont modélisé une équation qui prédit le t_{lim} lors d'un test rectangulaire à intensité sous maximale pour des temps limite compris entre 10 et 70 minutes, à partir du taux de lactate sanguin au bout de 10' d'effort (intensité de départ choisie entre 50% et 90% de la puissance maximale) (A) et de la pente d'évolution de ce taux entre la 5^{ème} et la 10^{ème} minute (B) :

$$\text{Log } t_{lim} = 4,2067 - 0,8221 * \log A - 0,2519 * \log B$$

De plus, il se sert de cette méthode afin de suivre l'évolution du potentiel physique des athlètes comme on peut le voir sur la figure 17, représentant l'évolution de t_{lim} d'un cycliste après la passation de trois tests à trois périodes différentes de l'entraînement [49]. Cette méthode s'apparente donc à une méthode de suivi de la relation $P_{méca} - \text{temps}$ d'un cycliste.

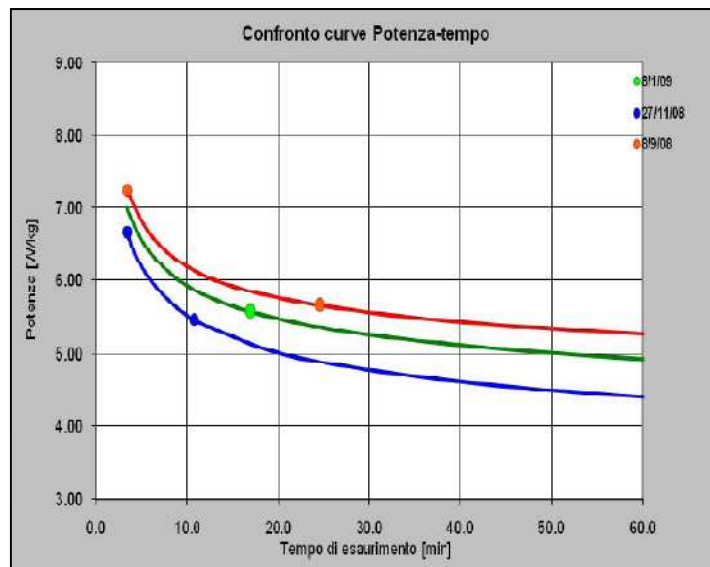


Figure 18 : Evolution de la courbe $P_{méca} - \text{temps}$ d'un cycliste (Ivan Basso) à partir d'un test de temps limite (Sassi [49])

On recense très peu d'études dans la littérature scientifique de suivi de cette relation $P_{méca}$ maximale record en fonction du temps chez des cyclistes lors de compétitions et non plus en conditions de laboratoire ; ce à quoi mes recherches s'apparentent. Cependant, on peut citer deux travaux sur ce sujet : celui de Larrazabal et coll [27] qui ont effectué le suivi de cinq cyclistes professionnels pendant deux saisons afin d'établir la relation entre le temps de maintien et la $P_{méca}$ relative (par rapport au poids de l'athlète) (figure 19).

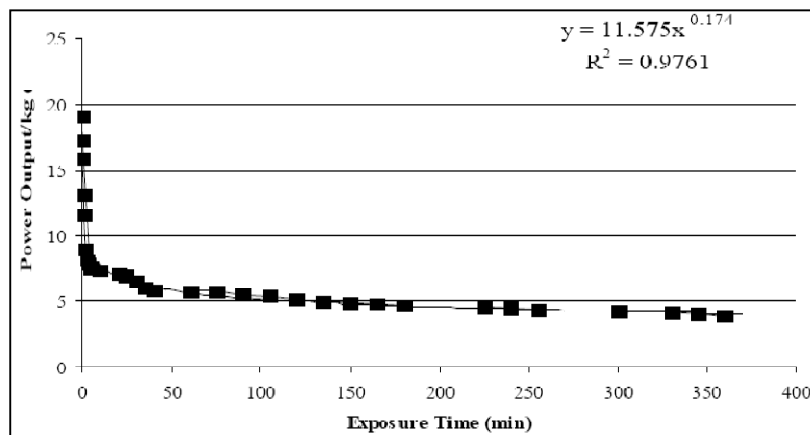


Figure 19 : Relation $P_{méca}$ - temps de maintien à partir du suivi de 5 cyclistes professionnels (Larrazabal et coll [27])

Et enfin, Villerius et coll [56] ont mené une étude sur la détermination du profil physiologique à partir du suivi de cyclistes compétitifs de différents niveaux pendant 14 mois. Ils ont dénommé ce profil de puissance (puissance maximum maintenue en fonction du temps) comme le profil physiologique d'un athlète, qui montrerait « une signature physiologique du potentiel physique du cycliste ». En effet, chaque profil de puissance d'un athlète diffère selon le niveau et le sexe du cycliste (figure 20), ce qui lui donne un profil propre à son potentiel.

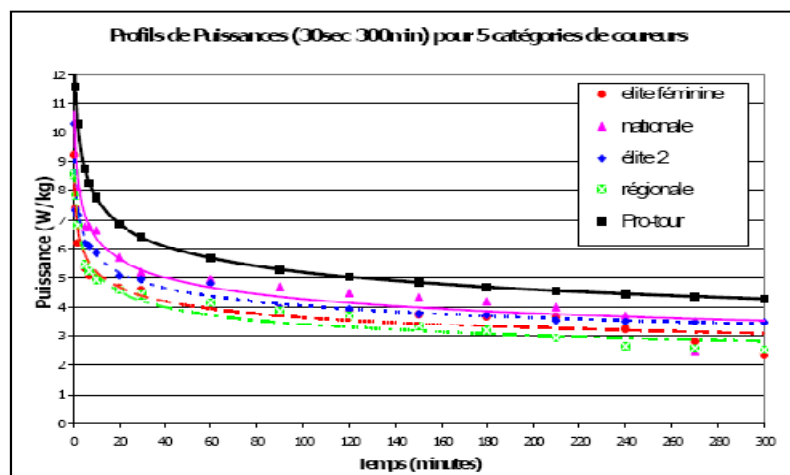


Figure 20 : Profil de puissance de 5 cyclistes de différents niveaux (Villerius et coll [56])

5. Perspectives

Les recherches sur l'analyse de cette relation $P_{\text{méca}}$ – temps datent de plus d'un siècle et la littérature scientifique est pauvre en ce qui concerne cette relation en cyclisme. Pourtant, celui-ci est le seul sport où il est possible de quantifier de façon précise la $P_{\text{méca}}$ développée sur le terrain par un athlète. C'est pourquoi il serait intéressant et innovant d'étudier le concept de Profil de Puissance Record (PPR) sur un large échantillon de cyclistes de niveaux différents mais également de caractéristiques physiques différentes (grimpeur, sprinter, rouleur...). De plus, l'analyse de l'évolution du PPR d'un athlète à long terme peut devenir un outil innovant du suivi de l'entraînement afin de mieux quantifier une progression. Ce travail de recherche de Master s'inscrit dans une démarche de recherche dans le domaine du sport de haut niveau mais également dans la lutte contre le dopage. En effet, Schumacher et Pottgiesser [52] ont proposé d'utiliser ce concept de profil de performance dans ce but. Selon eux, un suivi des performances pointu des athlètes, tout sport confondu, permettrait de cibler ceux aux progressions suspectes. Ainsi, en couplant ce profil avec le passeport sanguin biologique (suivi des valeurs sanguines), il serait probablement possible de prouver indirectement l'usage de méthodes illicites dans la réalisation de certaines performances. Les méthodes antidopage perdraient ainsi le temps de retard qu'elles ont entre l'entrée sur le marché d'une nouvelle molécule et la création du test prouvant son utilisation. D'ailleurs, actuellement, la ministre de la santé et des sports (Roselyne Bachelot) a confié à son cabinet une mission de « réflexion et de propositions sur l'évaluation du profil physiologique en lien avec la performance dans le cadre de la lutte contre le dopage et de la préservation de la santé des sportifs ». Cette étude sur le PPR s'inscrit donc également dans cette thématique.

III. SUJETS ET METHODES

1. Sujets

Vingt cyclistes ont participé à cette étude après avoir donné leur consentement. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant. Dix de ces cyclistes appartiennent à des équipes professionnelles et parcourent entre 25000 et 35000 km par an (80 à 100 jours de courses par an) ; trois étant spécialistes des courses à étapes. Les dix autres sont classés en première catégorie dans des structures de division nationale 1 françaises, huit font partie de leur équipe nationale espoir (moins de 23 ans) et deux sont juniors. Ces 10 cyclistes parcourent environ 15000 à 23000 kilomètres par an (60 à 80 jours de courses par an). Les 20 sujets sont donc tous tournés vers le cyclisme de haut niveau : leur volume horaire d'entraînement hebdomadaire est compris aux alentours de 20 heures en moyenne.

Ces 20 cyclistes peuvent se diviser en 4 profil-types selon leur domaine de prédilection :

- Grimpeur : cyclistes excellant dans les cols, les courses montagneuses (7 sujets),
- Sprinter : cyclistes ayant une grande pointe de vitesse, très explosifs (3 sujets),
- Rouleur : cyclistes forts contre la montre ou pouvant rouler vite, très longtemps sur des parcours plats (4 sujets),
- Mixte : cyclistes n'excellant dans aucun de ces 3 domaines précédant mais ayant un profil intermédiaire (6 sujets).

	Age	Taille (cm)	Masse (kg)	PMA (W/kg)
Moyenne	23.9 ± 4.4	178.2 ± 4.0	66.2 ± 6.1	6.4 ± 0.5
Limites (min – max)	18 - 33	165 - 182	51 - 77	5.6 – 7.0
Grimpeurs	24.7 ± 5.2	177 ± 5.8	62.3 ± 5.7	6.8 ± 0.2
Sprinters	27.3 ± 1.5	181.3 ± 3.1	74.7 ± 2.1	5.9 ± 0.3
Rouleurs	23.8 ± 4.9	179.8 ± 1.3	68.0 ± 5.5	6.3 ± 0.4
Mixtes	21.2 ± 3.2	177.3 ± 2.9	65.4 ± 3.5	6.0 ± 0.4

Figure 21 : *Caractéristiques des sujets*

2. Matériel

Tous les sujets ont effectué la totalité des entraînements et des compétitions sur des vélos équipés d'un capteur de puissance SRM (Schoberer, Germany) afin de recueillir l'ensemble des performances de chacun sur une période de 10 mois (correspondant à un total de plus de 3000 fichiers). Le système SRM calcule la $P_{\text{méca}}$ en multipliant la force appliquée sur les manivelles (couple), à partir de la déformation de jauges de contraintes placées à l'intérieur du pédalier, qui convertissent le signal de déformation en fréquences (Hz), par la vitesse de pédalage (tr/min). La $P_{\text{méca}}$ est calculée selon cette équation :

$$P_{\text{méca}} = \frac{(\text{Cadence} \times [\text{fréquence mesurée} - \text{fréquence du "zero offset"}] \times 2\pi)}{\text{"pente"} \times 60}$$

(le « zéro offset » étant la fréquence (Hz) émise par le pédalier lorsqu'aucune force n'est appliquée sur les manivelles, la « pente » étant une valeur fixe qui montre, par combien la fréquence du « zéro offset » accroît par augmentation du moment d'un couple(Nm))

Le compteur, nommé PowerControl, reçoit, affiche et enregistre (fréquence d'enregistrement : 1 Hz) ces informations ainsi que celles de vitesse, de fréquence cardiaque ou encore d'altitude. Le pédalier SRM est considéré actuellement comme le meilleur système pour mesurer la $P_{\text{méca}}$ d'un cycliste (Lawton et coll [28], Gardner et coll [19]).



Figure 22 : le système SRM avec le pédalier (contenant les jauges de contraintes) et le compteur Powercontrol récepteur des informations

Chaque SRM a subi au départ un étalonnage statique afin de vérifier que le « slope » (défini par le constructeur) est correct (sans quoi les valeurs de $P_{\text{méca}}$ seraient erronées). Pour cela, nous suspendons plusieurs poids différents afin de vérifier que la « pente » est juste lorsque

nous traçons la relation entre la fréquence mesurée (Hz) et le moment du couple (Nm) des charges suspendus. Si la « pente » est erronée, nous la corrigeons.



Figure 23 : *Calibration statique du pédalier SRM pour contrôler « la pente »*

Comme tout appareil, le système a besoin d'être calibré à chaque séance pour être certain de la validité des valeurs de $P_{\text{méca}}$. La calibration est simple et se fait à travers une manipulation sur le Powercontrol. En calibrant le système on modifie le « zero offset » c'est-à-dire la fréquence émise par les jauges de contraintes lorsqu'il n'y a aucune pression sur les pédales. Les athlètes ont donc été informé de la nécessité de calibrer le système chaque fois qu'ils enfourchaient leur bicyclette et cela a été respecté puisque nous pouvons le contrôler à partir du logiciel SRM.

L'intérêt de mesurer la $P_{\text{méca}}$ d'un cycliste est de savoir précisément la quantité de travail qu'il développe à chaque coup de pédale. En effet, contrairement à la nage dans un bassin ou la course à pied sur une piste d'athlétisme, où la vitesse de déplacement renseigne directement sur le niveau d'intensité de l'athlète, le cycliste, de par la diversité du terrain qu'il franchit, du phénomène d'aspiration important ou du vent qui le pousse ou le retient, ne peut pas se fier à sa vitesse pour traduire le niveau de son effort. Ainsi pour avancer et vaincre les résistances (traînée aérodynamique de l'air, résistance au roulement et force de gravité) qui s'opposent à lui, le cycliste doit produire une énergie : cette énergie dite chimique de la contraction musculaire, lorsqu'il appuie sur les pédales, se transforme en énergie de propulsion mécanique qui fait tourner les manivelles, la chaîne et la roue arrière, ce qui le fait avancer. Ainsi, cette force appliquée sur les manivelles à une certaine vitesse de pédalage renvoie à la $P_{\text{méca}}$. Nous rappelons ici qu'une $P_{\text{méca}}$ (W) est une quantité de travail (J) accomplie par unité

de temps (s) et que dans le cas du cyclisme, nous l'obtenons par le produit du couple (force appliquée sur les manivelles en rotation) (N.m) par la vitesse de pédalage (en rad/s).

3. Analyse des fichiers SRM

L'ensemble des 10 mois (totalité des entraînements et compétitions) des 20 sujets a été analysé afin de tracer et créer le profil de puissance record de chaque sujet. Le logiciel WKO+ (société TrainingPeaks) nous a permis d'obtenir rapidement les records de $P_{méca}$ de chacun des fichiers. En effet, il suffit de créer un compte par sujet dans ce logiciel et de programmer la recherche des records de $P_{méca}$ sur les différentes durées d'exercice suivantes : 1, 5, 30, 60 secondes, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 240 minutes pour chaque entraînement ou compétition. Comprenons bien : le logiciel recherche sur chaque fichier les intervalles de temps programmés où le cycliste a effectué la meilleure moyenne de $P_{méca}$. Par exemple, pour obtenir le record de $P_{méca}$ sur 30' le logiciel va analyser sur l'ensemble du fichier, les 30' consécutives où l'athlète a développé le plus de puissance.

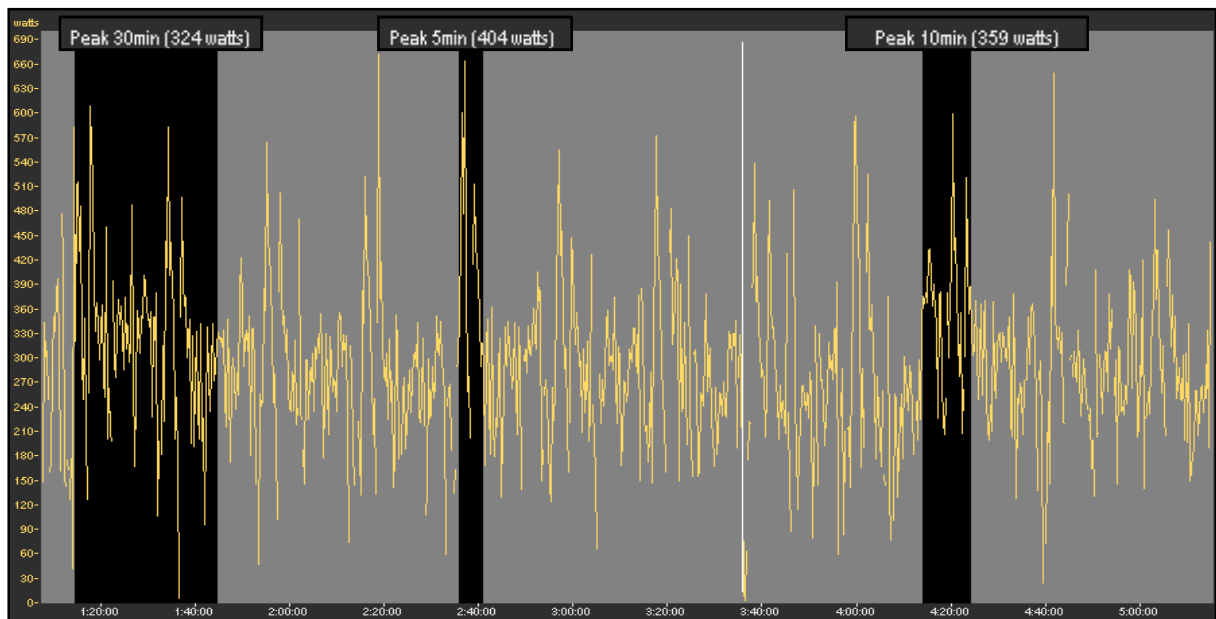


Figure 24 : Exemple de fichier SRM analysé avec le logiciel WKO+ TrainingPeaks (puissance en jaune) où l'on retrouve (surligné en noir) sur une compétition les records de $P_{méca}$ sur 5, 10 et 30 minutes

Ensuite, nous exportons en fichier texte ces records sur un fichier Excel (Microsoft Office Edition 2007), propre à chaque sujet, où l'on recense tous les records avec d'un côté tous les entraînements et de l'autre toutes les compétitions (figure 25).

Durée		00-00-01	00-00-05	00-00-30	00-01-00	00-05-00	00-10-00	00-20-00	00-30-00	00-45-00	01-00-00	02-00-00	03-00-00	04-00-00	Poids
Records Compétition Saison 2010 (W)		1377	1300	766	613	455	423	409	387	364	349	315	294	290	
Records Compétitions Saison 2010 (W/kg)		19,4	18,3	10,8	8,6	6,4	6,0	5,8	5,5	5,1	4,9	4,4	4,1	4,1	
Course 1	Aix	2'00"2/10	1395	1182	584	555	456	401	357	345	337	326	303	289	71
Course 2	Jean Massat	2'10"2/10	1289	1193	669	545	437	409	358	326	307	291	272	273	71
Course 3	4 cantons	0'60"3/10	1343	1149	691	530	406	378	347	334	319	309	306	294	71
Course 4	Crétérium d	0'70"3/10	1266	1227	678	550	410	365	339	319	308	301	301	271	71
Course 5	Paris Troy	1'40"3/20/10	1212	1031	679	599	412	383	354	344	341	337	311	290	71
Course 6	Troyes Dij	2'10"3/20/10	1179	1057	663	533	416	379	360	347	330	321	303	289	71
Course 7	Saint Etien	2'70"3/10	1184	1051	679	483	409	388	354	327	308	313	298	268	71
Course 8	Artois Etap	0'20"4/10	1182	1060	709	565	396	381	343	346	332	330	304	290	71
Course 9	Tour des F	1'00"4/10	1304	1064	644	592	384	372	338	338	328	318	288	282	71
Course 10	Bastogne L	1'70"4/10	1377	1300	766	570	393	361	335	322	316	310	306	291	71
Course 11	Paris Mant	2'50"4/10	1245	1201	733	542	410	363	333	324	316	304	286	276	71
Course 12	Loire Atlan	1'50"5/10	1271	1223	713	522	389	364	332	328	319	314	299	267	71
Course 13	Loire Atlan	1'60"5/10	1264	1141	747	571	375	345	329	309	298	290	279	0	71
Course 14	Isard 1	2'00"5/10			737	613	405	354	334	314	294	277	253	249	71
Course 15	Isard 2	2'10"5/10	1233	1121	578	533	423	391	376	366	358	349	315	290	71
Course 16	Isard 3	2'20"5/10	1269	1144	550	453	395	374	341	304	292	292	267	247	71
Course 17	Isard 4	2'30"5/10	1248	1183	604	513	452	423	409	387	364	341	299	291	71

Figure 25 : Exemple de fichier Excel d'un sujet où l'on retrouve le tableau reprenant toutes les données en compétition ainsi que les records (exprimés en W et en W/kg)

Nous partageons également les résultats en $P_{m\acute{e}ca}$ brute (comme calculées dans le logiciel) et en $P_{m\acute{e}ca}$ normalisée par le poids du sujet (afin de permettre les comparaisons entre les sujets). En effet, à travers l'analyse des $P_{m\acute{e}ca}$ brutes nous nous mettons dans les conditions d'une comparaison sur terrain plat (où le poids intervient très peu), alors qu'avec des valeurs normalisées dans celle d'une montée où l'essentiel de la $P_{m\acute{e}ca}$ est développé pour lutter contre la force de gravité. Cependant pour être vraiment juste, il faudrait exprimer les valeurs en fonction de la surface frontale du sujet (W/m^2) pour simuler les conditions sur terrain plat car c'est avant tout contre la résistance aérodynamique que le cycliste lutte pour avancer et donc sa surface frontale (en m^2) est l'élément clé. Or, comme les coureurs passent la plupart de leur temps à l'abri dans les roues d'autres coureurs on peut légitimement considérer que la résistance aérodynamique à vaincre n'est pas résistive à 100%.

Pour établir le PPR, nous recueillons uniquement la $P_{m\acute{e}ca}$ record réalisée sur chacune des différentes durées d'exercices définies préalablement.

4. Analyse statistique

Le test PLSD de Fisher a été utilisé pour établir toutes les comparaisons de PRR entre les différents groupes (catégories, profil-types). L'analyse statistique a été réalisée grâce au

logiciel Statview 5.0 (Abacus Corporation, CA, USA). Le seuil de significativité p était fixé à 0,05. Le niveau de significativité était indiqué comme suit : * :p<0,05.

IV. RESULTATS

1. Le Profil de Puissance Record (PPR)

Les PPR des 20 cyclistes ont été établis sur une période de 7 mois regroupant des périodes d'entraînement et d'autres de compétition. Le tableau récapitulatif ci-dessous montre une décroissance de la $P_{méca}$ moyenne sur l'ensemble des 20 cyclistes allant de 1258 W (18,9 W/kg) sur une seconde à 267 W (4,0 W/kg) sur 4 heures.

On distingue des différences de $P_{méca}$ record importantes entre les cyclistes et ces différences s'amenuisent plus la durée augmente. Ainsi, il y a 574 W de différence entre le cycliste ayant la $P_{méca}$ record sur 1 seconde la plus élevée et celui ayant la plus faible. Alors que sur 4 heures, l'athlète à la $P_{méca}$ la plus élevée a un record 82 W plus élevé que celui ayant la plus faible.

Durée	1''	5''	30''	1'	5'	10'	20'	30'	45'	60'	120'	180'	240'
Moyenne (W)	1258	1178	791	617	431	400	371	352	335	324	295	280	267
Min	988	944	637	547	360	330	313	303	294	274	258	229	221
Max (W)	1562	1443	1016	715	483	462	434	420	392	357	328	314	303
Moyenne (W/kg)	18.9	17.7	11.9	9.4	6.5	6.0	5.6	5.3	5.1	4.9	4.5	4.2	4.0
Min	15.9	15.7	10.1	8.5	5.9	5.4	4.9	4.7	4.4	4.2	4.0	3.6	3.3
Max (W/kg)	21.4	19.6	13.6	10.6	7.3	6.8	6.2	6.0	5.7	5.5	5.0	4.7	4.4

Figure 26 : Tableau récapitulatif des records de $P_{méca}$ en puissance brute et puissance normalisée (Moyennes, Minimums et Maximums des 20 sujets)

Lorsque l'on trace le PPR moyen des 20 cyclistes (figure 27), on observe bien la forme hyperbolique de la relation $P_{méca}$ record – temps, décrite depuis plus d'un siècle. Ainsi la fonction hyperbolique caractérisant la décroissance des $P_{méca}$ records en fonction du temps a comme formule :

$$P_{méca} = 2,7802 t^{-0,174}$$

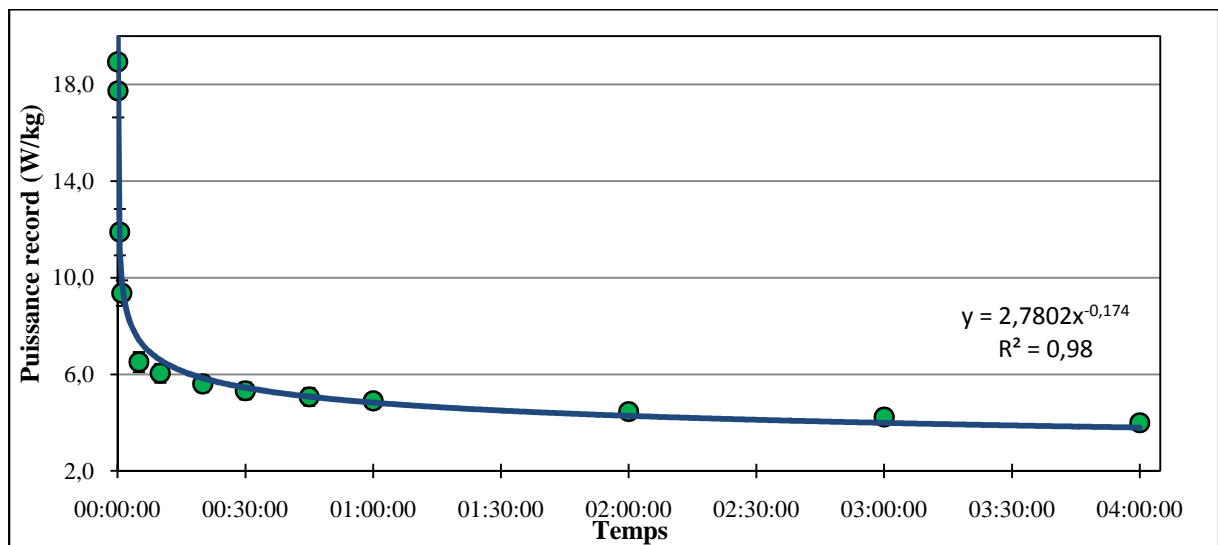


Figure 27 : Profil de Puissance Record (Moyenne des 20 sujets)

On observe une forte décroissance de $P_{méca}$ pour de faibles durées alors que plus la durée augmente plus la décroissance diminue. Par exemple, la $P_{méca}$ record moyenne diminue de 51% entre 1 seconde et 1 minute c'est-à-dire qu'en une minute la $P_{méca}$ maximum maintenue est donc divisée par deux, tout comme entre 1 minute et 2 heures (52% de diminution). Entre 1 et 5 minutes la perte de $P_{méca}$ est de l'ordre de 30% alors qu'ensuite entre 5 et 30 minutes elle est de 18%, de 8% entre 30 minutes et 1 heure, alors qu'au delà elle perd linéairement 5% par heure.

Le PPR permet d'évaluer les cinq qualités spécifiques au cyclisme sur route (figure 28) que sont : les qualités d'explosivité, de tolérance au lactate, de PMA, du seuil anaérobie et d'endurance. En effet, chaque $P_{méca}$ record renseigne sur la valeur des différentes aptitudes physiques du cycliste :

- Sur des durées de 1 et 5 secondes : qualité de sprint : explosivité
- Sur des efforts de 30 secondes à 1 minute : qualité de tolérance au lactate,
- Sur des efforts d'environ 5 minutes on quantifie la PMA,
- Sur des durées de 20 minutes à 1 heure : aptitude au seuil anaérobie,
- Sur des durées de 2, 3 et 4 heures : qualité d'endurance.

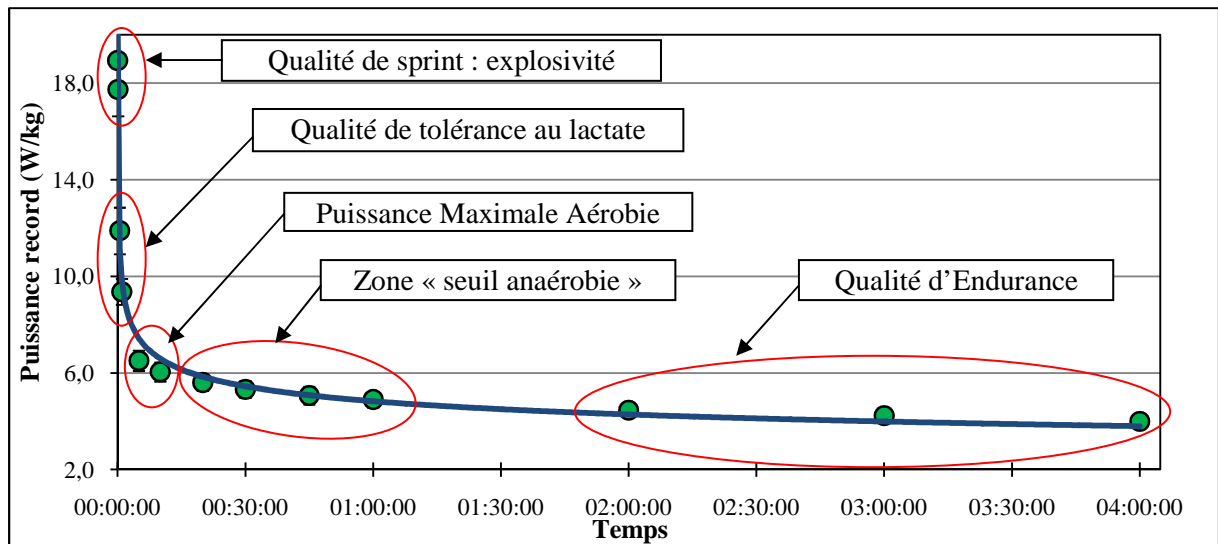


Figure 28 : Identification des 5 qualités physiques spécifiques au cyclisme sur le PPR moyen des 20 cyclistes

2. PPR Anaérobie

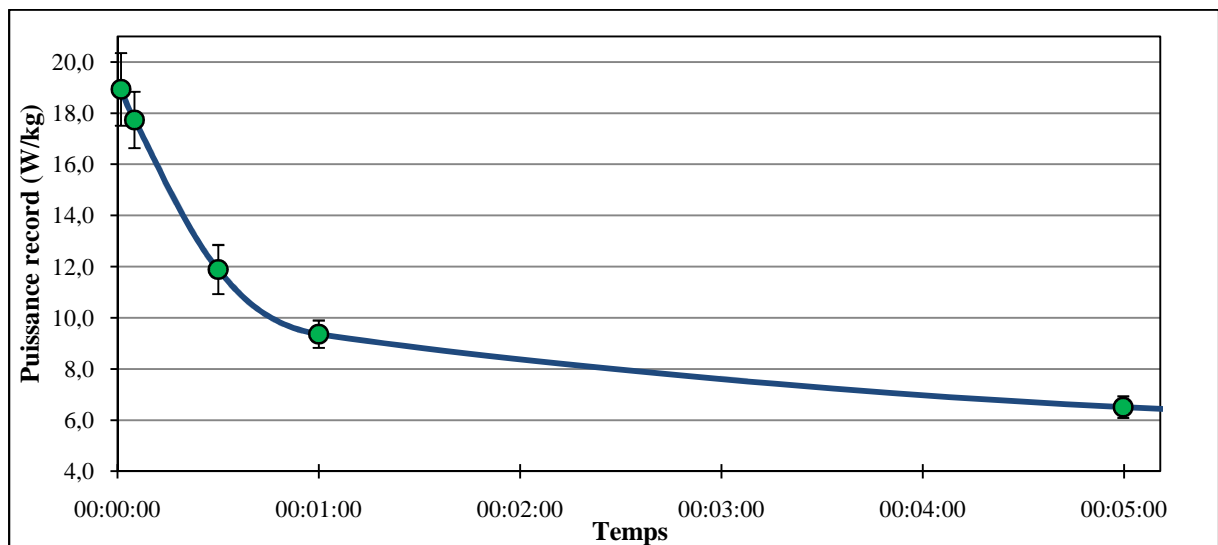


Figure 29 : Zoom sur la partie anaérobie du PPR moyen ($P_{méca}$ records comprises entre 1 seconde et 5 minutes)

Si on analyse le PPR plus précisément, on se rend compte que la décroissance de la $P_{méca}$ comprend plusieurs phases. En effectuant un zoom sur les processus anaérobie (de 1 secondes à 5 minutes) (figures 29, 30 et 31) on s'aperçoit que la décroissance marque des cassures qui expriment l'utilisation des différentes filières énergétiques. Ainsi, la première tranche (1 à 5 secondes) comprend les efforts réalisés à partir des processus phosphagènes de la voie anaérobie alactique puis une première cassure marque le début de la voie de la glycolyse

anaérobie (avec production de lactate) avec une pente qui s'adoucit plus on s'approche de 5 minutes, là où la part aérobie devient prédominante.

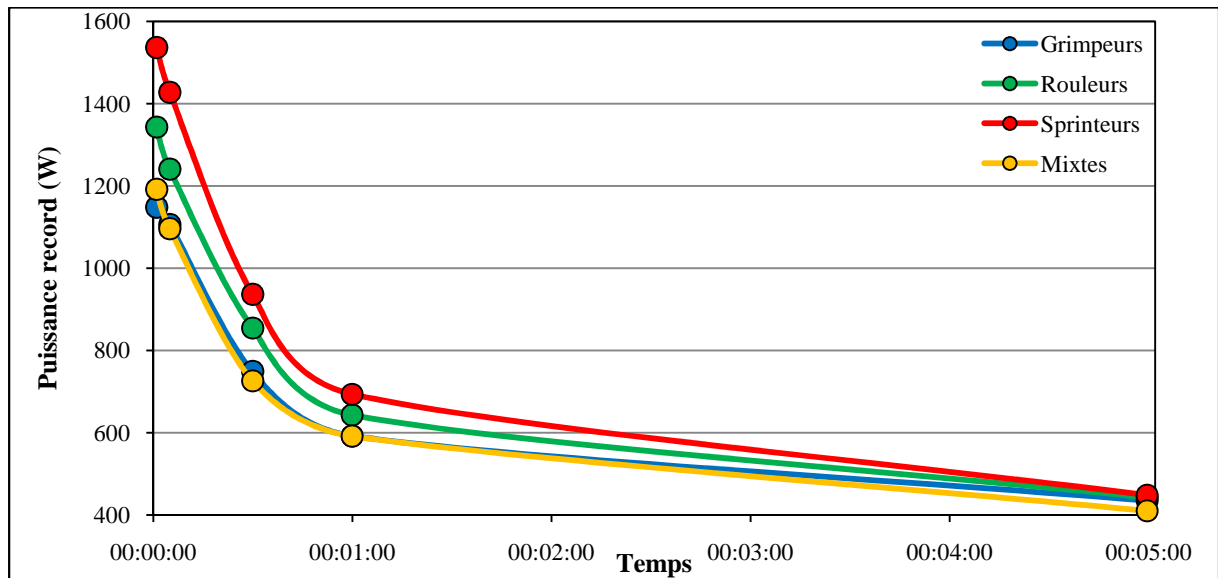


Figure 30 : Zoom sur les PPR par spécialités sur la partie anaérobie (en $P_{méca}$ brute)

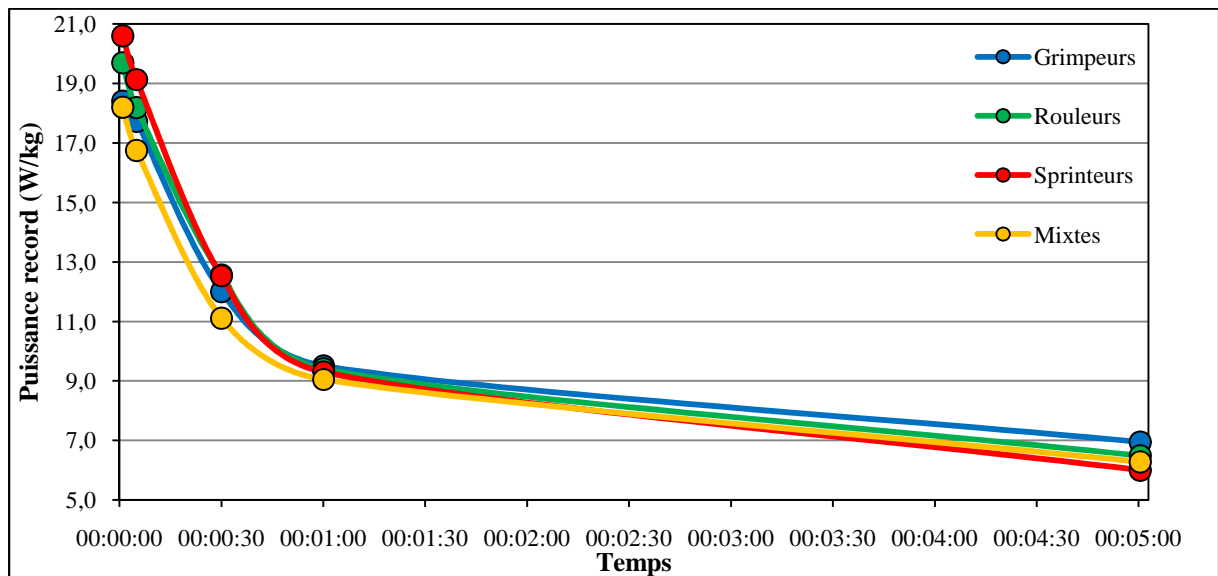


Figure 31 : Zoom sur les PPR par spécialités sur la partie anaérobie (en $P_{méca}$ normalisée)

Sur ce PPR anaérobie, on remarque que suivant le profil type de cycliste, la décroissance est différente (figure 30 et 31) et les constats distincts si l'on exprime les valeurs en $P_{méca}$ brute ou en fonction de la masse du sujet. Comme l'on pouvait s'y attendre, les sprinters ont leur PPR supérieur pour les efforts brefs (1 à 30 secondes) que ce soit en valeurs absolues ou normalisées. Si l'on exprime la $P_{méca}$ par rapport à la masse corporelle c'est-à-dire en se

mettant dans les conditions d'une montée, les grimpeurs ont un PPR plus élevé sur les efforts d'1 minute à 5 minutes alors que les cyclistes sans spécialité ont un PPR moins élevé.

3. PPR aérobic

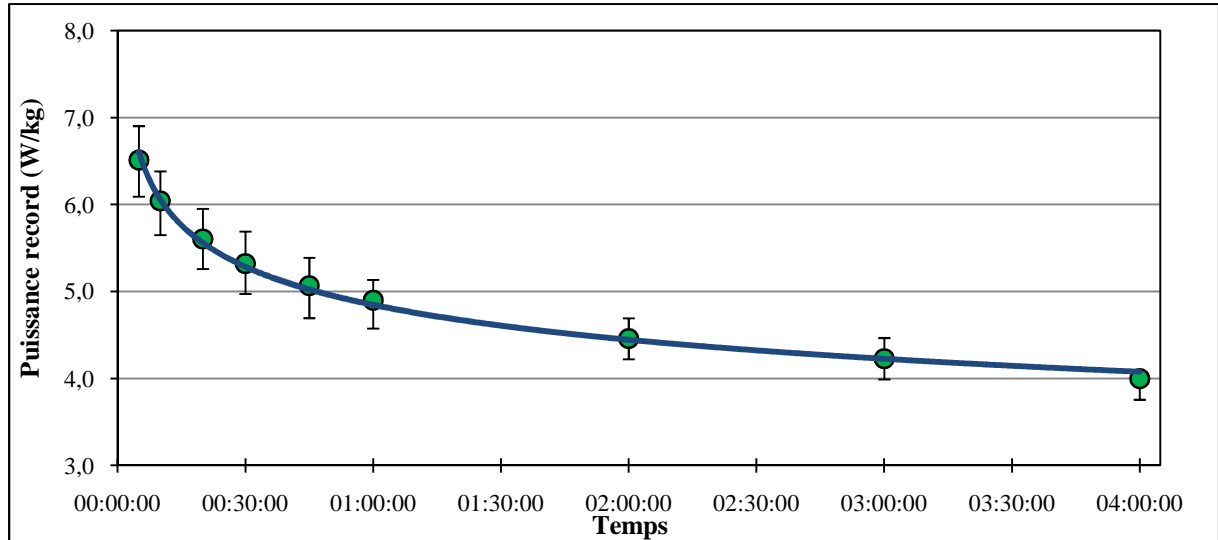


Figure 32 : Zoom sur la partie aérobic du PPR moyen ($P_{méca}$ records comprises entre 5 seconde et 4 heures)

En zoomant cette fois sur la partie aérobic du PPR (figure 32, 33 et 34), là aussi la décroissance comprend plusieurs cassures : une première entre la zone PMA et la zone « seuil anaérobic » (20 à 60 minutes) et une seconde entre 1 et 2 heures, où la régression devient linéaire. Cette pente qui s'adoucit s'explique également par une modification des processus aérobies où l'oxydation des graisses prend une part de plus en plus importante sur l'utilisation du glucose et du glycogène plus la durée augmente, ce qui se traduit par un niveau de puissance de plus en plus faible.

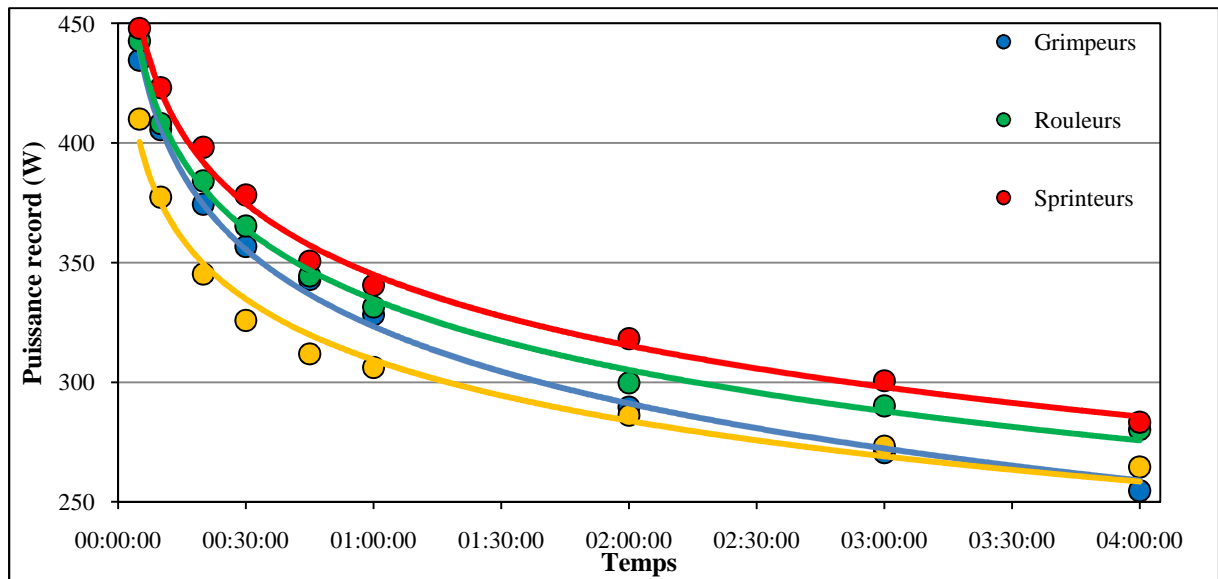


Figure 33 : Zoom sur les PPR séparés par spécialités sur la partie aérobie ($P_{méca}$ brute)

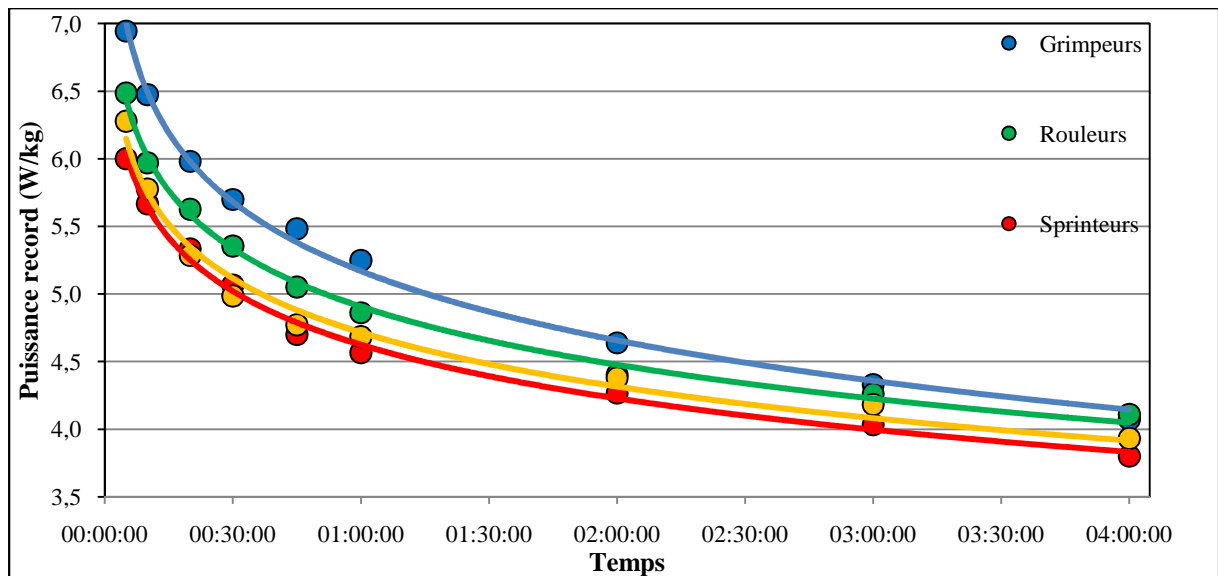


Figure 34 : Zoom sur les PPR par spécialités sur la partie aérobie ($P_{méca}$ normalisée)

En s'intéressant aux PPR classés par profil de cycliste, on s'aperçoit qu'en valeurs absolues les sprinters ont un PPR légèrement plus élevé que les rouleurs, en grande partie grâce à leur poids bien supérieur. Ainsi, on peut constater que sur terrain plat, les grimpeurs sont beaucoup moins à l'aise qu'en montée où les records exprimés en puissance normalisée montrent qu'ils sont largement supérieurs aux autres cyclistes sur toute la partie aérobie du PPR. Cependant, il faut rappeler que si les valeurs étaient exprimées en fonction de la surface frontale des sujets, les rouleurs auraient probablement un PPR supérieur aux autres. On retrouve bien les deux profils types de cyclistes (rouleur et grimpeur) dont les qualités de PMA et seuil anaérobie sont prépondérante afin d'être spécialiste dans leur domaine.

4. $P_{méca}$ record et profil-type de cycliste

Alors que l'analyse des différents PPR a montré plusieurs tendances, en s'intéressant aux différents records de $P_{méca}$ classés par aptitude physique (explosivité, tolérance lactate, PMA, seuil anaérobie et endurance) plusieurs résultats sont significatifs si l'on exprime les $P_{méca}$ en W/kg (figure 35) :

- Les grimpeurs ont des qualités d'endurance, de seuil anaérobie et de PMA significativement supérieures aux autres profil-types de cyclistes ;
- Les rouleurs possèdent une zone « seuil anaérobie » et une PMA supérieures aux sprinters et aux cyclistes sans point fort ;
- Les cyclistes au profil mixte ont une tolérance au lactate clairement plus faible que les autres types de cyclistes ;
- Les sprinters ont des $P_{méca}$ records significativement plus élevés en explosivité que les grimpeurs et les mixtes tandis que les rouleurs possèdent néanmoins de bonnes dispositions dans cette aptitude physique.

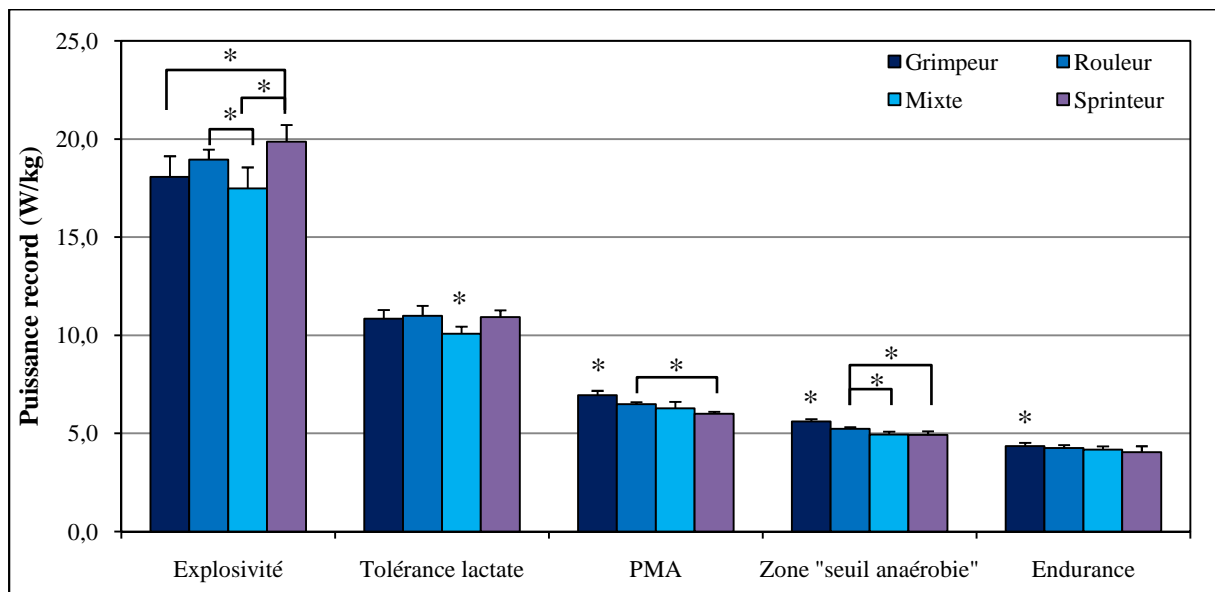


Figure 35 : Analyse des différences des qualités physiques en fonction du profil type de cycliste (en puissance normalisé)

En exprimant ces records en $P_{méca}$ brute (figure 36) :

- Les sprinters et les rouleurs ont des qualités d'explosivité et de tolérance au lactate supérieures aux grimpeurs et cyclistes polyvalents ;

- Ces derniers ont un seuil anaérobie significativement plus faible que les autres athlètes.

Ainsi, les tendances observées sur les PPR sont statistiquement prouvées par cette analyse.

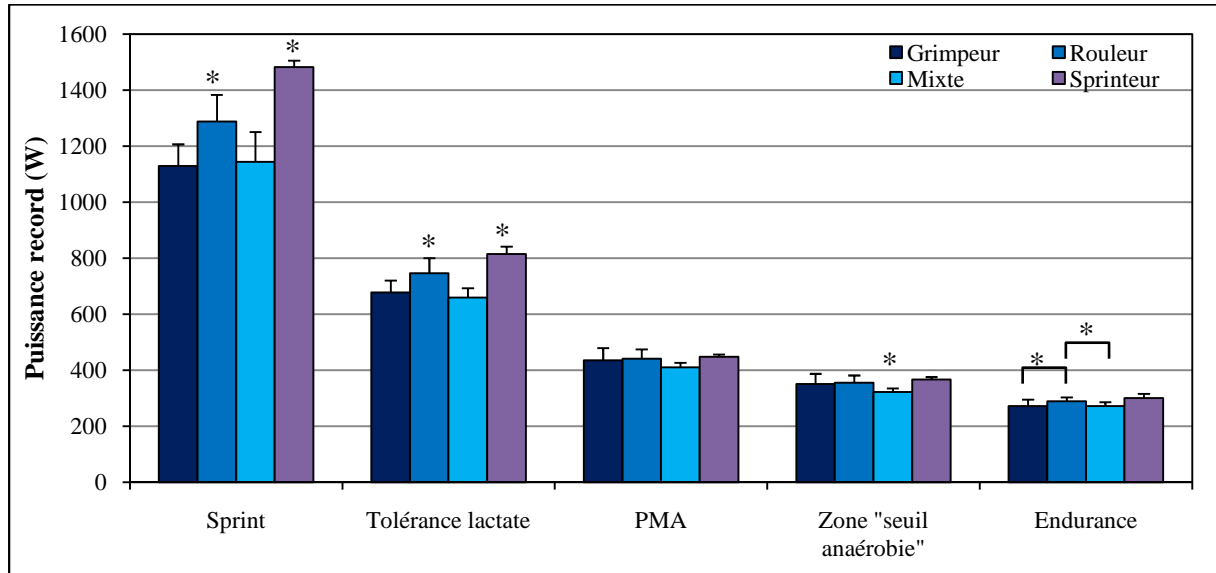


Figure 36 : Analyse des différences des qualités physiques en fonction du profil type de cycliste (en puissance brute)

5. Zone « seuil anaérobie »

Comme nous l'avons souligné précédemment, nous remarquons une cassure sur le PPR aérobie avec la mise en évidence d'une zone comprise entre 20 et 60 minutes. C'est dans cette zone que se situe le fameux seuil anaérobie (qu'il soit obtenu par l'analyse du taux de lactate sanguin ou par celle des échanges ventilatoires). Nous avons voulu en savoir plus pour mieux cerner cette zone (figure 37).

	Différences en P_{norm} (W/kg)	Différences en P_{brut} (W)
Moyenne	0.7 ± 0.2	48 ± 14
Limites (min – max)	0.5 – 1.1	30 – 79
Grimpeurs	0.73 ± 0.23	49.4 ± 15.2
Sprinters	0.77 ± 0.31	55.2 ± 22.0
Rouleurs	0.77 ± 0.18	48.1 ± 14.9
Mixtes	0.60 ± 0.09	41.1 ± 7.8
Juniors	0.61 ± 0.15	41.6 ± 13.6
1^{ère} catégorie	0.55 ± 0.03	36.3 ± 4.3
Equipe de France Espoir	0.84 ± 0.09	51.4 ± 8.1
Professionnel	0.68 ± 0.15	48.9 ± 10.7
Prof. Course à étapes	0.77 ± 0.3	52.8 ± 22.3

Figure 37 : Différences entre les records de $P_{méca}$ sur 20' et 1h caractéristiques de la zone « seuil anaérobie »

Cette régression plus faible dans la forme curvilinéaire du PPR marque une transition entre la zone où l'anaérobie prend une grande part dans le métabolisme énergétique et la zone dite d'endurance où la régression devient quasi-linéaire. Il apparaît qu'en moyenne la différence de $P_{méca}$ entre le record sur 20' et celui sur 1 heure est de l'ordre de 0.7W/kg (48 W). La $P_{méca}$ record moyenne subit une diminution d'environ 13% dans cette zone. Mais on remarque que les valeurs des sujets sont assez espacés : de 0.5 à 1.1 W/kg de différence. De plus, on ne note aucune différence significative selon le profil-type de cycliste, bien qu'on observe une certaine tendance à ce que les cyclistes sans points forts aient une zone « seuil anaérobie » plus resserrée (0.6 W/kg en moyenne contre plus de 0.73 W/kg pour les autres). Au regard des catégories des cyclistes on observe une tendance : les catégories inférieures (junior, 1^{ère} catégorie) ont une zone « seuil anaérobie » moins étendue que leur supérieurs (Equipe de France Espoir et professionnel). Seuls les cyclistes 1^{ère} catégorie ont des différences entre les records sur 20 et 60 minutes significativement plus faibles (0.55) que les cyclistes appartenant à l'équipe de France espoir (0.84) et les professionnels spécialistes des courses à étapes (0.77).

6. PPR exprimé sur une échelle de temps logarithmique

A la manière de Peronnet et Thibault [43], on peut établir le PPR sur une échelle logarithmique afin d'obtenir une droite représentant le potentiel du cycliste mais seulement sur la partie aérobie (5' à 4h). Une droite permet de schématiser plus simplement la diminution de $P_{méca}$ en fonction du temps et de mieux visualiser les écartements entre les profils. C'est ce que nous observons si l'on porte sur un même graphique l'ensemble des PPR des 20 cyclistes de l'étude (figure 38). Nous constatons qu'à la valeur de PMA, l'écartement entre tous les sujets est d'environ 1.5W/kg alors qu'il diminue avec l'augmentation du temps. Cela peut s'expliquer par le fait que sur des longues durées les $P_{méca}$ records sont obtenus sur des courses où une grande partie est réalisée dans le peloton, ainsi les grimpeurs aux gabarits plus petits (mais aux PMA les plus importantes) arrivent plus facilement à se protéger derrière des rouleurs ou des sprinters (aux gabarits plus imposants) afin de dépenser moins d'énergie.

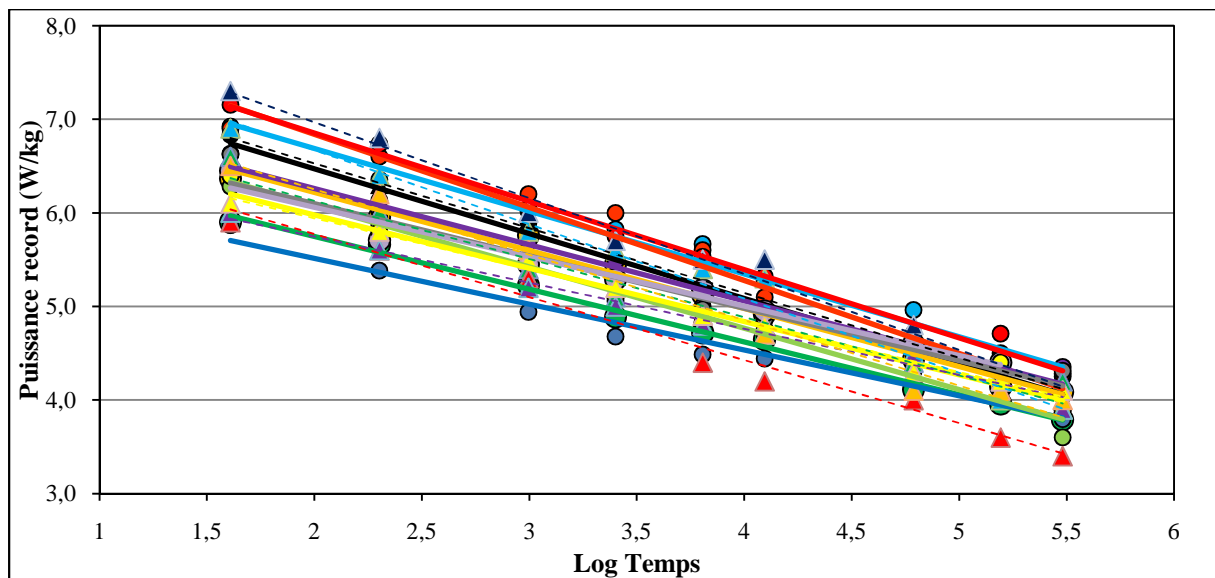


Figure 38 : PPR des 20 sujets exprimés sur une échelle de temps logarithmique sur la partie aérobie

Peronnet et Thibault utilisaient la décroissance du % de VMA (et VO_2max) en fonction du temps pour évaluer l'aptitude d'Endurance. Ils caractérisaient leur VMA avec le record de l'athlète sur 7' [44]. Nous avons essayé d'en faire autant (figure 39) mais en prenant cette fois la $P_{méca}$ record sur 5' comme indice de PMA, comme le fait Coggan [10]).

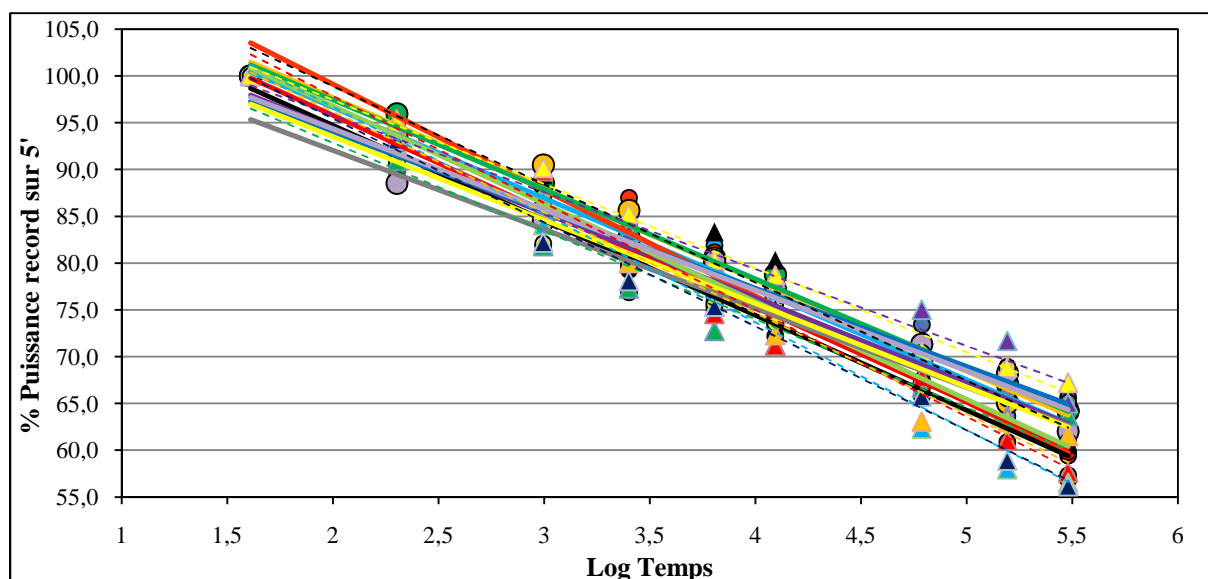


Figure 39 : PPR des 20 sujets exprimés sur une échelle de temps logarithmique sur la partie aérobie exprimé en % de la PMA

Pour calculer leur indice d'endurance, Peronnet et Thibault se sont intéressés aux pentes de ces droites. En étudiant ces différentes pentes (que ce soit sur les PPR exprimés en $P_{méca}$ brute, $P_{méca}$ normalisé ou en % de la PMA) aucune relation ne peut être établie entre les qualités d'endurance (records de $P_{méca}$ sur 2, 3 et 4 heures) et les coefficients de régression des droites. Cependant nous avons analysé ces pentes en fonction du profil-type de cycliste mais également en fonction du niveau de la catégorie des sujets (figure 40, 41 et 42) afin de se rendre compte si les valeurs de pente sont représentatives du profil de coureur ou du niveau de compétition.

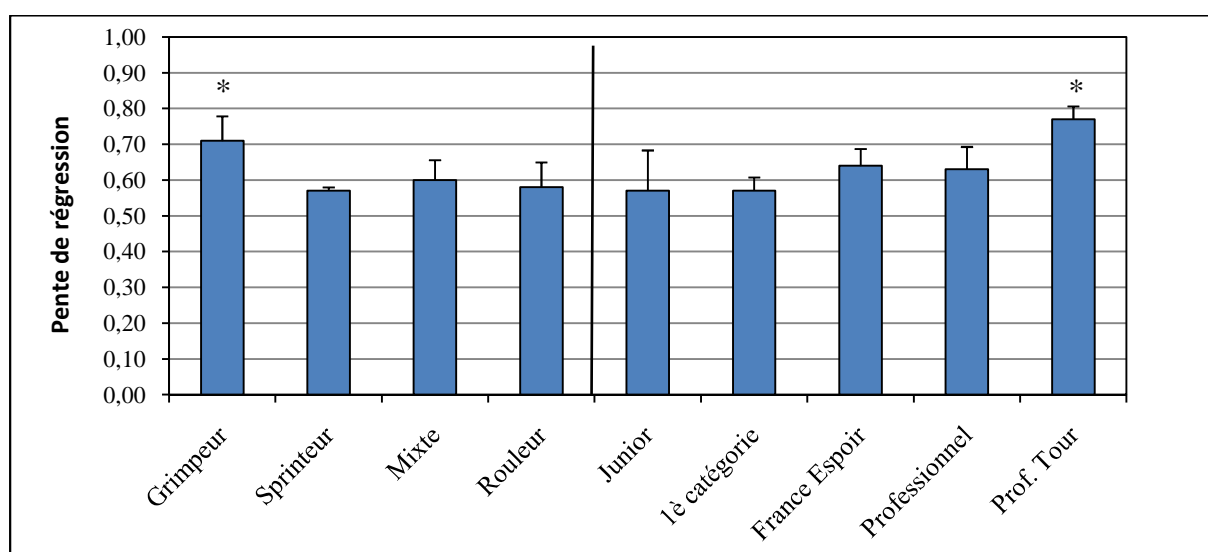


Figure 40 : Analyse des pentes des PPR en fonction du profil-type de cycliste et du niveau de pratique ($P_{méca}$ normalisée)

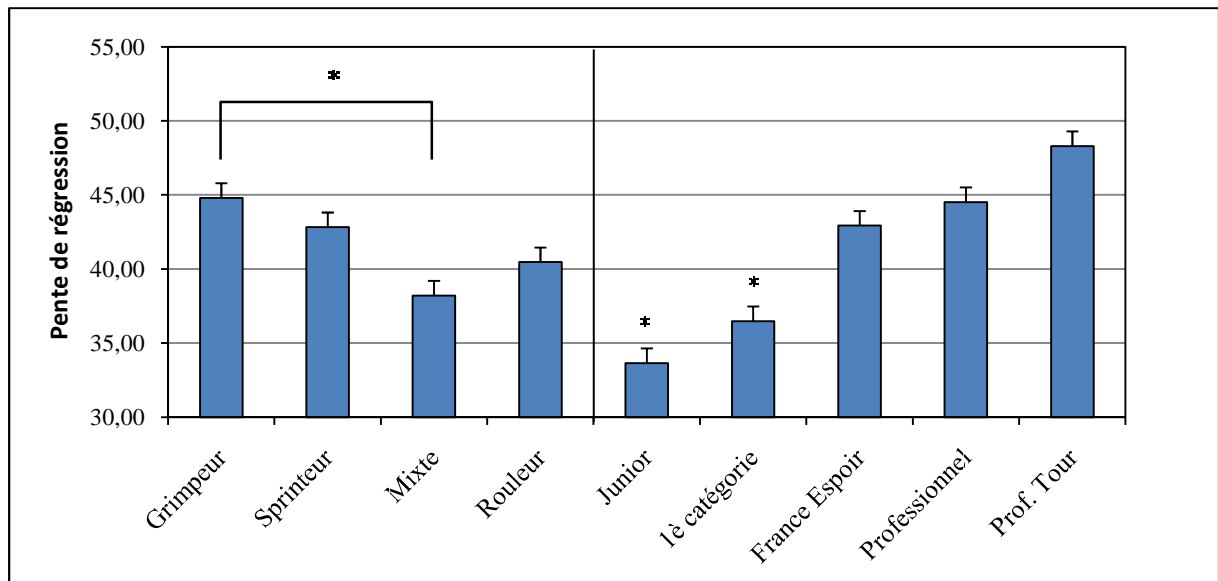


Figure 41 : Analyse des pentes des PPR en fonction du profil-type de cycliste et du niveau de pratique ($P_{méca}$ brute)

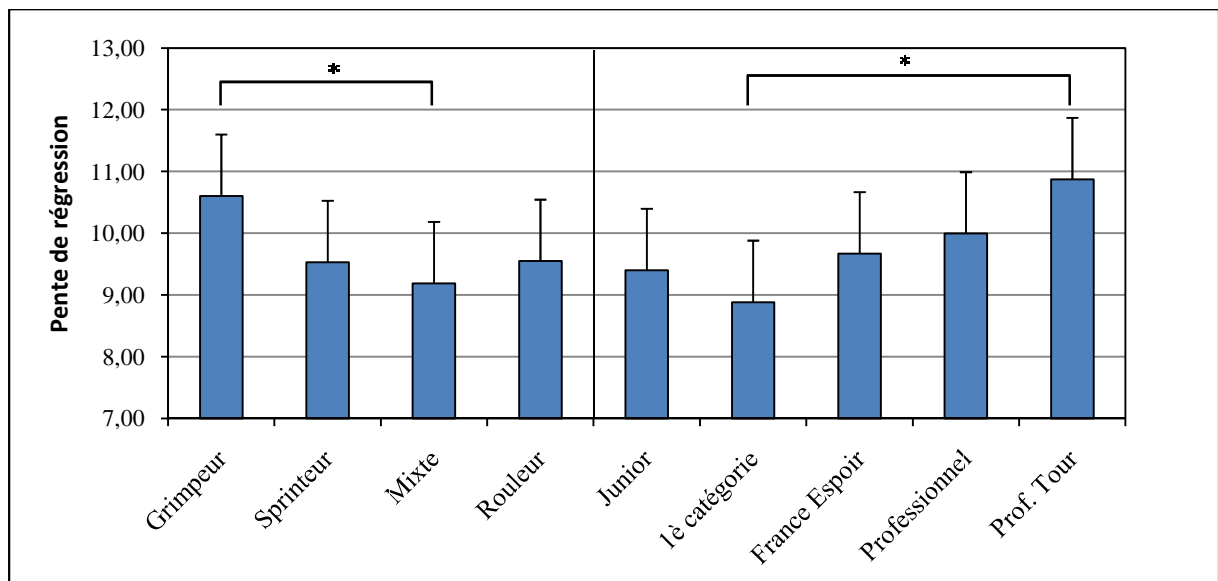


Figure 42 : Analyse des pentes des PPR en fonction du profil-type de cycliste et du niveau de pratique (% PMA)

On remarque qu'il n'existe pas de grandes différences au niveau des pentes entre les profils-types. Seulement on remarque que statistiquement les grimpeurs ont des coefficients de régression plus importants que les autres cyclistes à partir des PPR exprimés en $P_{méca}$ relative. Cependant, on observe une tendance : les pentes semblent être plus faibles plus le niveau compétitif est faible. En effet, statistiquement les juniors et cyclistes de 1^{ère} catégorie ont des pentes plus faibles en $P_{méca}$ brute alors qu'en $P_{méca}$ normalisée les cyclistes de niveau Pro Tour

ont des pentes statistiquement plus élevées. Plus les $P_{m\acute{e}ca}$ records entre 5 minutes et 1 heure sont élevées, plus la pente est importante. Ainsi, il est difficile d'établir les mêmes conclusions que Peronnet et Thibault puisque selon eux, des pentes faibles signifieraient une grande endurance. Il est difficilement concevable que l'endurance soit plus faible chez les cyclistes de niveaux supérieurs donc on peut affirmer que la classification faite par Perronnet et Thibault sur l'analyse des pentes (sur des vitesses et de la consommation d'oxygène) ne peut être appliquée à l'étude des $P_{m\acute{e}ca}$ records. Toutefois, il semble intéressant de rapporter que plus le niveau compétitif est élevée plus la pente est importante.

7. PPR en fonction de la catégorie de pratique

Nous avons vu des différences de PPR selon les points forts des cyclistes mais il en existe également suivant la catégorie à laquelle appartiennent les cyclistes. Bien évidemment le PPR des professionnels est supérieur (décalé vers le haut) à celui des amateurs (1^{ère} catégorie) mais nous avons essayé d'aller plus loin dans la différenciation des niveaux de pratique en les classant dans 5 groupes : niveau 1^{ère} catégorie âgé de 18 ans (Junior), niveau 1^{ère} catégorie âgé de plus de 18 ans (1^{ère} catégorie), niveau 1^{ère} catégorie mais faisant partie de l'équipe de France moins de 23 ans (France Espoir), professionnel et professionnel spécialiste des courses à étapes (Prof. Tour) (figure 43).

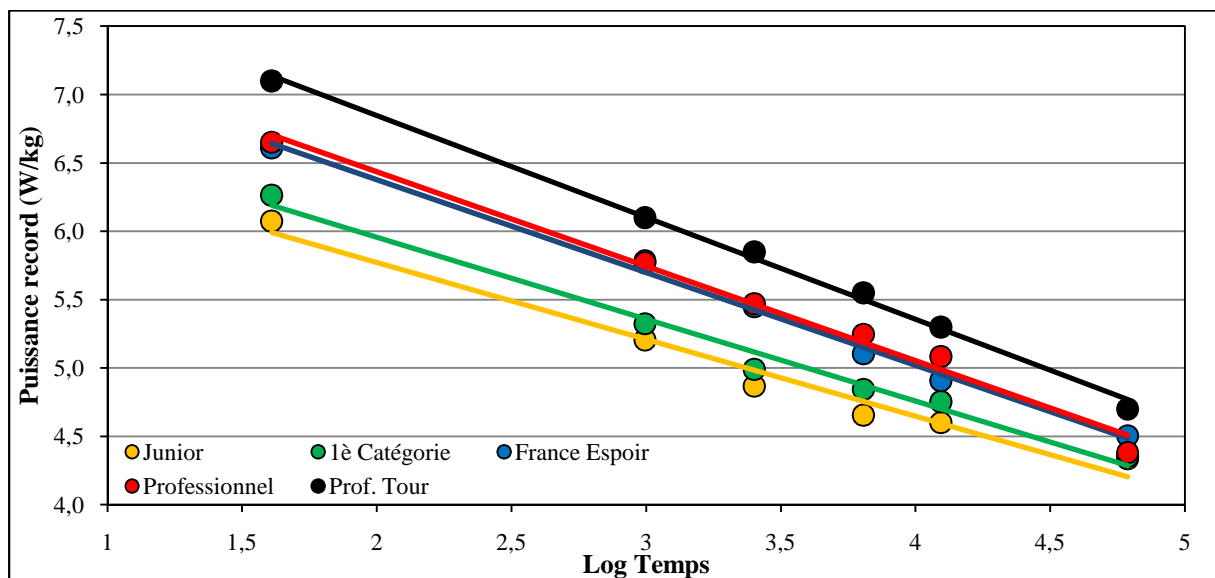


Figure 43 : PPR exprimés sur une échelle de temps logarithmique en fonction du niveau de pratique des cyclistes

La hiérarchie est en grande partie respectée puisque les cyclistes professionnels spécialistes des courses à étapes ont le PPR le plus élevé. Cependant, il faut noter que les autres professionnels et les athlètes appartenant à l'équipe de France Espoir ont un PPR très proche. Enfin, les cyclistes 1^{ère} catégorie ont un PPR plus faible mais toutefois plus élevé que celui des juniors.

On peut remarquer que la $P_{méca}$ record développée par les juniors pendant 5' est égale à celle soutenue pendant 20' par les professionnels spécialistes des courses à étapes, on observe le même constat entre ce que développent les plus jeunes pendant 20' et leurs aînés pendant 1 heure.

Si l'on observe cette fois la zone anaérobie des PPR (figure 44), la hiérarchie des catégories n'est plus vraiment respectée. Sur les records de $P_{méca}$ sur 1 et 5 secondes, les cyclistes de l'équipe de France Espoir sont devant les professionnels, les cyclistes 1^{ère} catégorie et enfin les professionnels spécialisés dans les courses à étape. Au niveau de l'aptitude de tolérance au lactate (30 et 60 secondes), c'est toujours le PPR des « France espoirs » qui est plus élevé devant celui des professionnels et celui des juniors.

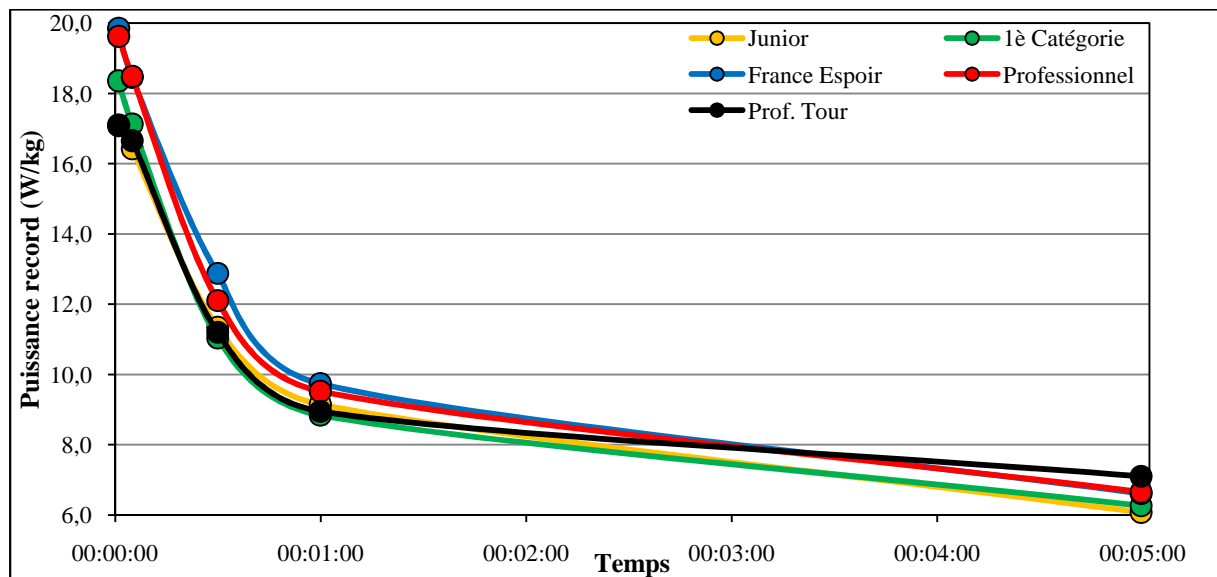


Figure 44 : Zone anaérobie des PPR en fonction du niveau de pratique des cyclistes

8. Suivi longitudinal du PPR

Avec le PPR, il est également possible de suivre son évolution au cours du temps c'est-à-dire au cours d'un mois, d'une saison voir même d'une carrière. L'intérêt est de quantifier une progression du potentiel physique de manière objective et en routine. Ainsi, nous avons

réalisé un suivi longitudinal du PPR des athlètes pendant la période de l'étude afin de démontrer que le PPR est un outil de suivi de l'entraînement. La figure 45 montre l'évolution du PPR d'un athlète, où le PPR de chaque mois a été reporté. On remarque une progression du potentiel de cet athlète au cours des mois 1, 2, 3 et 4 puisque le PPR se décale vers le haut. Il semble donc que cet athlète soit arrivé à un premier pic de forme au cours de ce mois puisque ces records des zones PMA et « seuil anaérobie » sont plus élevées. Ensuite, on observe une stagnation voir une légère régression (sauf dans la zone endurance) lors des mois 5 et 6 avant d'arriver au second pic de forme au mois 7, au cours duquel tous ses records ont été améliorés sur la partie aérobie.

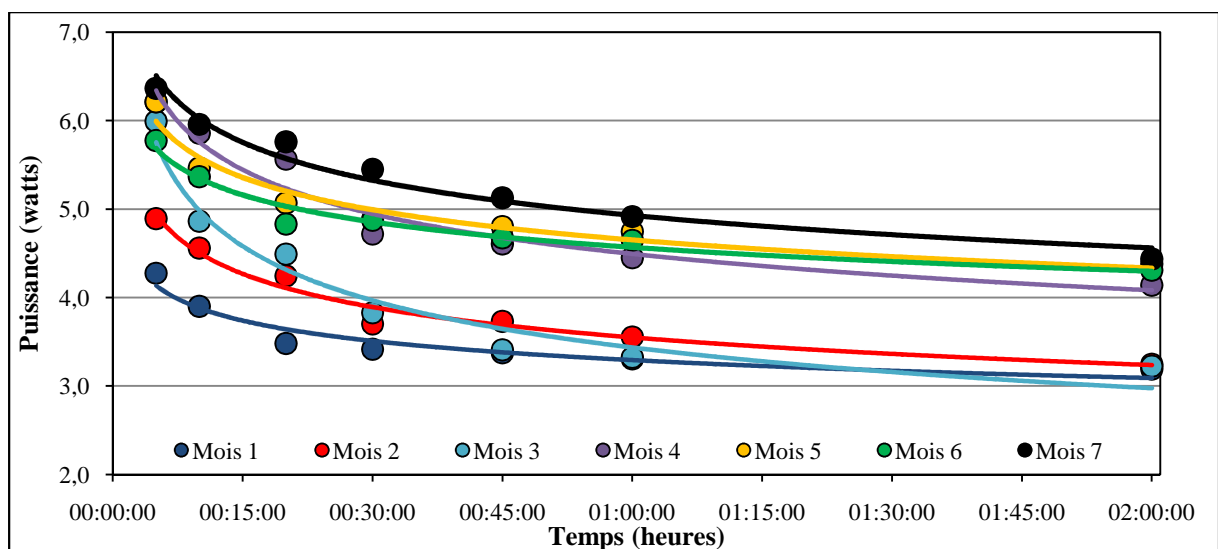


Figure 45 : Suivi mensuel du PPR d'un cycliste pendant 7 mois

9. Différence PPR Entraînement – PPR Compétition

Le capteur SRM étant fixé sur chaque vélo, il était possible de différencier le PPR à partir de tous les entraînements et celui de l'ensemble des compétitions (figure 46). On s'aperçoit que les records sur des durées très courtes (1, 5, 30 secondes) sont plus élevées à l'entraînement qu'en compétition (de 0,4 W/kg) si l'on fait une moyenne sur l'ensemble des sujets alors que sur une minute ils sont égaux. Sur des intervalles de temps plus longs (5 minutes à 4 heures) les $P_{méca}$ records sont plus élevées en situation de compétition sur les courses, les différences se quantifiant de 0,2 à 0,5 W/kg de 5 minutes à 1 heure et stagnant ensuite à 0,5 W/kg sur 1, 2, 3 et 4 heures.

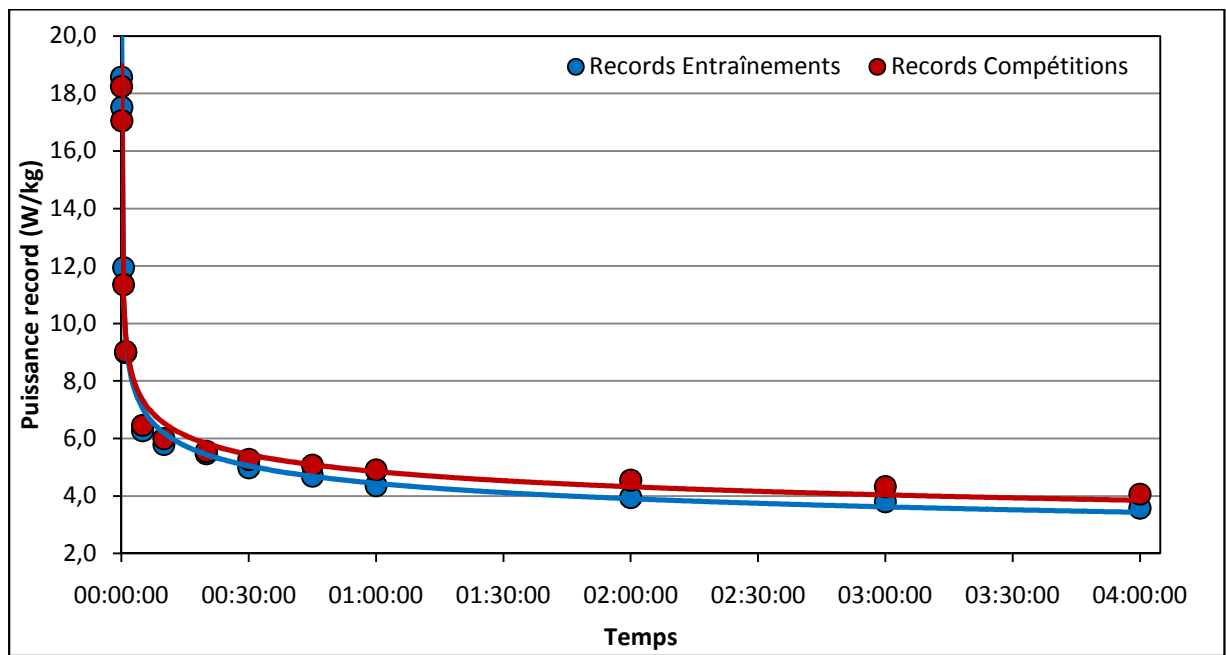


Figure 46 : *Différence PPR Entraînement – PPR Compétition*

V. DISCUSSION

Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer et de mieux comprendre les performances et l'évolution du potentiel physique du cycliste en fonction de son niveau de compétition et de ses caractéristiques physiques à travers le PPR. A partir des résultats obtenus, le PPR paraît être un concept novateur dans le domaine de l'entraînement en cyclisme. L'originalité de ce travail réside dans le fait que seulement deux études similaires [27, 56] de suivi des $P_{méca}$ sur le terrain à l'entraînement et en compétition, mais sur des populations plus petites et moins hétéroclites, ont fait l'œuvre de publications dans des congrès internationaux. L'analyse statistique révèle plusieurs résultats intéressants qu'il convient d'interpréter pour mieux appréhender les perspectives qu'offrent l'étude du PPR.

La détermination du PPR à partir de la relation entre les $P_{méca}$ records d'un cycliste et leur temps de maintien adopte bien la forme curvilinéaire observée depuis plus d'un siècle par les chercheurs s'intéressant à cette relation entre une intensité maximum et le temps. On retrouve bien cette relation hyperbolique comme l'ont décrite notamment Monod et Scherrer [50, 51]. La $P_{méca}$ tout comme la vitesse ou la consommation d'oxygène traduit également la loi physiologique qui énonce que plus on produit un effort à une intensité élevée, plus la durée de cet effort va être courte en suivant une décroissance hyperbolique. Comme le montre la revue de littérature, cette diminution s'explique par la mise en action progressive des différentes filières énergétiques, qui perdent rapidement de leur puissance avec la durée de l'exercice.

Nous avons trouvé comme équation modélisant le PPR de notre échantillon de 20 cyclistes de niveaux et profils différents : $P_{méca} = 2,7802 t^{-0,174}$ alors que Larrazabal et coll [52] avait trouvé une équation $P_{méca} = 11.575 t^{-0,174}$. Cette différence peut s'expliquer que leur profil de puissance prenait en compte des $P_{méca}$ records allant jusqu'à 7 heures et qu'il était basé uniquement sur 5 cyclistes de niveaux équivalents (5 professionnels d'une même équipe).

Le PPR permet empiriquement de modéliser et d'exprimer le potentiel physique d'un cycliste à partir des cinq aptitudes physiques clés du cyclisme qui peuvent être déterminées. Ceci est dû au fait qu'il explore les performances record d'un cycliste sur une large gamme de durées d'exercices qui s'étendent d'1 seconde à 4 heures (ou plus). Ainsi les qualités d'explosivité, de tolérance au lactate, de PMA, au seuil anaérobie et d'endurance sont déterminées et autorisent l'appréciation du potentiel physique du cycliste. On peut donc suggérer que le PPR

correspond à une véritable signature du potentiel physique du cycliste. C'est pourquoi en exprimant les $P_{méca}$ en fonction de la masse du cycliste (W/kg) il est possible de comparer facilement le niveau des qualités physiques de plusieurs cyclistes.

Le PPR trouve sa légitimité principalement dans le suivi de l'entraînement. En effet, la détermination du profil d'un athlète permet à son entraîneur d'être au plus juste sur la connaissance de l'état de forme physique de son protégé et ce, fréquemment sans avoir besoin de faire passer des tests. En effet, les 5 aptitudes physiques clés sont évaluées en continu au cours d'une saison puisque pour chaque séance d'entraînement et compétition les $P_{méca}$ maximales sont comparées avec les records de l'athlète. L'entraîneur sait donc exactement si l'athlète est loin de sa forme optimale, s'il s'en approche ou s'il s'y trouve s'il bat ses précédents records. De cette façon le suivi mois par mois du PPR est intéressant, de même qu'il devient possible de quantifier une progression d'une ou plusieurs des cinq aptitudes physiques, car elles peuvent progresser indépendamment les unes des autres.

Le PPR joue également un rôle dans la prévention du surentraînement puisqu'en couplant les records de $P_{méca}$ avec le ressenti de l'athlète (sensations, fatigue, humeur...), l'entraîneur possède deux outils complémentaires pour appréhender au mieux la forme de son athlète. Il suffit d'observer des $P_{méca}$ maximales nettement inférieures à ses records ainsi que l'expression par l'athlète d'une pénibilité ressentie lors des entraînements et compétitions pour alerter le coach d'un état de surmenage qui pourrait se détériorer.

Le PPR est dépendant du niveau de pratique des cyclistes car nous avons observé que plus le niveau compétitif est élevé, plus le PPR se décale vers le haut pour chacun des records du profil aérobie. Avec le PPR moyen de chaque catégorie, on est capable de quantifier objectivement des différences de niveau. Par exemple, les résultats montrent que la $P_{méca}$ record que développe un cycliste 1^{ère} catégorie (plus haut niveau amateur en France) sur 20 minutes (5.3 W/kg) peut être maintenue trois fois plus longtemps par un professionnel spécialiste des courses à étapes (1 heure) ce qui constitue une différence assez importante et illustre concrètement l'écart entre ces deux niveaux de pratique

La zone anaérobie du PPR montre moins d'écart de niveau car ces deux aptitudes physiques (explosivité et tolérance au lactate) sont davantage dépendantes des caractéristiques physiques spécifiques des cyclistes. En d'autres termes, un junior peut très bien avoir une explosivité plus élevée qu'un professionnel ou un cycliste 1^{ère} catégorie une tolérance au lactate meilleure. C'est pourquoi ce qui semble véritablement créer la différence entre les

professionnels et les autres, ce sont les qualités de PMA et de seuil anaérobie ; les différences se resserrant au niveau de la zone d'endurance sur les durées plus longues. En clair c'est la $VO_2\text{max}$ rapportée à la masse du cycliste qui semble déterminante dans la prédiction du niveau du potentiel physique puisqu'elle est en partie responsable des records de $P_{\text{méca}}$ de 5 minutes à 1 heure (PMA et zone « seuil anaérobie ») ; sans oublier pour autant d'autres facteurs qui influent également ces records comme le coût énergétique du déplacement, la stratégie de gestion de l'effort, le rendement... L'endurance est également une aptitude essentielle en rapport avec le niveau compétitif des cyclistes mais à un degré légèrement moindre puisque les différences sont moins importantes.

On peut donc imaginer dans les années futures que tous les cyclistes souhaitant passer professionnel aient un suivi de leur PPR depuis le plus jeune âge afin de détecter très tôt les potentiels les plus prometteurs. Ainsi le PPR permettrait de fixer une composante majeure de la capacité de performance : le potentiel physique (avec le potentiel de récupération et la force mentale entre autres). A ce sujet, il est intéressant de noter que les records de $P_{\text{méca}}$ à PMA et au seuil des professionnels (non spécialistes des courses à étapes) est similaire à celui des espoirs membres de l'équipe de France moins de 23 ans, ce qui démontre bien que ces deux aptitudes sont essentielles pour être un bon coureur cycliste puisque ces derniers risquent très prochainement de rejoindre l'échelon supérieur. De plus, cela montre aussi que le potentiel maximal aérobie est atteint assez tôt, certainement avant 25 ans...

Le cyclisme est un sport où ce n'est pas toujours le plus fort qui gagne et où différents profils-types de cyclistes peuvent s'exprimer suivant la spécificité de la course. C'est essentiellement pour cette raison que dans un peloton nous rencontrons plusieurs profils de coureurs bien distincts, qui peuvent briller dans un domaine et être médiocre dans un autre tandis que des coureurs sans grand point fort peuvent réussir à triompher avec un grand sens tactique.

En classant les coureurs en 4 catégories, nous avons voulu différencier clairement les différents profils que l'on retrouve régulièrement afin d'étudier les spécificités de chaque profil-type : grimpeur, rouleur, sprinter et mixte pour désigner ceux n'ayant pas de domaine de prédilection. Pour cela, nous avons dû distinguer les valeurs en puissance brute et en puissance normalisée en fonction de la masse du cycliste pour comparer les profils en situation de montée ou non.

L'étude statistique de chacune des 5 aptitudes physiques a démontré des résultats intéressants. En toute logique, les sprinters ont la meilleure explosivité en valeur brute et relative c'est-à-dire qu'ils ont cette aptitude à développer une puissance maximale très élevée sur des temps

très court, ce qui est normal puisque c'est cette qualité qui détermine leur profil-type. En revanche, les sprinters ont des niveaux de PMA et de seuil anaérobie assez modeste pour des cyclistes professionnels. Comme leur potentiel physique s'exprime uniquement sur les derniers mètres des compétitions, leur seul devoir pendant les courses est d'arriver le plus frais possible en faisant le moins d'effort possible et c'est là qu'une PMA plus élevée leur permettrait d'être plus frais à l'abord des sprints. On remarque cependant qu'en raison de leur gabarit généralement imposant, ils ont des valeurs assez élevées en puissance brute, ce qui explique que sur terrain plat ils sont généralement à l'aise. Les rouleurs sont censés avoir les $P_{méca}$ records les plus élevées sur des durées plus longues en valeur brute. Pour retrouver mathématiquement cette hiérarchie, il serait préférable d'exprimer leur record de $P_{méca}$ en fonction de leur surface frontale. Ainsi, il serait intéressant à l'avenir de calculer la surface frontale des sujets pour exprimer le PPR en fonction de cette variable pour mieux appréhender la réalité du terrain sur parcours plat. Toutefois on note qu'en valeur relative les rouleurs ont des valeurs de PMA et de seuil anaérobie élevée puisque ce sont ces aptitudes physiques qui leur permettent d'être performants contre la montre ou sur terrain plat sur de longues durées. Sur des terrains au profil montant, ces rouleurs ont donc également de bonnes dispositions si leur masse corporelle n'est pas trop élevée.

En effet, ce qui semble établir la différence entre les grimpeurs et les rouleurs c'est la masse corporelle des athlètes. Leurs valeurs brutes à PMA et au seuil anaérobie sont relativement proches mais lorsqu'on passe en puissance normalisée par rapport au poids (pour se retrouver en condition de montée) les grimpeurs ont des $P_{méca}$ records supérieures puisque leur petit gabarit les avantage (environ 7 kg de moins en moyenne). Les grimpeurs sont donc généralement des athlètes dotés avant tout d'une VO_2max très élevée et fort d'une faible masse corporelle, qui les avantage plus la pente s'élève puisqu'ils ont moins de poids à tirer lorsque la pesanteur s'oppose à leur avancement. Par conséquent, ils ont des $P_{méca}$ records en valeurs brutes assez faibles comparé aux autres cyclistes, ce qui peut les handicaper sur terrain plat où ils emmagasinent moins d'énergie cinétique de déplacement. Ils semblent également avoir une part de fibres lentes / fibres rapides plus orientée vers les fibres de type I favorisant l'endurance, ce qui explique leur qualité anaérobie plus modeste ; tout l'inverse des sprinters. Enfin, les coureurs sans points forts apparents n'ont pas d'aptitude physique très élevée et ont même des qualités de tolérance au lactate, PMA et seuil anaérobie plus faible que les autres cyclistes. Pour réussir dans le cyclisme, ils doivent donc avant tout miser sur leur sens tactique puisqu'ils seront le plus souvent battus par plus fort physiquement sur des arrivées au sprint, des contre-la-montre ou sur des parcours montagneux.

Pour conclure sur l'étude des différents profils types de cyclistes il apparaît que, mis à part les sprinters qui sont dotés de qualités d'explosivité très élevées, les aptitudes de PMA et de seuil anaérobie sont celles déterminant le profil pour les grimpeurs et les rouleurs en relation avec leur gabarit : respectivement la surface frontale et la masse corporelle.

A l'instar de Peronnet et Thibault [43], il est possible d'exprimer le PPR sur une échelle de temps logarithmique afin d'obtenir des droites de régression. Leur indice d'endurance étant basé sur les pentes de ces droites nous avons tenté d'établir le même procédé. Mais la décroissance de $P_{méca}$ en fonction du temps ne semble pas être corrélée à cette qualité d'endurance, contrairement à ce qu'il est possible d'obtenir avec un % de VMA ou de VO_2max . La puissance étant reliée à la vitesse au cube, cela explique sûrement ce constat qui démontre que la vitesse et la puissance ne peuvent être utilisées de la même manière afin de quantifier une intensité.

L'IE de Peronnet et Thibault étant obtenu sur des performances s'étalant de 7 minutes à un peu plus de 2 heures (marathon), on pourrait penser que le fait que le PPR comprennent des efforts de 4 heures soit une explication. Ce n'est pas le cas puisqu'on se rend compte en étudiant ces coefficients de régression, qu'ils sont identiques à 0.02 près suivant que l'on exprime le PPR sur 2 ou sur 4 heures. Ainsi, bien que le PPR soit établi sur des $P_{méca}$ records, on est relativement proche de leur maximum physique sur les performances en endurance sur des longues durées (3, 4 heures) même si ce ne sont pas des performances réalisées seul mais le plus souvent en échappée ou dans le peloton. Les $P_{méca}$ records sur de longues durées d'effort (plusieurs heures) tendent donc à se rapprocher au plus près des capacités maximales des cyclistes.

Finalement, on peut expliquer le fait que les pentes les plus importantes soient en relation avec le niveau de compétition le plus élevé car ce sont les valeurs de PMA et de la zone « seuil anaérobie » qui sont déterminantes quand à la forme de la relation $P_{méca}$ record – temps. En effet, il faudrait que les cyclistes professionnels aient des valeurs nettement plus élevées sur les $P_{méca}$ records de 2, 3 et 4 heures pour diminuer le coefficient de la droite de régression, ce qui paraît difficilement concevable. L'évaluation de l'endurance faite par Peronnet et Thibault sur la régression de la vitesse en fonction du temps ne peut donc pas être établit de la même manière avec l'étude de la relation $P_{méca}$ records - temps.

Cette étude sur le PPR confirme donc bien l'opinion général selon laquelle la VO_2max est une variable déterminante du potentiel physique du cycliste quant à la valeur de celui-ci mais

également en rapport avec sa spécialisation dans un domaine de prédilection. La PMA déterminée à partir du PPR par la $P_{méca}$ record sur une durée de 5' correspond à la $P_{méca}$ développé à VO_2max . En effet, Billat affirme qu'en moyenne le temps de maintien d'un effort à VO_2max est compris entre 4 et 9 minutes selon les athlètes [4], Perronnet et Thibaut l'ont fixé à 7 minutes dans leur modèle [43]... Quand au seuil anaérobie, il semble plus juste de « l'encadrer » dans une zone de $P_{méca}$ bien distincte comprise entre 20 et 60 minutes où la $P_{méca}$ diminue en moyenne de 48 W. Comme nous pouvons l'observer sur le PPR, il existe une cassure dans la décroissance des $P_{méca}$ records en fonction du temps. Cette zone est encadrée par une partie au déclin rapide où l'anaérobie à une grande part (explosivité, tolérance lactate, PMA) et une autre où la diminution est plus faible, sur plusieurs heures (endurance). C'est dans cette zone que se situe le seuil anaérobie mais le PPR ne démontre pas un point précis où l'on passerait du métabolisme aérobie au métabolisme anaérobie. En effet, la position sur le vélo (assis main en haut, assis position CLM ou en danseuse) et la nature du terrain (plat, montée, descente) influencent les valeurs de $P_{méca}$. Concrètement, il apparaît qu'il est plus facile de développer un haut niveau de $P_{méca}$ dans une montée lorsque le cycliste lutte contre la gravité que sur terrain plat où il se bat contre la résistance aérodynamique. Pour une même dépense énergétique (quantifiée par une VO_2 ou une FC), la $P_{méca}$ est donc plus élevée en montée que sur le plat. De ce fait, il apparaît donc plus judicieux de parler de zone « seuil anaérobie » sur des efforts maximaux compris entre 20 et 60 minutes. Cela correspond généralement à des efforts de montée de col ou de contre la monte où le cycliste gère son effort en adaptant la $P_{méca}$ qu'il développe en fonction du terrain et de la durée afin d'établir la meilleure performance possible. Cette zone « seuil anaérobie » s'étend sur des valeurs de $P_{méca}$ d'environ 48 ± 14 W (0.7 W/kg) entre le record sur 20 minutes et celui sur 60. Cette différence ne semble pas être dépendante du profil type et du niveau des cyclistes.

On soulignait en introduction la légitimité du PPR quand à l'utilisation des données sur le terrain, on l'a retrouve bien lorsqu'on établit le « PPR Entraînement » et le « PPR Compétition ». Toutes les $P_{méca}$ records sur les durées supérieures à 1 minute sont supérieures lorsqu'elles sont réalisées en compétition. Seulement les records sur 1, 5 et 30 secondes sont obtenus à l'entraînement et cela s'explique puisque généralement ce type d'effort maximal en compétition est réalisé en fin de course avec de la fatigue, alors qu'à l'entraînement elles sont établies avec plus de fraîcheur. Il faut également noter que le « PPR Entraînement » comprend les quelques tests passés en laboratoire qui aboutissent donc à des $P_{méca}$ inférieures à celles obtenues en compétition.

Enfin, il est important d'insister sur le fait que le PPR permet un suivi précis du potentiel physique d'un athlète. Dans le cyclisme de compétition, il devient la méthode la plus élaborée pour évaluer un potentiel physique et quantifier une progression dans le temps. Le suivi longitudinal des performances physiques devient à cette occasion plus objectif qu'un palmarès qui dépend de multiples facteurs autres que ceux du véritable potentiel physique (tactique, condition météorologique, déroulement de course, concurrence...). Ainsi le PPR permet un suivi de la capacité de performance de l'athlète puisque lorsque le cycliste améliore des records de puissance il est censé avoir amélioré ses capacités physiologiques. De plus, le PPR (en s'assurant bien entendu qu'il soit au plus proche du véritable potentiel du cycliste) permettrait de révéler des progressions ultra-rapides où les records de puissance seraient battus très nettement. C'est pourquoi la combinaison du PPR avec le passeport biologique (suivi des valeurs sanguines des athlètes mis en place par l'union cycliste internationale de cyclisme) permettrait d'améliorer la connaissance de chaque athlète et améliorerait le ciblage pour les contrôles antidopage des athlètes aux progressions et performances suspectes, comme Schumacher et Pottgiesser le proposent également [52]. Ce sujet est actuellement à l'étude dans une mission mandatée par la ministre de la Santé et des Sports Roseline Bachelot.

VI. CONCLUSION GENERALE

Cette étude sur le profil de puissance record apporte de nombreux enseignements sur la spécificité de la relation $P_{\text{méca}}$ record – temps sur des cyclistes de niveaux hétérogènes et de caractéristiques différentes. Le PPR s'avère être un concept innovant dans le domaine du suivi de l'entraînement et de l'évaluation du potentiel physique de l'athlète puisqu'il se base essentiellement sur l'ensemble des performances réalisées sur une longue période à l'entraînement et en compétition. A l'avenir, il serait intéressant d'ajouter une version du PPR prenant en compte la surface frontale effective (suite à des tests aérodynamiques en soufflerie) de chaque cycliste pour modéliser la représentation de leur potentiel sur terrain plat. Il offre de nombreuses perspectives notamment dans la prévention contre le dopage puisqu'il permet d'améliorer la traçabilité de la capacité de performance des athlètes. En complément du passeport biologique, les cyclistes dépassant certaines limites fixées par le règlement seraient ainsi rapidement dans le viseur des instances antidopage. Le PPR étant un outil simple à établir, pourquoi ne pas développer le PPR dans le monde cycliste dès les catégories de jeunes afin de mieux détecter les futurs champions et prévenir les progressions ultra rapides?

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ASTRAND et RODHAL. *Textbook of work physiology*. New York: McGraw Hill; 1970.
- [2] BERTUCCI, DUC, VILLERIUS, PERNIN et GRAPPE. *Validity and Reliability of the PowerTap Mobile Cycling Powermeter when Compared with the SRM Device*. *Int J Sports Med* 2005; 26: 868-873
- [3] BILLAT. *L'apport de la science dans l'entraînement sportif : l'exemple de la course de fond*. *Revue STAPS*, 2001, 54, 023 – 043.
- [4] BILLAT. *Physiologie et méthodologie de l'entraînement : de la théorie à la pratique*, 2^{ème} édition, Editions De Boeck université, 2003
- [5] BOCQUET et BILLAT. *Modèles mathématiques et physiologiques de la performance humaine*. *Science & Sports*, 1999 ; 14 : 278-91
- [6] BOSQUET, LEGER et LEGROS. *Methods to determine aerobic endurance*. *Sports Med*, 2002, 32(11):675 –700
- [7] BUSSO et CHATAGNON. *Extension du modèle puissance–temps limite pour estimer la production d'énergie aérobie et anaérobie lors de l'exercice intense*. *Science & Sports* 23 (2008) 239–243
- [8] CAZORLA. *Tests de terrain pour évaluer l'aptitude aérobie et utilisation de leurs resultants dans l'entraînement*. *Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique, Université Victor Segalen Bordeaux 2*
- [9] COGGAN, *Training and racing using a power meter: an introduction*, 2003
- [10] COGGAN, *Power Profiling*, trainingpeaks.com/articles/cycling/power-profiling.aspx

- [11] COSTILL et FOX. *Energetics of marathon running*. Med Sci Sports Exercise 1969 ; 1 : 81-6.
- [12] Di PRAMPERO, ATCHOU, BRUCKNER et MOI. The energetics of endurance running. Eur J Appl Physiol, 1986, 55: 259-66.
- [13] Di PRAMPERO. Factors limiting maximal performance in humans. Eur J Appl Physiol, 2003, 90: 420 – 429
- [14] DUC, VILLERIUS, BERTUCCI et GRAPPE. *Validity and reproducibility of the Ergomo Pro Power Meter compared with the SRM and Powertap Power Meters*, International Journal of Sports Physiology and Performance, 2007; 2:270-281
- [15] ETTEMA. *Limits of human performance and energy production*. Int Z für Angew Physiol Einschl Arbeitphysiol 1966; 22:45–54.
- [16] FRANCIS. *Running records*. Science Wash, DC 98: 315-3161943.
- [17] FREDERICK. *Statistical model of endurance in running*. Can .I Appl Sport Sci 1977; 2 : 127-32.
- [18] FREDERICK. *In search of the Asymptote : Projecting the limits of human Performance*. Nike Sport Research Laboratory, International Journal of Sports Biomechanics, 1986, 2, 1-5.
- [19] GARDNER, STEPHENS, MARTIN, LAWTON, LEE et JENKINS. *Accuracy of SRM and Powertap power monitoring systems for bicycling*. Med Sci Sports & Exerc, 2004, vol.36, n°7, pp.1252-1258.
- [20] GIMENEZ, SERVERAS, SALINAS, SAUNIER et LACOSTE. Square Wave Endurance Exercise Test : SWEET. EUJAP, 1982, 49 : 359-87

- [21] GROSSE-LORDEMAN et MÜLLER. *Der einfluss der leistung und der arbeitsgeschwindigkeit auf das arbeitsmaximum und den wirkungsgrad beim radfahren.* Arbeitsphysiol 1937 ; 9 : 454-75.
- [22] HARMAN, KNUTTGEN, FRYKMAN et PATTON. *Exercise endurance time as function of percent maximal power production.* Med Sci Sports Exercise 1987 ; 19 : 480-5.
- [23] HENRY et FARMER. *Condition ratings and endurance measures.* Res Q Am Assoc Health Phys Educ Retreat, 1949 ; 20 : 126-33.
- [24] HENRY. *Time – Velocity equations and oxygen requirements of “all-out” and “steady-pace” running.* RES Q, 1954, 25: 164-77
- [25] HILL. *Muscular Movement in man.* New York, Mc Graw-Hill, 1924, 104p.
- [26] KENNELLY. *An approximate law of fatigue in the speeds of racing animals.* Proceedings of the America Academy of Arts and Sciences, 1906, 275-331.
- [27] LARRAZABAL, IRIBERRI et MURIEL. *Power output related to exposure time in professional road Cycling.* Endurance Sports Science Conference, 2006, Birmingham
- [28] LAWTON, MARTIN et LEE. *Validation of SRM power cranks using dynamic calibration.* Fifth IOC World Congress, Oct 31-Nov 5, 1999, Sydney: International Olympic Committee, 1999.
- [29] Le CHEVALIER, VANDEWALLE, THEPAULT-MATHIEU, STEIN et CAPLAN. *Local critical power is an index of local endurance.* Eur J Appl Physiol 2000 Jan;81(1–2):120–7.
- [30] LEGER, MERCIER et GAUVIN. *The relationship between % VO₂max and running performance time.* In: Landers DM, ed. *The 1984 Olympic Scientific Congress proceedings*, volume 3. Sport and Elite performers. Champaign, Illinois: Human Kinetics Publishers; 1986.

- [31] LEGER. Aptitude aérobie, concepts et évaluation, tests de terrain : intérêts et limites. Université de Montréal, 2004.
- [32] LIEZTKE. *An analytical study of world and Olympic racing records*. Science, 1954, 119: 333-6
- [33] MARGARIA. *Biomechanics and energetics of muscular exercise*. Oxford University Press, 1976, Oxford
- [34] MEADE. *An analytical study of athletic records*. Sci Monthly, 1916 ; 2 : 596-600.
- [35] MEADE. *Consistent running records*. Science, 1956 ; 124 : 1025.
- [36] MERCIER, LEGER et DESJARDINS. *Nomogramme pour prédire la performance, le VO_2max et l'endurance relative en course de fond*. Méd Sport, 1984 ; 58 : 181-7.
- [37] MILLET, TRONCHE, FUSTER, BENTLEY et CANDAU. *Validity and reliability of the Polar S710 Mobile Cycling Powermeter*, Int J Sports Med 2003; 24:156–161
- [38] MORITANI, NAGATA, DEVRIES et MURO. *Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold*. Ergonomics, 1981, 24(5):339–350
- [39] MORTON et HODGSON. *The relationship between power output and endurance: a brief review*. Eur J Appl Physiol, 1996, 73:491–502
- [40] MORTON. *A three component model of human bioenergetics*. J Math Biol, 1986, 24: 451-466
- [41] MORTON. *The critical power and related whole-body bioenergetic models*. Eur J Appl Physiol, 2006, 96:339-354
- [42] PATON et HOPKINS, *Tests of cycling performance*. Sports Med 2001; 31: 489-96

- [43] PERONNET et THIBAUT. *Consommation maximale d'oxygène, endurance et performance en course a pied*. Macolin 1984 ; 7 : 15-8.
- [44] PERONNET et THIBAUT. *Analyse physiologique de la performance en course a pied, révision du modèle hyperbolique*. J Physiol (Paris) 1987 ; 82 : 52-60.
- [45] PERONNET et THIBAUT. Mathematical analysis of running performance and world running record. JAP, 1989, 67 : 453 – 465
- [46] PREDINE, GIMENEZ et SERRANO. Nouvelle méthode d'évaluation et d'entrainement a l'endurance en course chez des enfants d'âge scolaire. Rev Sci Tech Act Phys Sport 1989 ; 10 : 7-15.
- [47] SALTIN. *Oxygen transport by the circulatory system during exercise in man*. In: KEUL, *Limiting factors of physical performance*. Stuttgart: Thieme; 1973. p. 235-52.
- [48] SASSI, MARCORÀ, RAMPININI, MOGNONI et IMPELLIZZERI. *Prediction of time to exhaustion from blood lactate response during submaximal exercise in competitive cyclists*. European Journal of Applied Physiology (97), 2006, 174-180
- [49] SASSI. *Power vs. Time to Exhaustion relationship estimated from the Endurance test*, mapeisport.it/ivanbasso
- [50] SCHERRER, SAMSON et PALEOLOGUE. *Étude du travail musculaire et de la fatigue. Données ergométriques chez l'Homme*. J Physiol (Paris) 1954;46:887–916.
- [51] SCHERRER et MONOD. *Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme*. J Physiol (Paris) 1960;52:419–501.
- [52] SCHUMACHER et POTTGIESSER. Performance profiling : a Role for Sport Science in the Fight Against Doping. Int J of Sports Physiology and Performance, 2009, 4, 129 - 133

- [53] THIBAUT. *Quel est votre capacité d'endurance*, Propos recueillis par Gilles Goetghebuer, Sport et Vie n°116, 2009, 17 – 24
- [54] THIBAUT. Modélisation de la performance en course à pied (thèse), Montréal : Université de Montréal, 1988
- [55] TORNVALL. *Assessment of physical capabilities*. Acta Physiol Stand, 1963 ; 58 : Suppl201.
- [56] VILLERIUS, DUPUIS et GRAPPE. *Détermination du profil physiologique des coureurs cyclistes compétitifs à partir de la mesure de la puissance développée : étude préliminaire*, 12^{ème} Congrès Internationale de l'ACAPS, 31 octobre - 2 novembre, Leuven, Belgique, 2007.
- [57] VOGT, SCHUMACHER, ROECKER, DICKHUTH, SCHOBERER, SCHMID et HEINRICH. *Power output during the Tour de France*, Int J Sports Med 2006;
- [58] VOGT, SCHUMACHER, BLUM, ROECKER, DICKHUTH, SCHMID et HEINRICH. *Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia : a case study*. Journal of sports sciences, 2007, 25 (12) : 1299 – 1305
- [59] VOGT, ROECKER, SCHUMACHER, POTTGIESSER, DICKHUTH, SCHMID et HEINRICH. *Cadence-Power-Relationship during Decisive Mountain Ascents at the Tour de France*, Int J Sports Med 2007;
- [60] WILKIE. *Equations describing power input by humans as a function of duration of exercise*. In: Cerretelli P, Whipp BJ. *Exercise bioenergetics and gas exchange*. Amsterdam: Isevier; 1980. P 75-81.

TABLE DES ANNEXES

<u>Annexe 1</u> : PINOT J, GRAPPE F. <i>The "Power Profile" to determine the physical capacities of the cyclist</i> . 35 ^{ème} congrès annuel de la Société de Biomécanique. Le Mans, 25 -27 août 2010.....	68
<u>Annexe 2</u> : PINOT J, GRAPPE F. <i>Evaluation du potentiel physique du cycliste à travers le Profil de Puissance Record</i> . Soumis à la 2 ^{ème} édition des journées G. Cometti . Dijon, 19 – 20 Novembre 2010.....	70

