

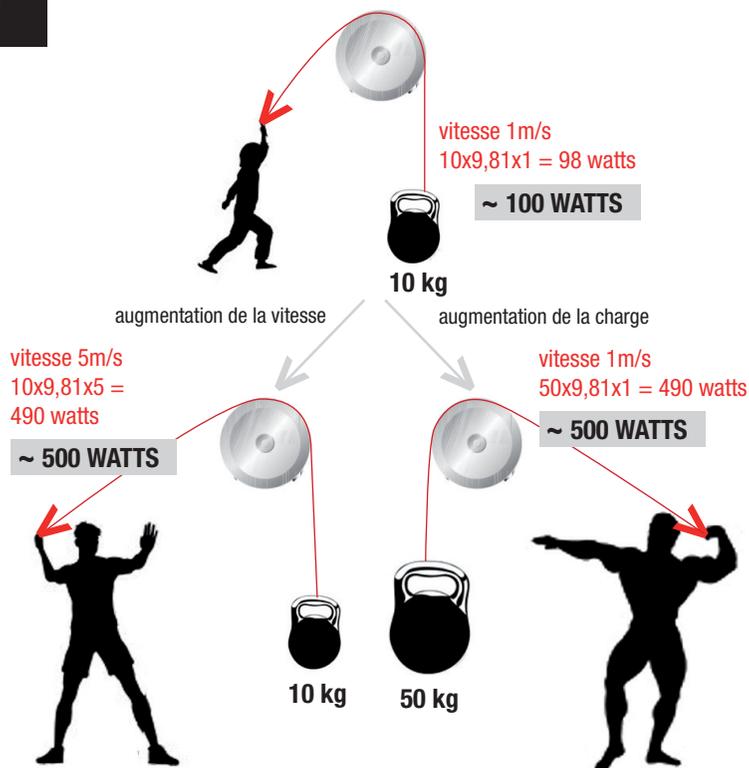
C'est quoi les WATTS ?

Prenons l'exemple d'une personne qui soulève une charge avec une corde et une poulie comme dans l'illustration ci-contre.

La puissance est le produit de la force (poids de la charge = mg avec m masse de la charge et $g=9,81 \text{ m/s}^2$) par la vitesse. Pour développer 100 watts, elle devra soulever approximativement une charge de 10 kg à la vitesse de 1 m/s. Un enfant ou une personne âgée peuvent accomplir cette tâche.

Pour développer plus de puissance, la personne doit soit augmenter la vitesse, soit augmenter la charge (et donc la force de tirage sur la corde) ou encore les deux. Ainsi elle développera 500 watts si elle soulève 50 kg à la vitesse de 1 m/s ou 10 kg à la vitesse de 5 m/s.

Une personne de grande force ou très rapide pourra réaliser cet exercice. La puissance représente l'efficacité de la personne. En développant 100 watts, il faudra 10 secondes pour soulever une charge de 10 kg sur une hauteur de 10m. Tandis qu'en développant 500 watts, il faudra 5 fois moins de temps pour effectuer le même travail. Il faut aussi associer la durée à la puissance. Le corps humain ne dispose pas de ressources infinies et il fatigue. De nombreuses personnes peuvent développer 100 watts pendant 30 minutes alors que seuls certains sportifs de haut niveau peuvent développer 500 watts pendant la même durée.



Le cycliste face à la pente

Venons-en au cycliste dont l'effort est un peu plus complexe à modéliser que le cas précédent.



Le cycliste doit exercer une force de propulsion au niveau de la roue arrière afin de vaincre les forces qui s'opposent à son avancement.

- **La résistance de l'air** dépend principalement de la position du coureur et du carré de la vitesse relative du cycliste par rapport au vent. Elle est faible dans les ascensions à 20 km/h sans vent et très marquée sur le plat à 50km/h.

- **La pesanteur** tire le cycliste vers le bas. Absente sur le plat, plus le pourcentage de la pente augmente, plus le cycliste la ressent.
- **La résistance de roulement** dépend de la masse du cycliste, de sa vitesse, de la qualité de son vélo, du revêtement et de ses pneumatiques. Les mouvements verticaux sont négligés, il n'y a pas de franchissement d'obstacles comme en VTT.

Le cycliste doit aussi vaincre la force d'inertie quand il accélère. Celle-ci est nulle lorsque la vitesse est constante. On retiendra qu'à vitesse constante, la force exercée par le coureur sur ses pédales est égale à la somme de la résistance de l'air, de la pesanteur (composante dans la direction d'avancement) et de la résistance de roulement. Une force peut aussi aider le cycliste à se déplacer. Il s'agit du phénomène d'aspiration (drafting) ressentie derrière un autre cycliste ou en peloton. L'économie d'énergie peut être supérieure à 30% à l'intérieur d'un important peloton roulant à plus de 40 km/h. (ref 5, Bicycling science). La puissance, pour un système en translation, est le produit de la force par la vitesse si la force de propulsion est dans la même direction que la vitesse. Dès lors, lorsque l'on a déterminé toutes les forces, il suffit de multiplier par la vitesse pour obtenir la puissance.

Le capteur de puissance de référence, le SRM mesure la puissance au niveau du pédalier. Le rendement de la bicyclette est supposé être de 97,5% (efficacité de la transmission, ref 1). Par conséquent, il faut ajouter 2,5% à la puissance estimée par le modèle au niveau de la roue arrière pour comparer avec le capteur de puissance placé dans le pédalier. D'après les résultats du site <http://www.friction-facts.com/>, la qualité et la propreté de la chaîne peuvent légèrement modifier le rendement de la transmission.

Pour les mesures de puissance avec un capteur et l'entraînement associé, voir l'ouvrage de Fred Grappe (ref 7).

Influence du vent

Les prévisions météo nous renseignent sur le vent moyen à 10m de hauteur. Le gradient de vent indique la vitesse du vent en fonction de la hauteur de mesure, de la stabilité des écoulements et de la nature du sol (espace ouvert sans végétation, village ou forêt). Les prévisions météo nous renseignent sur le vent moyen à 10m de hauteur. Dans le cadre des calculs de puissance,

nous nous limiterons à des mesures par force de Beaufort terrestre inférieure ou égale à 2 (vitesse de 10km/h). Dès lors, si l'air est stable non turbulent, la vitesse du vent au niveau des coureurs ne dépassera pas en moyenne 7 km/h en zone dégagée, 6 km/h en zone habitée et 5 km/h en forêt. (ref 4, norme AFNOR et site webmet.com).

L'aspiration

L'aspect « drafting » prend plus d'importance depuis quelques années lors des ascensions de cols. Les différences de potentiel entre coureurs sont moins marquées que par le passé. Le peloton des favoris du Tour compte de plus en plus d'unités au pied de la dernière montée. De plus une grande majorité des coureurs roulent aujourd'hui avec des capteurs de puissance. Ils se rendent compte en direct que l'on peut économiser quelques watts dans les roues même en montée. D'après une étude de 2013 (ref 3, CFD simulations of the aerodynamic

drag of two drafting cyclists), la résistance aérodynamique est réduite de 25% à 54 km/h pour un cycliste placé dans le sillage à 10 cm.

Nous avons fait le choix de retirer 30% de la puissance pour vaincre la résistance de l'air dans le cas d'un peloton important roulant à 25 km/h, soit une dizaine de watts. Cette correction, de l'ordre de 2% en valeur relative, a été appliquée par exemple dans le cas du calcul de puissance de la montée de La Toussuire sur le Tour de France 2012.



L'étalon 78 kg ou 80 kg avec vélo

La puissance étalon « 78 kg avec vélo » correspond à celle d'un coureur fictif placé au cœur de la course. Il pèse 78 kg avec son vélo et son équipement. Il est le témoin du rythme dans les montées de cols et de l'évolution des performances au fil des années. Seuls les cols de fin d'étape sont comparés (la masse des coureurs peut diminuer légèrement au fil des heures de vélo). Pour les 3 champions choisis des années 80, Bernard Hinault, Greg Lemond et Laurent Fignon, un coureur étalon 80 kg avec vélo est proposé. De plus, le rendement de leur vélo est diminué de 5%.

Un exemple de calcul

La montée de Mende de Chris Horner au Tour de France 2010.

Masse corporelle	63.5 kg
Masse vélo + équipement	71.5 kg
Scx	0,35
Coefficient de roulement	0,004
Vitesse moyenne	18,42 km/h
Pourcentage moyen	10,26
Densité de l'air à 850m	1,06
Rendement du vélo	97.5 %

	Détails du calcul	% total
Pair	$1.06/2 \times 0.35 \times (18.42/3.6)^3$	6,00%
Proulements	$0.004 \times 9.81 \times 71.5 \times (18.42/3.6)$	3.4 %
Pgravité	$71.5 \times 9.81 \times (18.42/3.6) \times 10.26/100$	88,00%
Ptotale	(Pair + Proulements + Pgravité) x 100/97.5	418 WATTS



Vélo des années 80 : + 2kg et - 5% de rendement



Vélo des années 2000 : Etalon 78 kg

Le rapport poids/puissance WATTS/kg

Le rapport watts/kg est très utilisé en cyclisme par les entraîneurs et les coureurs afin d'évaluer le potentiel pour l'escalade des cols. Si on s'intéresse à un seul coureur, plus son rapport watts/kg sera élevé, plus il grimpera vite les cols, surtout sur les forts pourcentages où il faut lutter principalement contre la pesanteur. De plus, il est lié directement

à la consommation maximale d'oxygène spécifique (en ml/min/kg) via le rendement énergétique. Dès lors, on peut effectuer un rapprochement avec des limites physiologiques. Le problème vient quand on cherche à comparer plusieurs coureurs et leurs performances réalisées sur le terrain. Deux coureurs qui ont un rapport watts/kg équivalent

mais de masse corporelle assez différentes ne vont pas grimper les cols à la même vitesse. Prenons l'exemple de Pantani (56 kg) et d'Indurain (80 kg). Pour escalader l'Alpe d'Huez en 40 minutes, Pantani doit développer 6,3 watts/kg tandis qu'Indurain peut se contenter de 5,9 watts/kg, soit une différence de plus de 9%.

Le rapport watts/kg serait directement lié à la performance faite sur le terrain si il n'y avait pas de vélo à transporter, pas de forces de frottement de roulement et pas de frottement de l'air. Le « rapport poids puissance » reste néanmoins valide si on compare des coureurs qui ont à peu près la même masse corporelle.

Lien entre puissance étalon et watts/kg

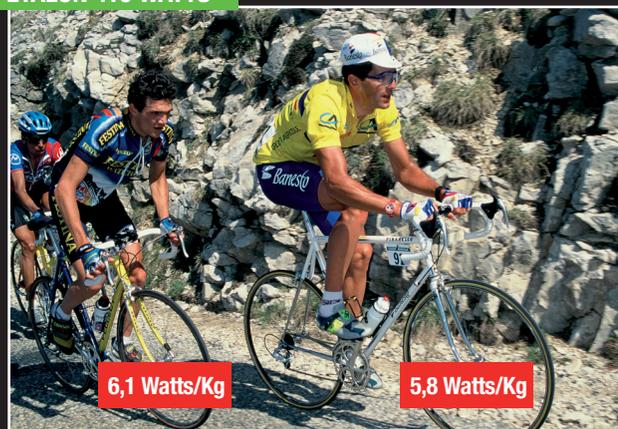
Au coureur étalon 78 kg avec vélo correspond un rapport **watts/kg** en fonction de la masse du coureur et de la pente

Le tableau suivant convertit la puissance étalon de 78kg avec vélo 410 watts en watts/kg en fonction de la pente (%) et de la masse corporelle du cycliste.

Masse (kg) / pente	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %
55	6,22 W/kg	6,17 W/kg	6,14 W/kg	6,1 W/kg	6,09 W/kg
60	6,13 W/kg	6,09 W/kg	6,06 W/kg	6,03 W/kg	6,01 W/kg
65	5,91 W/kg	5,91 W/kg	5,91 W/kg	5,9 W/kg	5,9 W/kg
70	5,81 W/kg	5,82 W/kg	5,83 W/kg	5,83 W/kg	5,84 W/kg
75	5,79 W/kg	5,8 W/kg	5,8 W/kg	5,8 W/kg	5,8 W/kg

Si le coureur étalon se situe à 410 watts, alors le rapport watts/kg sera compris entre 5,8 w/kg et 6,2 w/kg en fonction de la pente et du gabarit du coureur. (voir image ci contre) Plus la pente est forte, plus il est facile pour les coureurs légers de se maintenir à

ETALON 410 WATTS



410 watts étalon. Cependant, cet effet est surtout marqué pour les forts pourcentages moyens qui sont plus souvent rencontrés au Tour d'Italie ou au Tour d'Espagne qu'au Tour de France et pour un nombre limité d'ascensions.

La limite minimale pour les vélo de 6,8 kg avantage les grands gabarits

Aujourd'hui, presque tous les coureurs professionnels peuvent utiliser des vélos de 6,8 kg. Cette limite inférieure avantage les grands gabarits car la masse relative du vélo par rapport à la masse totale est plus faible quand on pèse 80 kg. Il y a 20 ans, les grands gabarits devaient disposer de cadre plus grands et roulaient avec des vélos un peu plus lourds que les coureurs « poids plume ».

Précision des calculs de puissance

En 1998, Martin (ref 1) démontre que l'on peut modéliser la puissance d'un cycliste avec une bonne précision. Il obtient 2% d'erreur par rapport à un capteur de puissance étalonné. La vitesse du vent a été mesurée avec un anémomètre. L'étude a été réalisée en ayant une connaissance précise des caractéristiques des cyclistes (aérodynamisme, masse, vélo, etc...). En 2004, nous avons réalisé une validation sur le terrain avec 20 coureurs équipés de capteurs SRM et obtenu une erreur maximale de 5%. L'idée fut donc de diminuer l'erreur de mesure

dans la méthode indirecte afin que celle-ci soit exploitable pour des analyses de performances. L'accent fût mis sur l'observation des conditions météo et la zone de mesure de la puissance. Ces dernières années, les coureurs professionnels ont mis en ligne leurs données issues des capteurs de puissance. Ceci nous a permis de réaliser des validations complémentaires. Nous devons caler le calcul de la puissance de l'étalon 78 kg avec vélo (ou 80kg) par rapport à une référence. Si la précision obtenue est de 2% avec l'estimation d'une puissance réelle comme dans le cas de Chris Horner, elle le sera aussi pour l'étalon 78 kg avec vélo.

Tour 2010 : Chris Horner

Le coureur Américain Chris Horner de l'équipe Radio Shack termine 10ème du classement général final 2010. Il a souvent couru à l'avant de la course et donc dans les mêmes conditions que les leaders du classement général. Afin d'éviter trop de variabilité sur sa masse, seuls les derniers cols des étapes sont sélectionnés, ceux qui sont grimés après 5h de vélo.

COMPARAISON SRM-MODELE CHRIS HORNER 63,5 kg, Scx=0.35, vélo 8 kg

Cols	Distance et pente	temps	SRM	MODELE	Écart
AVORIAZ	13.7 km à 6,06 %	35'36"	351 w	347 w	1,00%
MADELEINE	25.5 km à 6 %	1h09'36"	320 w	323 w	<1%
MENDE	3.1 km à 10.26 %	10'06"	422 w	418 w	<1%
AX LES THERMES	7.8 km à 8.33 %	23'43"	370 w	375 w	+1.4 %
BALES	19.3 km à 6.1 %	49'30"	342 w	358w	+ 4.6 %
TOURMALET OUEST-BAS	9.35 km à 7,16%	23'54"	372 w	409 w	9,00%
TOURMALET OUEST-HAUT	9.3 km à 7.9 %	28'36"	348 w	354 w	+1.8%

Le phénomène d'aspiration (« drafting »), explique le résultat obtenu sur le Port de Balès (8 km de faux plat en début de col), tandis que sur la partie basse du Tourmalet il y a un effet conjugué du « drafting » et du vent favorable.

Excepté ces deux cas, la différence est inférieure à 2%. La marge d'erreur du modèle par rapport aux capteurs SRM est donc tout à fait acceptable sur les derniers cols des étapes de montagne du Tour de France.

Avec l'expérience, nous en avons conclu que l'erreur de 2% est envisageable dans les conditions suivantes :

- vitesse inférieure à 25 km/h
- vent général au maximum de force 2 dans l'échelle de beaufort terrestre
- pourcentage supérieur à 6%
- route en forêt

Références :

articles scientifiques
James C.Martin, Douglas L. Milliken, John E. Cobb, Kevin L. McFadden, and Andrew R. Coggan
1-Validation of a Mathematical Model for Road Cycling Power
Journal of applied biomechanics, 1998, 14, 276-291

Tim Olds

2-The mathematics of breaking away and chasing in cycling

(<http://danpat.net/docs/brekaway.pdf>)
Eur J Appl Physiol (1998) 77: 492±497

Bert Blocken, Thijs Defraeye, Erwin Koninckx, Jan Carmeliet, Peter Hespel

3-CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists

Computers & Fluids, Volume 71, 30 January 2013, Pages 435–445
4-Norme AFNOR
 NF EN 1991-1-4 Novembre 2005, p17-18
 vitesse de vent et pression dynamique
Livres
5-Bicycling Science. Wilson, David G., and Jim Papadopoulos.. 3rd ed. MIT P, 2004.

6-High-Tech cycling, Edmund Burke, Human Kinetics, 2003
7-Puissance et performance en cyclisme, Fred Grappe, De Boeck, 2012
 • Les sites
<http://www.analyticcycling.com/>
<http://home.trainingpeaks.com/>
<http://www.bikemap.net>

<http://www.friction-facts.com/>
<http://www.cyclingpowerlab.com/Introduction.aspx>
 • Les Videos pour les mesures complémentaires :
<http://www.youtube.com/user/Pixuns1>
<http://www.youtube.com/user/worldcyclingarchives>
<http://www.youtube.com/user/PaquirrinTopModel>
<https://www.youtube.com/user/wenck>

Les facteurs qui influencent l'interprétation de la puissance étalon des coureurs dans les cols

> Capacité en montagne :

le vainqueur du Tour n'est pas toujours le meilleur en montagne. Par exemple Wiggins en 2012, Indurain en 1994, Lemond en 1989, Roche en 1987 ou encore Hinault en 1982.

> Tactique et dépense d'énergie en début d'étape :

sur certains Tour de France, la bagarre s'est déclenchée assez tôt avant le dernier col (1986, 2011). Sur d'autres le porteur du maillot jaune, fort en contre-la-montre et disposant d'une bonne avance au classement général s'est contenté de suivre ses adversaires (Hinault en 1982, Wiggins en 2012).

> Densité du niveau :

Tour 1989 avec Fignon, LeMond et Delgado, Vuelta 2012 avec Contador,

Valverde et Rodriguez. A chaque fois le niveau des prétendants à la victoire très proche et des positions au classement général resserrées. Parfois comme en 99 avec Armstrong, les principaux leaders ne sont pas là. Il lui suffit de gérer et n'a pas à « pousser les watts ». En 2006, de nombreux favoris ont été interdits de départ suite à l'affaire "Puerto".

> Longueur moyenne des cols de chaque Tour :

plus les cols sont courts, plus il y aura la possibilité de développer de fortes puissances moyenne sur les derniers cols. Le niveau de puissance sera élevé en particulier si le coureur décide de produire son effort dès le bas de la montée ou lors des contre-la-montre en côte. (Voir P.13). La durée moyenne des derniers cols

d'un Tour de France est d'environ 35 minutes.

> Niveau général de l'équipe du leader :

si un leader est protégé comme Wiggins en 2012 avec une équipe entièrement dévouée à son service avec des équipiers plus forts que lui en montagne parfois, il peut fournir plus de watts à la fin des étapes.

> Météo :

des conditions extrêmes (forte chaleur ou pluie et froid) pénalisent les coureurs, quoique pour Pantani et certains de ses exploits, cela ne l'a pas empêché d'être « mutant ».

> Parcours :

plus il y a d'étapes de montagne, plus

les coureurs calculent leurs efforts. Sur les Tours très montagneux, il n'est normalement pas possible de produire un effort maximal à chaque étape.

> Début ou fin d'épreuve :

une certaine fatigue «devrait » apparaître en fin d'étape de montagne après deux cols et en troisième semaine d'un grand Tour. Ce n'est hélas pas le cas pour certains qui s'améliorent de jour en jour et pour qui, 5h de vélo avec deux cols, semble n'être qu'un « échauffement » pour la partie finale.

Tous ces facteurs doivent être pris en compte pour l'interprétation de la puissance en watts étalon fournie par les coureurs dans les cols.

Validation d'une méthode indirecte d'estimation de la puissance mécanique en cyclisme

F.PORTOLEAU : Ingénieur société informatique,
 A.VAYER : Alternatif, C.TRONCHE : FFC,
 G.P. MILLET : Faculté des Sciences du Sport de Montpellier

La puissance mécanique externe (Pméc, w) est un paramètre clé de la performance en cyclisme. Différents dispositifs permettent sa mesure (SRM, Polar S710, Power-Tap) mais restent honorables pour des sportifs amateurs. La validité du SRM (Fuchsend, Allemagne) a été montrée en le comparant avec un Monark par Martin et al. 1998 ; l'objet de cette étude sera donc de tester la validité d'une méthode indirecte d'estimation de Pméc.

> **METHODE** – Seize cyclistes hommes (21,0 ± 4,0 ans ; 67,8 ± 5,8 kg ; 177,8 ± 5,8 cm ; PMA = 373 ± 43 w ; 12 687 ± 5 313 km.an-1) de niveau régional à élite ont réalisé dans un ordre aléatoire 15 ascensions de côtes de 1,3 à 6,3 km (pente moyenne de 4,4 à 10,7%). Chaque vélo était équipé d'un pédalier SRM permettant les relevés de Pméc dans différentes conditions (seul, en groupe...). Les portions à analyser étaient déterminées à partir de points remarquables pris sur une carte IGN ; ceux-ci permettaient également le calcul de la vitesse et de la pente moyenne.

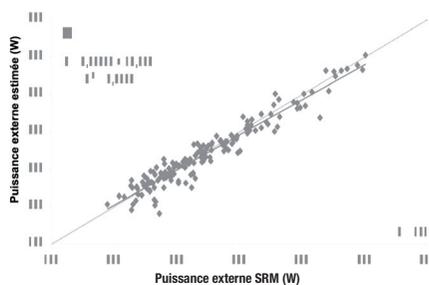


Figure 1 – Corrélation entre PSRM et Pestimée pour tous les sujets et conditions.

> **RESULTATS** – La très bonne corrélation (r = 0,96 ; p<0,001) entre PSRM et Pestimée sur l'ensemble des conditions est présentée en Figure 1. Sur les 15 conditions seulement 3 montraient une différence significative (fort vent). L'erreur

> Calcul de Pméc indirecte :

(Di Prampero 1979) Pméc = 0,5 . SCx.V3 + m.g.Cr.V + m.g.sin().V Où est la densité de l'air en kg.m-3 ; S la surface frontale en m2 ; Cx le coefficient aérodynamique ; V la vitesse en m.s-1 ; m la masse totale en kg ; g la gravité en m.s-2 ; Cr le coefficient de roulement et () l'angle de la pente.

moyenne entre les 2 méthodes (Figure 2) est de -0,95% (I.C. 95% = -10,4 ; 8,5%) et de 0,24% (I.C. = -6,1 ; 6,6%) pour les conditions sans vent. Pas d'effet pente sur l'erreur moyenne.

> **DISCUSSION** – Dans la présente étude l'influence du vent a été mise en évidence. Dans les conditions vent défavorable PSRM est supérieure à Pestimée, ce qui correspond aux données de la littérature (Olds et al. 1993). Pas d'amélioration de la précision en fonction de la pente, ceci peut être expliqué par le fait que toutes les pentes étaient supérieures à 4,4%. Dans la condition en « groupe », l'intervalle de confiance (IC) est plus faible car l'effet du vent diminue grâce à l'abri.

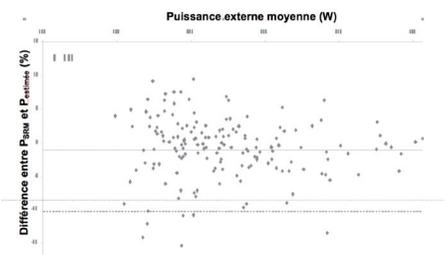


Figure 2 – Moyenne des différences entre PSRM et Pestimée pour toutes les conditions (valeur > 0 ; Pestimée > PSRM). (Bland et Altman)

> **CONCLUSION** – Cette méthode s'avère donc être d'une précision et validité satisfaisante pour évaluer la Pméc externe en cyclisme, à condition de respecter deux conditions : une pente forte (>4%) et un vent faible. Celle-ci est donc un outil à la portée de tous les entraîneurs, qui à l'avantage de permettre la réalisation de tests de terrain pour un faible coût. D'autre part, elle permettrait une analyse rigoureuse de l'évolution des performances des cyclistes professionnels.

> **REFERENCES** – Di Prampero, P.E., Cortili, G., Mognoni, P. and Saibene, F. (1979). J Appl Physiol 47: 201-206. Martin, J., Milliken, D., Cobb, J., McFadden, K. and Coggan, A. (1998). J Appl Biomech 14:276-291. Olds T.S., Norton K.I., Craig N.P. (1993). J Appl Physiol 75(2): 730-737. Vayer A. et Portoleau F. Pouvez-vous gagner le Tour ? Polar, 2002 .