

2m11. 2497. 2

i

Université de Montréal

**MESURE DE LA DURÉE MAXIMALE D'UN EXERCICE  
A UNE PUISSANCE DE 100 % DU VO<sub>2</sub>MAX**

Par

**André Villeneuve**

Département d'éducation physique

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de  
Maître ès sciences (M.Sc.)  
en Sciences de l'activité physique

Septembre 1996

©André Villeneuve 1996



GV

201

U54

1997

V.008

UNIVERSITÉ DE MONTREAL  
FACULTÉ DES ETUDES SUPERIEURES

Ce mémoire intitulé :

**MESURE DE LA DURÉE MAXIMALE D'UN EXERCICE  
A UNE PUISSANCE DE 100 % DU VO<sub>2</sub>MAX**

Présenté par

**André Villeneuve**

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

*Luc Lévesque*  
\_\_\_\_\_  
*Francis Péronnet*  
\_\_\_\_\_  
*Richard Montpetit*  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Mémoire accepté le: *20.01.97*

## SOMMAIRE

Le premier objectif de ce travail était de faire une revue des études disponibles dans la littérature sur la relation entre la puissance relative (% du  $VO_2$ max) et la durée du travail jusqu'à épuisement ( $T_{lim}$ , min). Cette revue permet d'établir la relation entre le %  $VO_2$ max et  $T_{lim}$  pour une étendue de temps travail allant de 1,3 à 240 min:

$$\% \text{ PAM} = 93,76 - 55,60 \times \log (\log T_{lim}) \quad \text{ou}$$

$$\% \text{ PAM} = 94,37 - 54,47 \times \log (\log T_{lim})$$

selon que l'on utilise les données des études ayant rapporté un ou plusieurs couples % PAM- $T_{lim}$ , ou ayant modélisé la relation % PAM- $T_{lim}$ . Le fait que ces deux équations soient très voisines bien qu'elles dérivent de deux ensembles de données expérimentales totalement indépendantes, est un gage de leur validité. La valeur de  $T_{lim}$  pour une PAM donnée pourrait être un peu plus bas sur ergocycle que sur tapis roulant ou à la course sur le terrain, au moins pour les valeurs élevées de  $T_{lim}$ . Elles sont aussi plus basses en laboratoire ou lors d'une évaluation sur le terrain qu'en compétition. Par contre, elles ne semblent pas être différentes selon les sexes. Enfin elles pourraient être un peu plus hautes pour les sujets qui ont un  $VO_2$ max élevé.

L'étude expérimentale qui a porté sur dix coureurs à pied de niveau récréatifs ( $33,1 \pm 5,6$  ans,  $174,1 \pm 3,6$  cm,  $69,1 \pm 6,9$  kg,  $VO_2$ max sur tapis roulant et ergocycle:  $60,4 \pm 4,7$  et  $59,6 \pm 5,9$  mL.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>), montre que les  $T_{lim}$  à 100 %  $VO_2$ max n'est pas significativement différent sur tapis roulant

et sur ergocycle ( $388 \pm 71$  et  $386 \pm 51$  s). Comme l'a montré Billat et al. (1994 a) la valeur moyenne de Tlim à 100 %  $VO_2$ max est donc très reproductible. Toutefois, l'étendue des valeurs de Tlim sur chacun des deux ergomètres est importante, comme cela a été aussi observé dans toutes les études sur cette question. En outre, nous ne trouvons pas de relation entre les valeurs de Tlim sur les deux ergomètres, contrairement aux résultats de Billat et al. (1994 a) qui ont observé une relation significative entre les valeurs de Tlim mesurées à deux reprises. Billat et al. (1994 a et b, 1995 a et b, 1996) ont aussi observé dans certains cas des relations entre Tlim à 100 % de la PAM et diverses autres caractéristiques bioénergétiques, comme le  $VO_2$ max, la vitesse aérobie maximale, et des indices de la capacité de l'anaérobie et de l'endurance. Ces relations ne sont pas toujours consistantes et nous ne les avons pas retrouvées dans notre étude. Par contre, l'analyse de toutes les données de la littérature suggère que Tlim à 100 % du  $VO_2$ max pourrait être effectivement, relié de façon inverse au  $VO_2$ max et à la VAM. Prises dans leur ensemble les données de Billat et al. (1994 a) et nos propres données sur la fidélité de Tlim à 100 % de la PAM montrent que la mesure de cette variable est reproductible, dans un groupe de sujets, mais ne l'est pas de façon convenable pour un sujet pris individuellement: les risques d'erreurs étant beaucoup trop grand. Ceci empêche de pouvoir actuellement considéré la valeur de Tlim à 100 % du  $VO_2$ max comme une variable d'intérêt dans l'évaluation de l'athlète et dans le suivi de son entraînement.

## TABLE DES MATIÈRES

Page de présentation. ....	i
Identification du jury. ....	ii
Sommaire. ....	iii
Table des matières. ....	v
Liste des tableaux. ....	vii
Liste des figures. ....	x
Liste des abréviations. ....	xv
Dédicace. ....	xvi
Remerciements. ....	xvii
REVUE DE LITTÉRATURE. ....	1
1. PROBLÈMES ET BUT DE LA REVUE. ....	1
2. DESCRIPTION DES SOURCES DOCUMENTAIRES. ....	2
3. TRAITEMENT DES DONNÉES. ....	23
3.1. Analyse directe des données. ....	23
3.2. Analyse selon le modèle hyperbolique simple. ....	25
3.3. Analyse selon la relation de Lloyd. ....	27
3.4. Cas particuliers. ....	31
4. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES. ....	34
4.1. Première et deuxième catégories d'études. ....	34
4.2. Troisième catégorie d'études. ....	44
5. DESCRIPTION DE LA RELATION ENTRE % PAM ET Tlim. ....	56
5.1. Relation moyenne entre le % PAM et Tlim. ....	56

5.1. Relation moyenne entre le % PAM et Tlim. ....	56
5.2. Sources de variations de la relation % PAM-Tlim. ....	58
5.2.1. <i>Compétition vs laboratoire.</i> ....	58
5.2.2. <i>Hommes vs femmes.</i> ....	64
5.2.3. <i>Niveau du VO<sub>2</sub>max.</i> ....	64
5.3. Enveloppe supérieure de la performance. ....	67
RAPPORT DE RECHERCHE. ....	72
1. INTRODUCTION. ....	72
2. METHODES. ....	75
2.1 Sujets et protocole. ....	75
2.2 Détermination du VO <sub>2</sub> max. ....	76
2.3. Vitesse et puissance correspondant au VO <sub>2</sub> max. ....	80
2.4 Détermination de la durée maximale à 100% du VO <sub>2</sub> max ..	82
2.5 Analyse des performances en course. ....	84
2.6 Statistiques. ....	84
3. RÉSULTATS ....	85
4. DISCUSSION. ....	93
4.1. Comparaisons aux données de la littérature. ....	98
4.2. Valeurs extrêmes de Tlim à 100 % de la PAM. ....	100
4.3. Variabilité de Tlim à 100 % de la PAM. ....	105
4.4 Relations entre Tlim à 100 % PAM et d'autres variables. .	106
4.5 Tlim à 100 % de la PAM et performance. ....	111
CONCLUSION. ....	117

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Puissance relative soutenue (% PAM) en fonction du temps de travail jusqu'à épuisement (Tlim): études rapportant des couples (Tlim-%PAM) isolés.....	3
Tableau 2: Puissance relative soutenue (%PAM) en fonction du temps de travail jusqu'à épuisement (Tlim): études rapportant plusieurs couples (Tlim-%PAM). . . . .	12
Tableau 3: Relations entre le % PAM et le Tlim estimées par divers auteurs à l'aide de différent modèles de données. . . . .	18
Tableau 4: Caractéristiques des études de la relation entre le % PAM et Tlim . . . . .	22
Tableau 5: Exemple de calcul de la relation entre le % PAM et Tlim, à partir d'une relation hyperbolique simple (données de Jenkins et Quigley 1991). . . . .	28
Tableau 6: Relation entre le % PAM et le Tlim calculée selon divers modèles de données à partir des données rapportées par divers auteurs ( $y = \% \text{ PAM}$ ; $x = \text{Tlim}$ ). . . . .	35
Tableau 7: Équations et résidus des modèles décrivant la relation entre le % PAM et le Tlim selon les données des tableaux 1 et 2. . . . .	42
Tableaux 8: Valeurs du % de la PAM correspondant à diverses valeurs de Tlim choisies entre 1,3 et 240 min, selon l'analyse des données de la littérature (tableau 1 et 2, et tableau 3). . . . .	45

Tableau 9: Estimations de la puissance relative selon l'équation de Léger et Mercier (1986) et de Di Prampero (1984) d'après les données de divers auteurs. ....	63
Tableau 10: Résumé des études de Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM ( $VO_{2max}$ , en $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ; VAM en $m.s^{-1}$ ; Tlim en secondes; étendue). ....	73
Tableau 11: Caractéristiques des sujets .....	77
Tableau 12: Performances (h:min:s) en course à pied réalisées par les sujets .....	78
Tableau 13: Fréquence cardiaque (bpm), $VO_{2max}$ ( $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) et quotient d'échanges gazeux respiratoires à la fin du test de $VO_{2max}$ sur tapis roulant et sur bicyclette ergométrique. ....	86
Tableau 14: Fréquence cardiaque (bpm), $VO_2$ ( $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) et quotient d'échanges gazeux respiratoires lors du test à 100% du $VO_{2max}$ sur tapis roulant et sur bicyclette ergométrique. ....	87
Tableau 15: Estimations de la puissance aérobie maximale ( $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ), de la capacité anaérobie ( $J.kg^{-1}$ ) et de l'endurance (sans unité) à partir des performances en course à pied. ....	90
Tableau 16: Calculs de la vitesse $km.h^{-1}$ correspondant a 100 % du $VO_{2max}$ ( $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) sur tapis roulant pour tous les sujets. ....	91

Tableau 17: Calculs de la puissance correspondant a 100 % du $VO_2$ max sur ergocycle (le $VO_2$ et le $VO_2$ max sont exprimés en $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) pour tous les sujets. . . . .	92
Tableau 18: Estimation du cout énergétique (C, en $ml.kg^{-1}.m^{-1}$ ) de la course sur tapis roulant et du rendement énergétique brut (%) sur bicyclette ergométrique. . . . .	94
Tableau 19: Durée de l'exercice jusqu'à épuisement, en secondes, à 100 % du $VO_2$ max sur tapis roulant et bicyclette ergométrique. . . . .	95

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1: Etendues des Tlim pour différents % PAM dans des études qui ont rapporté plus d'un couple Tlim-% PAM (les étendues sont indiquées par les barres noires) (données du tableau 2). . . . . 17
- Figure 2: Relation entre le % PAM et le Tlim calculée à partir des données de trois groupes d'auteurs qui ont rapporté plusieurs couples Tlim-% PAM sur une large étendue de Tlim et de % PAM (données du tableau 2). . . . . 38
- Figure 3: Relation entre le % PAM mesuré ou estimé et Tlim pour l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2) . . . . . 39
- Figure 4: Dispersion des résidus autour de la relation entre le % PAM mesuré ou estimé et Tlim pour l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM . . . . . 43
- Figure 5: Relation entre le % PAM observé pour l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM, et le % PAM estimé à partir de l'équation calculée à la figure 3. . . . . 46
- Figure 6: Relation graphique entre le % PAM (% VO<sub>2</sub>max) et Tlim (Time, min) selon Londeree (1986) chez des coureurs de fond (Trained for long distance events/Long distance runners) et de demi-fond (Trained for middle distance events/Middle distance runners). . . . . 48

- Figure 7: Relation graphique entre % PAM (Fraction of  $VO_2$ max sustainable, fraction de  $VO_2$ max) et Tlim (Time, min) selon Olds et al. 1993 chez des cyclistes (Anaerobic threshold = seuil anaérobie; 3 km (F) and 5 km (M) ind. pursuit = poursuite individuelle sur 3 (femmes) et 5 km (hommes); 40 km time trial = 40 km contre la montre; 100 km time trial = 100 km contre la montre). . . . . 49
- Figure 8: Étendues de Tlim (barre noire) dans les études ayant modélisé la relation % PAM-Tlim (données du tableau 3). . . . . 51
- Figure 9: Représentation graphique des relations entre Tlim et le % PAM rapportées dans les études ayant modélisé cette relation (données du tableau 3). . . . . 52
- Figure 10: Relation log log calculée entre Tlim et le % PAM à partir des données des études ayant modélisé cette relation (données du tableau 3).
- Figure 11: Comparaison des relations log log calculées entre Tlim et le % PAM à partir des données rapportées dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2) et à partir des données des études ayant modélisé cette relation (données du tableau 3). Les courbes décrivant les deux équations sont pratiquement superposables. . . . . 55
- Figure 12: Comparaison des données observées sur ergocycle et en course à pied (sur piste ou tapis roulant) dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2). . . . . 59

- Figure 13: Comparaison des données observées en compétition et lors d'évaluation en laboratoire ou sur le terrain dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2). . . . . 61
- Figure 14: Comparaison des données observées chez les hommes et les femmes dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2). . . . . 65
- Figure 15: Comparaison des données observées chez des sujets ayant un  $VO_2\text{max}$  inférieur et supérieur à  $60 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$  dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2). . . . . 66
- Figure 16: Distribution de fréquence des résidus autour de la relation entre le % PAM mesuré ou estimé et Tlim pour l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM. . . . . 68
- Figure 17: Relation entre le % PAM mesuré ou estimé et Tlim pour les études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM et qui rapportent les valeurs de % PAM les plus élevés pour les Tlim correspondants. Cette courbe peut être considérée comme l'enveloppe supérieure de la performance. . . . . 70
- Figure 18: Moyennes ( $\pm$  écarts types) du Tlim à 100 % de la PAM rapportées pour l'ensemble des sujets, pour les hommes et pour les femmes (données du tableau 10). . . . . 74
- Figure 19: Exemple d'extrapolation de la VAM . . . . . 81

Figure 20: Exemple d'extrapolation de la PAM. ....	83
Figure 21: Relation entre le $VO_2$ max mesuré sur tapis roulant et sur ergocycle au cours du test progressif. ....	88
Figure 22: Relation entre le $VO_2$ max mesuré sur tapis roulant et sur ergocycle au cours du test à 100 % de la VAM ou de la PAM jusqu'à épuisement. ....	89
Figure 23: Diagramme de dispersion des valeurs de Tlim à 100 % de la VAM et de la PAM. ....	96
Figure 24: Moyennes (carrés noirs) ( $\pm$ écarts types), et étendues (losanges) des valeurs de Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM rapportées dans les études listées au tableau 10 et dans notre étude (Villeneuve 1996). ....	99
Figure 25: Relation entre Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM et la durée des paliers de l'exercice utilisé pour mesurer le $VO_2$ max et la PAM ou la VAM (études du tableau 10). ....	102
Figure 26: Relation entre Tlim à 100 % de la VAM ou de la PAM et le $VO_2$ max rapportés dans les études sur cette question (données du tableau 10 plus résultats de cette étude). ....	109
Figure 27: Relation entre les valeurs de Tlim à 100 % de la VAM et de la VAM rapportées dans les études sur cette question (données du tableau 10 plus les résultats de cette étude). ....	

Figure 28: Comparaison des vitesses soutenues par trois coureurs ayant les mêmes caractéristiques bioénergétiques ( $VO_2$ max, capacité anaérobie, endurance, économie de la foulée) mais soutenant 100 % de la VAM pendant 5 min (sujet 1), 7,5 min (sujet 2), ou 10 min (sujet 3). Les vitesses sont exprimées en pourcentage (fractions) de la vitesse du sujet 1. .... 114

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

Tlim: durée du travail jusqu'à épuisement

PAM : puissance aérobie maximale

k1 et k2: constantes de temps qui décrivent la cinétique de la mise en jeu des mécanismes de production d'énergie aérobie et anaérobie au début de l'exercice.

BMR: métabolisme de repos

Pv: puissance

BSA: surface corporelle

BM: masse corporelle

Fcmax: fréquence cardiaque maximale

bpm: battement par minute

Wlim: quantité de travail effectué jusqu'à Tlim

VO<sub>2</sub>max: consommation maximale d'oxygène

....8 ans plus tard....

Je dédie ce mémoire à tous ceux qui ont cru à ma ténacité...

## REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, François Péronnet, pour sa grande disponibilité, sa compréhension et d'avoir rendu possible le déroulement de ce long projet, tant à la réalisation, qu'à la rédaction du mémoire. Sans son aide précieuse ce mémoire serait resté inachevé.

De plus, j'aimerais remercier tout ceux qui ont pris part de près ou de loin à la réalisation de ce projet; Arthur, Suzanne, Isai, Pierre et, Gérard et Paul.

J'en profite aussi pour remercier tout ceux qui m'ont encouragé; Parents et Amis, et qui ont cru qu'il y aurait une fin.

## REVUE DE LITTÉRATURE

### 1. PROBLÈMES ET BUT DE LA REVUE

De façon générale pour un effort poursuivi jusqu'à épuisement, la durée de l'effort ( $T_{lim}$ ) est inversement proportionnelle à la puissance, qui peut être exprimée, par exemple, en puissance relative, en pourcentage de la puissance aérobie maximale (% PAM). Pour des exercices réalisés à des puissances relatives élevées,  $T_{lim}$  est court; il augmente progressivement lorsque le % PAM décroît. Ce phénomène, qui est bien connu dans son ensemble, autant de façon intuitive que de façon expérimentale, reste relativement mal décrit dans son détail. Par exemple, parmi un échantillon de 15 manuels de base en physiologie de l'exercice publiés depuis 1960 (Astrand and Rodahl 1977, Edington and Edgerton 1976, Powers and Howley 1994, Johnson 1960, Fox and Mathews 1981, Lamb 1978, Astrand et Rodahl 1986, Brooks and Fahey 1984, de Vries 1974, Fox et al. 1988, Willmore and Costill 1994, McArdle et al. 1991, Monod et Flandrois 1994, Jensen and Fisher 1979, Shephard and Astrand 1992), et qui constituent les sources de références les plus facilement disponibles, quatre seulement (Astrand and Rodahl 1977, Astrand et Rodahl 1986, McArdle et al. 1991, Monod et Flandrois 1994) discutent l'allure de la relation  $T_{lim}$ -% PAM. Quelques-uns indiquent la valeur approximative du % PAM qui peut être maintenu pour une valeur de  $T_{lim}$ : 85 % PAM pendant 60 min (Astrand et Rodahl 1977 et 1986); entre 75 et 90 % PAM pendant 120 min (McArdle et

al. 1991). Seuls Monod et Flandrois (1994) présentent un graphique indiquant pour une large étendue de valeurs de Tlim, les valeurs moyennes du % PAM qui sont susceptibles d'être soutenues pour des sujets plus ou moins endurants selon le modèle décrit par Péronnet et Thibault (1989) et Péronnet (1991).

L'objectif de cette revue de littérature est de tenter de décrire, à partir de données expérimentales publiées sur cette question, la relation existant entre le % PAM qui peut être soutenu et Tlim. Nous avons volontairement limité l'analyse à des valeurs de Tlim inférieures à 4 heures ou 240 min. Peu de données sont disponibles pour des valeurs de Tlim supérieures à 240 min, qui correspondent à des efforts de très longue durée plus rares sinon exceptionnels, et qui sont plus difficiles à étudier. De plus les phénomènes physiologiques qui expliquent l'allure de cette relation ne sont pas discutés. Cette question est en dernière analyse la vaste question de la "fatigue" qui sort du cadre limité de ce travail qui reste donc descriptif.

## **2. DESCRIPTION DES SOURCES DOCUMENTAIRES**

Afin de décrire la relation entre %PAM et Tlim, nous avons repéré de 1969 à 1996, 87 articles qui rapportent les informations pertinentes pour caractériser cette relation. Ces études peuvent être classées en trois grandes catégories. Dans la première catégorie, on trouve les études qui rapportent dans une condition expérimentale particulière, le % PAM maintenu pour une valeur de Tlim donnée et isolée (Tableau 1). Dans la

Tableau 1. Puissance relative soutenue (% PAM) en fonction du temps de travail jusqu'à épuisement (Tlim): études rapportant des couples (Tlim-%PAM) isolés.

Auteurs	Conditions expérimentales et $\text{VO}_2\text{max}$	Tlim (min)	% PAM
Allen et al. 1985	24 $\sigma$ , course, compétition, terrain,	33	89
	70,3 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		
	56,4 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		
	62,2 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		
Billat et al. 1994 a	8 $\sigma$ , tapis roulant, 69,6 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	6,73	100
	test 1 test 2	6,70	100
Billat et al. 1995 b	14 $\sigma$ , tapis roulant	16,92	90
	74,9 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	5,35	100
		2,93	105
Billat et al. 1994 b	38 $\sigma$ , tapis roulant	6,0	100
	71,4 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		
Björkman et al. 1984	8 $\sigma$ , ergocycle	116	68
	58,8 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		
Briggs 1977	10 $\sigma$ , tapis roulant, 71,9 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	8,95	95

Tableau 1 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales et $\text{VO}_2\text{max}$	Tlim (min)	% PAM
Brooke et al. 1975	8 $\sigma$ , ergocycle 53 ml. $\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	148	67
Calles-Escandon et al. 1991	9 $\sigma$ , ergocycle 58 ml. $\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	68	67
Camus et al. 1988	8 $\sigma$ ergocycle 50,7 ml. $\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ tapis roulant 61,1 ml. $\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	4,04 4,87	105 105
Chryssanthopoulos et al. 1994	5 $\sigma$ et 4 $\varphi$ , tapis roulant 63 ml. $\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	121	70
Coggan et Coyle 1989	6 $\sigma$ ergocycle, 65,3 ml. $\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	169	70
Costill et Winrow 1970	1 $\sigma$ course, compétition, terrain, 65,1 ml. $\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	156	85
Costill et al. 1971	1 $\sigma$ course, compétition, terrain, 69,7 ml. $\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	128	86

Tableau 1 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales et $\text{VO}_2\text{max}$	Tlim (min)	% PAM
Costill et Fox 1969	6 $\sigma$ course, compétition, terrain, 71,4 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	147	74,8
Costill et al. 1973	16 $\sigma$ course, compétition, terrain, 66,6 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	56,3	86,1
Coyle et al. 1988	14 $\sigma$ ergocycle, 67,3 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		
	haut seuil	60,8	88
	bas seuil	29,1	88
Coyle et al. 1991	15 $\sigma$ ergocycle,		
	elite 69,6 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> subelite 69,3 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	60,0 60,0	89,7 85,8
Coyle et al. 1986	7 $\sigma$ , ergocycle, 67 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	192	71
Coyle et al. 1983	10 $\sigma$ ergocycle, 57 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	134	74
Davis et Thompson 1986	10 $\sigma$ , tapis roulant, 66.8 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	240	70

Tableau 1 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales et $VO_2$ max	Tlim (min)	% PAM
Devlin et al. 1986	8 $\sigma$ , ergocycle, 53 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	48	70
Felig et al. 1982	19 $\sigma$ , ergocycle, 49 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	164	62,5
Foster et al. 1979	8 $\sigma$ à 54 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> et 8 $\varphi$ à 38 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , ergocycle	53	84
Fruth et Gisolfi 1983	5 $\sigma$ , tapis roulant 59 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	159	70
Gleeson et al. 1986	6 $\sigma$ ergocycle 47 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	96	73
Hanon et Stephan 1993	12 $\sigma$ à 78,4 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> et 10 $\varphi$ à 63,1 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> tapis roulant, hommes femmes	5,53 6,10	100 100

Tableau 1 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales et $\dot{V}O_2$ max	Tlim (min)	% PAM
Hanson et al. 1982	3 $\sigma$ course, compétition, terrain, 63,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		
	sujet 1	86,0	82
	sujet 2	90,0	75
	sujet 3	89,0	84
Hargreaves et al. 1987	6 $\sigma$ ergocycle	93	75
	64,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		
Higgs 1973	20 $\varphi$ Tapis roulant, 41,32 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	4,58	100
Horvath et Michael 1970	14 $\varphi$ ergocycle, 29,3 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	2,70	126
Knapik et al. 1987	8 $\sigma$ ergocycle, 42,3 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	139	45
Lavoie et Mercer 1987	5 $\varphi$ ergocycle 61,4 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	3,82	100
Macaraeg 1983	12 $\sigma$ , tapis roulant	78	85
Maughan et Leiper 1983	18 $\sigma$ course, compétition, terrain	214	67,8
	60,6 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>		

Tableau 1 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales et $\dot{V}O_2$ max	Tlim (min)	% PAM
Maughan et al. 1989	6 $\sigma$ , ergocycle 53 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	76	70
Maughan et Gleeson 1988	5 $\sigma$ , ergocycle 44,9 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	78	70
Mayhew et Andrew 1975	24 $\sigma$ course, simulé, terrain 55 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	9,48	72
Mc Murray et al. 1983	6 $\sigma$ , tapis roulant 53,6 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	67	80
Myhre et al. 1982	3 $\sigma$ course, compétition, terrain, 62,1 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	216	63
Nishibata et al. 1993	7 $\sigma$ , ergocycle 49,1 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	92	73
Oja et al. 1987	11 $\sigma$ course, compétition, terrain, 50,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	210	85,7

Tableau 1 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales et $\text{VO}_2\text{max}$	Tlim (min)	% PAM
Okano et al. 1988	12 $\sigma$ , ergocycle 52,8 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	132	62
Padilla et al. 1992	24 $\sigma$ à 71,9 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> et 14 $\sigma$ à 65,3 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> course, compétition, terrain femmes hommes	7,00 8,40	100 100
Péronnet et al. 1987	18 $\sigma$ course, compétition, terrain	173	79,4
Powers et al. 1990	9 $\sigma$ , ergocycle 63,2 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	40	85
Riley et al. 1988	9 $\sigma$ , tapis roulant 66,3 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	102	70
Sasaki et al. 1987	5 $\sigma$ , tapis roulant 51,8 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	40	80

Tableau 1 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales et $\text{VO}_2\text{max}$	Tlim (min)	% PAM
Segal et al. 1985	10 ♂, ergocycle	61	74
Sirotniak et Foster 1992	11 ♀, ergocycle 46,6 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$	166	68
Snyder et al. 1983	9 ♂, ergocycle	144	62
Thomas et al. 1991	8 ♂, ergocycle 55,3 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$	100	68
Weltman et Regan 1983	9 ♂ ergocycle, 54,8 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ test 1 test 2	4,55 4,75	112 112
Wilber et Moffatt 1992	10 ♂, tapis roulant 60,5 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$	92	80

deuxième catégorie on trouve les études rapportant le % PAM maintenu pour au moins deux valeurs de  $T_{lim}$  (Tableau 2). Cependant dans la plupart de ces études les étendues des valeurs de  $T_{lim}$  et du % PAM qui ont été étudiées sont très faibles (Figure 1). En conséquence seules quelques études permettent d'établir de façon claire l'allure de la relation entre les deux variables (Davies et Thompson 1979, Farrell et al. 1979, Scrimgeour et al. 1986). Enfin la troisième catégorie est celle des études dans lesquelles, à partir d'un certain nombre de données expérimentales, ou à partir de spéculations, les auteurs proposent un modèle graphique ou mathématique décrivant la relation entre  $T_{lim}$  et le %PAM (Tableau 3). La plupart de ces modèles sont des applications du modèle hyperbolique simple. Les autres sont des modèles de données dont le but est simplement de décrire de façon mathématique la relation entre deux variables sans chercher à expliquer les mécanismes sous jacents à cette relation. Seuls Péronnet et Thibault (1989) ont présenté un modèle mixte. Ce modèle est un modèle de systèmes dérivé du modèle hyperbolique simple mais contenant des corrections empiriques pour prendre en compte la cinétique de la mise en jeu des mécanismes de production d'énergie anaérobie et aérobie au début de l'exercice, la réduction progressive de la puissance du métabolisme aérobie lorsque le temps de travail augmente au delà d'environ 7 min, qui caractérise l'endurance, ainsi que la réduction progressive de la capacité anaérobie disponible pour des temps de travail supérieurs à environ 7 min. Le modèle s'écrit comme suit:

Tableau 2. Puissance relative soutenue (% PAM) en fonction du temps de travail jusqu'à épuisement (Tlim): études rapportant plusieurs couples (Tlim-%PAM).

Auteurs	Conditions expérimentales	Tlim (min)	% PAM
Billat et al. 1995 a	16 ♂ à 75 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> tapis roulant	17,7	105
		5,42	100
		2,95	90
Billat et al. 1996	15 ♂ 77,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> 14 ♀ 63,2 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , tapis roulant	6,12	100
		7,02	100
		2,48	120
		2,45	120
Bosch et al. 1990	10 ♂ blancs 63,2 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , et 9 ♂ noirs 60,4 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course comparé entre le terrain et le tapis roulant,	150	89
		152	81,5
		172	76
		178	68

Tableau 2 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales	Tlim (min)	% PAM
Conley et al. 1984	1 ♂ à 80,1 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	1,75	111
		2,27	107
		3,53	103
		3,79	103
		4,86	100
7,61	96		
Costill et Winrow 1970	2 ♂ à 63,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	216	83
		149	85
Daniels 1974	1 ♂ à 81 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	1,75	117
		3,6	107
		3,85	107
		8,42	97,8
		14	88
Davis et Thompson 1979	13 ♂ à 72,5 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> et 9 ♀ à 58,2 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	188,76	78,8
		15,8	93,6
		150	81,9
		14	97,7
		133	85,8

Tableau 2 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales	Tlim (min)	% PAM
Di Prampero et al. 1986	36 $\sigma$ à 54,9 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	103	81,3
		188	73,3
Farrel et al. 1979	18 $\sigma$ à 61,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	166	75
		74,8	79
		56,6	82
		35,4	85
		10,7	94
Lacour et al. 1989	5 $\text{♀}$ et 12 $\sigma$ course en compétition et simulée, terrain, 71,6 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	3,84	105
		6,33	100
		8,33	97,3
Lacour et al. 1990	27 $\sigma$ à 71,3 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> course, compétition, terrain,	1,85	118
		3,77	108
		8,40	100
		9,45	101
		14,1	97,4
		35,7	89,7

Tableau 2 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales	Tlim (min)	% PAM
Maron et al. 1976	2 $\sigma$ à 72 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	156 159	79,9 78,3
McLellan et Skinner 1985	16 $\sigma$ à 50,5 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , ergocycle,	59 28 11	73,1 85,4 95
Noakes et al. 1988	18 $\sigma$ à 57,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	205 210 214	74,5 73,9 66,9
Adopo et al. 1988	7 $\sigma$ à 69,9 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , ergocycle	7,60 9,40 12,4	101 94,8 90,4
Ramsbottom et al. 1992	8 $\sigma$ à 60,0 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> et 8 $\varphi$ 52,9 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> tapis roulant	18,8 21,8	94,2 90,1

Tableau 2 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales	Tlim (min)	% PAM
Scrimgeour et al. 1986	30 ♂ à 64 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course compétition, terrain,	37,1	85,8
		83,0	80,7
		177	74,3
Vandewalle et al. 1989	9♂ à 51 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , ergocycle,	3,22	105
		2,22	120
		1,63	135
		1,33	150
Wells et al. 1981	7♂ à 58,4 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> et 4♀ à 59,2 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , course, compétition, terrain,	193	75,8
		179	81,9

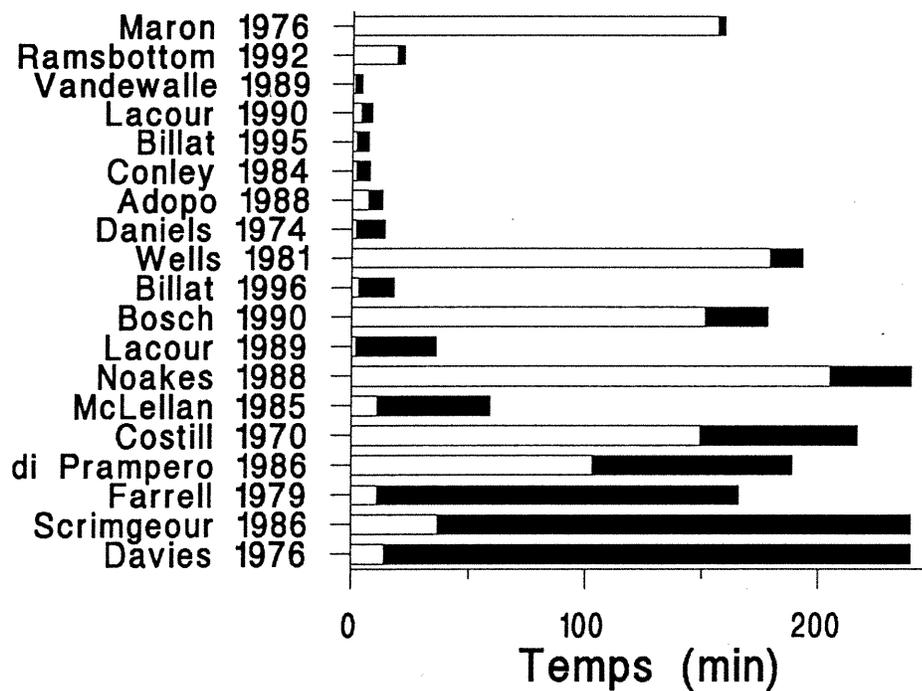


Figure 1: Etendues des Tlim pour différents % PAM dans des études qui ont rapporté plus d'un couple Tlim-% PAM (les étendues sont indiquées par les barres noires) (données du tableau 2)

Tableau 3: Relations entre le % PAM et le Tlim estimées par divers auteurs à l'aide de différents modèles de données

Auteurs	Conditions expérimentales	Tlim (étendue en min)	% PAM (étendue)	Modèle
Aunola et al. 1990	17 $\sigma$ ergocycle, 53,5 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	36 à 95	68 à 77	$t = e^{(8,46 - 0,0025 W)}$
Camus et al. 1988	7 $\sigma$ tapis roulant, 57,6 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	1,37 à 5,51	150 à 100	$t = 330,8 * e^{(-0,14 * (a-20))}$ $a = W / kg$
Gaesser et Wilson 1988	5 $\sigma$ ergocycle, simulé, 43,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> , pré-entraînement continu	1,50 à 10,6	83,1 à 133	$t = 14000 / (p - 201)$ VO <sub>2</sub> max à 268,2 W
idem	idem, post-entraînement continu	1,50 à 10,4	90,8 à 136	$t = 13100 / (p-228)$ VO <sub>2</sub> max à 274,2 W
idem	6 $\sigma$ , idem, pré-entraînement intervalles	1,50 à 10,2	88,7 à 139	$t = 14700 / (p-220)$ VO <sub>2</sub> max à 275 W
idem	idem, post-entraînement intervalles	1,50 à 10,3	95,2 à 140	$t = 13600 (p-254)$ VO <sub>2</sub> max à 290 W
Glesser et Vogel 1973	8 $\sigma$ , ergocycle 43,7 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	6,70 à 188	61,7 à 104	log Tlim = -0,0079 % PAM + 4.37

Tableau 3 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales	Tlim (étendue en min)	% PAM (étendue)	Modèle
Jenkins et Quigley 1990	8 $\sigma$ , ergocycle, 74,1 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	1,46 à 6,52	99,4 à 144	t = 18000 / (p-314) VO <sub>2</sub> max à 362 W
Jenkins et Quigley 1991	9 $\sigma$ , ergocycle, 60 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	1,71 à 5,20	96,8 à 129	t = 15300 / (p-251) VO <sub>2</sub> max à 310 W
Jenkins et Quigley 1993	8 $\sigma$ , ergocycle, 51 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> pré-entraînement	1,38 à 3,38	120 à 158	t = 13400 / (p-234) VO <sub>2</sub> max à 251 W
idem	idem, post-entraînement	2,17 à 5,75	109 à 143	t = 20000 / (p-242) VO <sub>2</sub> max à 276 W
Lechevalier et al. 1989	13 $\sigma$ et 8 $\varphi$ , course, simulé, terrain, 60,8 et 49,8 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	4 à 15	88 à 108	D = 284 + 233,4 * t VO <sub>2</sub> max = 2,209 + 3,163V + 0,00052554V <sup>3</sup>
Léger et al. 1986	251 $\sigma$ et 60 $\varphi$ course, compétition, terrain	1 à 240	69 à 139	y = 85,22 - 0,0667 X + 26,1178e <sup>-0,0663x</sup> + 66,694e <sup>-0,7988x</sup>
Londeree 1986	course, terrain, compétition, longue distance	4,2 à 108	80 à 105	estimation faite à l'oeil
idem	distance moyenne	4,0 à 148	72 à 105	estimation faite à l'oeil

Tableau 3 (suite)

Auteurs	Conditions expérimentales	Tlim (étendue en min)	% PAM (étendue)	Modèle
Mclellan et Cheung 1992	14♂, ergocycle, 54,4 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	2,13 à 6,5	89,8 à 120	$p = 242,9 + 305,25 / t$
Montmayeur et Villaret 1990	80♂ course compétition , terrain, 66 ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	1,50 à 240	77,9 à 132	$y = 109,837 (\ln x)^{-0,202}$ x = temps
Moritani et al. 1981	8♂ et 8♀ ergocycle, 54,9 et 41	0,92 à 4,8	102 à 177	$t = 13590 / (p-203,9)$ VO <sub>2</sub> max à 255 W
Olds et al. 1993	18♂, ergocycle 68,3ml.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>	0 à 180	voir texte	voir texte
Péronnet et Thibault 1989	records du monde 1987 du 60 m au Marathon	0,11 à 127	258 à 83,5	voir texte

$$P_T = [S/T(1-e^{-T/k_2})] + (1/T) \int [BMR + B(1-e^{-t/k_1})] dt$$

où  $P_T$  est le puissance moyenne développée en  $\text{watt.kg}^{-1}$ ;  $S = A$  (capacité anaérobie, en  $\text{J/kg}^{-1}$ ) quand  $T$ , le temps de travail, est inférieur à 7 min, et  $S = A + [A f \ln (T/7)]$  quand  $T$  est supérieur à 7 min (le facteur  $f$  représente la diminution progressive de la capacité anaérobie disponible quand le temps de travail augmente au delà de 7 min environ; BMR est le métabolisme de repos ( $\text{watt.kg}^{-1}$ );  $B = MAP - BMR$  quand  $T$  est inférieur à 7 min, et  $B = (MAP - BMR) + [E \ln (T/7)]$  quand  $T$  est supérieur à 7 min;  $k_1 = 30$  s et  $k_2 = 20$  s décrivent la cinétique de la mise en jeu des mécanismes de production d'énergie aérobie et anaérobie au début de l'exercice.

Comme le montrent les tableaux 1 à 3 qui résument les résultats de ces études, et le tableau 4 qui résume les caractéristiques de ces études, la plupart des observations ont été faites chez des sujets masculins (70 études sur 87), peu d'information étant disponible chez le sujet féminin (quatre études seulement) et seules trois études ayant systématiquement comparé les données observées chez des sujets masculins et féminins (Billat et al. 1996, Hanon et Stéphan 1993, Padilla et al. 1992). En outre, dans toutes les études sauf deux qui ont été conduites chez des sujets sédentaires (Horvath et Michael 1970, Jenkins et Quigley 1993), il s'agit de sujets entraînés ou pour le moins de sujets physiquement actifs. Environ les deux tiers des études ont été conduites en laboratoire (57 études sur 87) et

Tableau 4: Caractéristiques des études de la relation entre le % PAM et Tlim

sexe des sujets	masculins: 70 études féminins: 4 études mixtes: 13 études
nombre de sujets	de 1 à 311
niveau d'entraînement	sédentaires: 2 études actifs: 82 études sédentaires/actifs: 3 études
Tlim	de 1,33 à 240 min
% PAM	de 45 % à 150 %
condition	laboratoire: 57 études terrain: 29 études laboratoire/terrain: 1 étude
type d'exercice	ergocycle: 38 études tapis roulant: 18 études course: 29 études ergocycle vs tapis roulant: 1 étude course vs tapis roulant: 1 étude

l'autre tiers sur le terrain, la plupart de ces dernières (27 études sur 29) ayant été conduites dans une situation de compétition réelle. Les valeurs de la puissance relative varient de 150 à 45 % de la PAM et le nombre de sujets observés varie de façon importante d'une étude à l'autre, certaines n'ayant porté que sur un seul sujet (Costill et al. 1971, Conley et al. 1984, Daniels 1974) alors que d'autres portent sur un échantillon de plus de 20 sujets, comme par exemple celles de Higgs (1973), Mayhew and Andrew (1975), Scrimgeour et al. (1986), Hanon et Stephan (1993), Padilla et al. (1992), Davies et Thompson (1979), di Prampero et al. (1989), Allen et al. (1985), Lacour et al. (1990), Maughan et Leiper (1983), Léger et al. (1986), Lechevalier et al. (1989), et Montmayeur et Villaret (1990). Enfin, les études ont été conduites à la course sur tapis roulant (18 études), sur le terrain (29 études), ou sur ergocycle (38 études), une seule étude ayant comparé la valeur de  $T_{lim}$  pour une valeur de % PAM donnée sur le tapis roulant et l'ergocycle (Camus et al. 1988), et une seule étude ayant comparé des valeurs de  $T_{lim}$  pour des % PAM données sur tapis roulant et la course (Bosch et al. 1989).

### **3. TRAITEMENT DES DONNÉES**

#### **3.1. Analyse directe des données**

La majorité des études que nous avons consultées rapportent directement les données nécessaires pour établir la relation entre  $T_{lim}$  et % PAM, à savoir, un ou des temps d'exercice jusqu'à épuisement ou des

vitesses de déplacement sur une distance donnée en compétition ou en compétition simulée, et les valeurs correspondantes de la puissance relative soutenue, exprimée en pourcentage du  $VO_2$ max (Allen et al. 1985, Aunola et al. 1990, Billat et al. 1994 a et b, 1995 a, 1996, Björkman et al. 1984, Bosch et al. 1990, Briggs 1977, Brooke et al. 1975, Calles et Escandon 1991, Camus et al. 1988, Chryssanthopoulos et al. 1994, Coggan et Coyle 1989, Costill et al. 1969, 1970, 1971, 1973, Coyle et al. 1983, 1986, 1988, 1991, Davies et Thompson 1979, 1986, Devlin et al. 1986, Di Prampero et al. 1986, Farrel et al. 1979, Felig et al. 1982, Foster et al. 1979, Fruth et Gisolfi 1983, Gleeson et al. 1986, Hanon et Stephan 1993, Hanson et al. 1982, Hargreaves et al. 1987, Higgs 1973, Knapik et al. 1987, Lavoie et Mercer 1987, Leger et al. 1986, Londeree 1986, Macaraeg 1983, Maron et al. 1976, Maughan et al. 1989, Maughan et Gleeson 1988, Mayhew et Andrew 1975, Mclellan et Skinner 1985, Mc Murray et al. 1983, Montmayeur et Villaret 1990, Myrhe et al. 1982, Nishibata et al. 1993, Noakes et al. 1988, Oja et al. 1987, Okano et al. 1988, Olds et al. 1993, Padilla et al. 1992, Péronnet et al. 1987, 1988, 1989, Powers et al. 1990, Ramsbottom et al. 1992, Riley et al. 1988, Sasaki et al. 1987, Scrimgeour et al. 1986, Segal et al. 1985, Sirotniak et Foster 1992, Snyder et al. 1983, Thomas et al. 1991, Vandewalle et al. 1989, Wells et al. 1981, Weltman et Regan 1983, Wilber et Moffatt 1992.) Dans les autres études, les valeurs de  $T_{lim}$  sont toujours rapportées de façon explicite, ou peuvent être calculées simplement, par exemple en faisant le rapport entre la distance parcourue et la vitesse de

course (ex: Lacour et al. 1989), mais les valeurs correspondantes de la puissance relative ne le sont pas. Toutefois, les données rapportées permettent de calculer ou d'estimer le % PAM soutenu pour les valeurs de  $T_{lim}$  rapportées ou calculées, ou (et) pour d'autres valeurs de  $T_{lim}$ , qui peuvent être différentes de celles utilisées par les auteurs, mais dans une même étendue de valeurs. Cinq grands types de calcul ont été employée pour cela. Ils sont explicités ci-dessous.

### 3.2. Analyse selon le modèle hyperbolique simple

Quelques auteurs (Gaesser et Wilson 1988, Jenkins et Quigley 1990, 1991 et 1993, Lechevalier et al. 1989, Mclellan et Cheung 1992, Moritani et al. 1981) ont utilisé le modèle hyperbolique simple de la performance pour décrire la relation entre  $T_{lim}$  et la puissance de travail soutenue sur ergocycle ou la vitesse de course sur le terrain, soit:

$$P = a + (b/T_{lim})$$

qui est équivalente à l'équation suivante, en multipliant les deux membres par  $T_{lim}$ :

$$P \times T_{lim} = a \times T_{lim} + b$$

ou:

$$v = a + (b/T_{lim})$$

qui est équivalente à

$$v \times T_{lim} = a \times T_{lim} + b$$

Dans toutes ces études les valeurs des coefficients a et b calculées à partir

d'observations expérimentales effectuées sur une étendue de  $T_{lim}$  donnée ( $T_{lim_{min}}-T_{lim_{max}}$ ), sont rapportées. D'autre part la puissance ou la vitesse maximale aérobie ou, directement, la valeur du  $VO_{2max}$  est aussi indiquée. Pour ces études nous avons utilisé, selon le cas et si cela était nécessaire, une valeur approximative moyenne du rendement mécanique externe brut sur ergocycle (20 %) ou une relation entre la vitesse de course ( $v$ , en  $km.h^{-1}$ ) et le  $VO_2$  (en  $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) (Léger et Mercier 1983)

$$VO_2 = 2,209 + 3,163 v + 0,000525542 v^3$$

afin de calculer le  $VO_{2max}$  s'il n'était pas disponible. D'autre part nous avons exprimé la valeur de  $T_{lim}$  en fonction de la puissance ou de la vitesse:

$$P = a + (b / T_{lim})$$

d'où

$$P \times T_{lim} = (a \times T_{lim}) + b$$

$$(P \times T_{lim}) - (a \times T_{lim}) = b$$

$$T_{lim} (P - a) = b \quad \text{et} \quad T_{lim} = b / (P - a)$$

De la même façon:

$$v = a + (b / T_{lim})$$

d'où

$$v \times T_{lim} = (a \times T_{lim}) + b$$

$$(v \times T_{lim}) - (a \times T_{lim}) = b$$

$$T_{lim} (v - a) = b$$

$$T_{lim} = b / (v - a)$$

Nous avons ensuite fait varier P ou v sur une étendue comparable à celle utilisée dans chaque étude, et nous avons calculé les valeurs de Tlim correspondantes, qui varient approximativement entre Tlimmin et Tlimmax. Après avoir converti les valeurs de P et de v choisies en valeurs correspondantes de VO<sub>2</sub> en utilisant un rendement mécanique externe brut de 20 % sur ergocycle, ou l'équation de Léger et Mercier (1983) ci-dessus, la puissance relative a été estimée comme étant le rapport entre ces valeurs de VO<sub>2</sub> et le VO<sub>2</sub>max. Le tableau 5 présente un exemple d'estimation du % PAM pour différentes valeurs de Tlim dans ce type d'étude, qui a été faite à partir des données de Jenkins et Quigley (1991) obtenues sur ergocycle.

### **3.3. Analyse selon la relation de Lloyd**

Quatre groupes d'auteurs qui ont étudié des coureurs à pied de haut niveau (Conley et al. 1984, Daniels 1974, Lacour et al. 1989, 1990), ont rapporté la vitesse soutenue à certains pourcentages du VO<sub>2</sub>max, notamment à 100 % du VO<sub>2</sub>max (vitesse aérobie maximale ou VAM). Dans ces études nous avons utilisé les performances réalisées par ces coureurs, qui étaient fournis dans les articles consultés (Lacour et al. 1989, 1990) ou qui ont été retrouvées dans les journaux sportifs (Conley et al. 1984, Daniels 1974), pour établir, dans chaque cas, la relation suggérée par Lloyd (1966) entre la distance de course (D) et le temps de course (T):

$$\log T = a + b \log D$$

À l'aide d'itérations successives, effectuées, par exemple, sur un chiffrier, il

Tableau 5: Exemple de calcul de la relation entre le % PAM et Tlim, à partir d'une relation hyperbolique simple (données de Jenkins et Quigley 1991)

Données rapportées par les auteurs

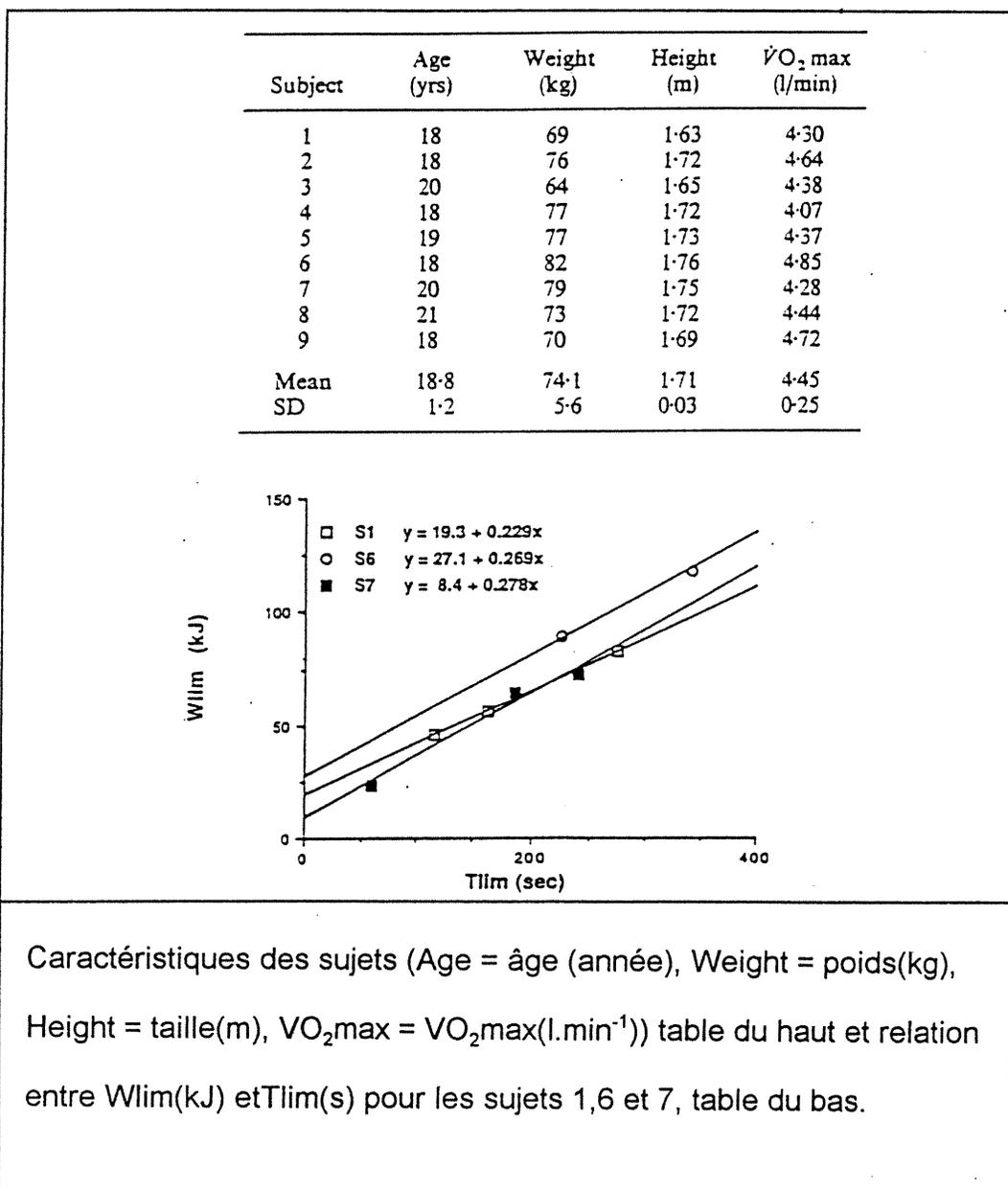


Tableau 5: (suite)

En outre le  $VO_2$ max est de 4,45 L d' $O_2$ /min

$$P = (15,3 / T_{lim}) + 251$$

d'où

$$T_{lim} = 15,3 / (P - 251)$$

En faisant varier P de 252 à 475 W:

Puissance	Tlim (s)	$VO_2$ (3)	% PAM
252	15300	3600	80,90
275	637,5	3928,57	88,28
300	312,24	4285,71	96,31
310	259,32	4428,57	99,52
325	206,75	4642,86	104,33
350	154,54	5000	112,36
375	123,39	5357,14	120,39
400	102,68	5714,28	128,41

Dans ce tableau le  $VO_2$  est estimé en supposant un rendement mécanique externe brut de 20% sur ergocycle. Par exemple pour P = 252 W:

$$252 * 5 = 1260 \text{ W}$$

$$1260 * 60 = 75600 \text{ J/min}$$

$$75,6 \text{ kJ.min}^{-1} / 21 \text{ kJ.L}^{-1} \text{ d}'O_2 = 3,6 \text{ L d}'O_2$$

La puissance relative (% PAM) est le rapport:

$$3,6 / 4,45 = 80,9 \% \text{ PAM}$$

est possible d'utiliser cette relation pour estimer le temps pendant lequel une vitesse donnée peut être maintenue. Nous avons ainsi estimé le temps de course jusqu'à épuisement ( $T_{lim}$ ) que les coureurs étudiés auraient soutenus pour des vitesses correspondant à 100 % PAM. Par exemple, dans l'étude de Lacour et al. (1989) les données sont les suivantes:

$$VAM = 22,2 \text{ km.h}^{-1} (6,17 \text{ m.s}^{-1})$$

$$\text{vitesse pour une course de 1500 m} = 23,4 \text{ km.h}^{-1}$$

$$\text{soit } 6,5 \text{ m.s}^{-1} \text{ pour un } T_{lim} \text{ de } 230,77 \text{ s;}$$

$$\text{vitesse pour une course de 3000 m} = 21,6 \text{ km.h}^{-1}$$

$$\text{soit } 6,0 \text{ m.s}^{-1} \text{ pour un } T_{lim} \text{ de } 500 \text{ s;}$$

La relation entre la distance et le temps de course  $D$  et  $T_{lim}$  est:

$$\log T_{lim} = -1.179678 + 1.115477 \log D$$

Par itérations successives on trouve que pour  $D = 2355 \text{ m}$ ,  $T_{lim} = 381,68 \text{ s}$ , ce qui correspond à une vitesse égale à la VAM:

$$2355 / 381,68 = 6,17 \text{ m.s}^{-1}$$

Ceci indique que la valeur de  $T_{lim}$  pour une puissance relative de 100 % PAM vaut 381,68 s soit 6 min 22 s.

D'autre part, le % PAM maintenu par les coureurs sur les diverses distances et temps de course pour lesquels des performances sont disponibles, peuvent être calculés en estimant d'une part le  $VO_2$  à la VAM et aux vitesses de courses correspondant aux performances disponibles en utilisant l'équation de Léger et Mercier (1983) et en effectuant le rapport entre ces estimations du coût énergétique aérobie de la course et du

VO<sub>2</sub>max. Par exemple dans l'étude de Lacour et al. (1989) la VAM est de 22,2 km.h<sup>-1</sup>, tandis que la vitesse de course sur le 1500 m est de 23,4 km.h<sup>-1</sup>.

Ces vitesses correspondent , respectivement à:

$$2,209 + 3,163 \times 22,2 + 0,000525542 \times 22,2^3 = 78,2 \text{ mL d'O}_2.\text{kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$$

$$2,209 + 3,163 \times 23,4 + 0,000525542 \times 23,4^3 = 83,0 \text{ mL d'O}_2.\text{kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$$

La puissance relative soutenue sur le 1500 m couru en 3,84 min (Tlim) est donc de:  $(83/78,2) \times 100 = 106 \%$  PAM.

### 3.4. Cas particuliers

Dans l'étude de Billat et al. (1995) les données rapportées sont des vitesses de course maintenues pendant des durées d'exercice données jusqu'à épuisement, d'une part, et d'autre part la VAM. Pour ces études nous avons simplement converti les vitesses en VO<sub>2</sub>, en utilisant la relation de Léger et Mercier (1983) et nous avons fait le rapport VO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>max, pour estimer le % PAM soutenu pour chacune des valeurs de Tlim.

Dans l'étude de Gleser et Vogel (1973) la relation entre Tlim et la puissance de travail sur ergocycle (P) est:

$$\log Tlim = -0,0079 ( P/VO_{2max} ) + 4,37$$

Au cours de l'étude de 16 semaines, pendant lesquelles les sujets s'entraînent, le VO<sub>2</sub>max augmente de 3,07 à 4,43 L.min<sup>-1</sup>. Aux semaines 1, 3, 9 et 14, les valeurs du VO<sub>2</sub>max sont indiquées et il est possible de faire varier P, en kgm.min<sup>-1</sup>, sur l'étendue de valeurs utilisées par les auteurs pour calculer les valeurs correspondantes de Tlim, en secondes. Par exemple, à

la 14 ème semaine, alors que le  $VO_{2max}$  est de  $3,43 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , pour une puissance de  $900 \text{ kgm}\cdot\text{min}^{-1}$ :

$$\log T_{lim} = -0,0079 (900 / 3,43) + 4,37 = 2,29$$

$$T_{lim} = 10^{2,29} = 195 \text{ min}$$

D'autre part les auteurs indiquent que le  $VO_2$  moyen est de  $0,233 \text{ L}$  pour  $100 \text{ kgm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Il est donc possible de calculer le  $VO_2$  correspondant à  $900 \text{ kgm}\cdot\text{min}^{-1}$ , qui est de:

$$9 \times 0,233 = 2,097 \text{ L}$$

La puissance relative est donc;

$$\% \text{ PAM} = 2,097 / 3,43 = 61,1 \% \text{ PAM}$$

Dans l'étude de Camus et al. (1988), les auteurs rapportent la relation suivante entre  $T_{lim}$ , en secondes, d'une part, et d'autre part la puissance de travail soutenue,  $P$ , en  $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ , et la puissance aérobie maximale,  $P_{max}$ , qui vaut:

$$T_{lim} = 330,8 \times e^{-0,14 (P - P_{max})}$$

Nous avons fait varier la valeur de  $P$  de  $20$  à  $30 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ , et les valeurs correspondantes de  $T_{lim}$  ont été calculées. La puissance relative a été ensuite calculée comme étant le rapport  $P/20$ . Par exemple, pour  $P = 25 \text{ W}$ :

$$T_{lim} = 330,8 \times e^{-0,14 (25 - 20)}$$

$$T_{lim} = 164 \text{ s soit } 2 \text{ min } 44 \text{ s}$$

Quant à la puissance relative elle vaut:

$$\% \text{ PAM} = (25 / 20) \times 100 = 125 \% \text{ PAM}$$

Dans l'étude de Horvath et Michael (1970) le Tlim (2,7 min) à une puissance supramaximale de travail sur ergocycle (1051 kgm.min<sup>-1</sup>), d'une part, et le VO<sub>2</sub>max (1,93 L.min<sup>-1</sup>), d'autre part sont rapportés. Le VO<sub>2</sub> correspondant à la puissance de travail supramaximale a été estimée en supposant un rendement mécanique externe brut de 20 %:

$$1051 \times 9,81 = 10\,310 \text{ J}$$

$$10\,310 / 0,20 = 51\,550 \text{ J}$$

$$51\,550 / 21 = 2455 \text{ mL O}_2\text{.min}^{-1}$$

La puissance relative a alors été calculée en faisant le rapport avec le VO<sub>2</sub>max mesuré chez les sujets:

$$(2,454 / 1,93) \times 100 = 127 \text{ \% PAM.}$$

Finalement, dans l'étude de Maughan et Leiper (1983) le temps de course au marathon est rapporté (3 h 34 min ou 214 min) et la puissance relative soutenue est indiquée par la formule:

$$\% \text{ VO}_2 \text{ max} = 1,435 v (\text{km.h}^{-1}) + 50,8$$

La vitesse au marathon est calculée:

$$42\,195 / 214 = 197,2 \text{ m/min soit } 11,83 \text{ km.h}^{-1}.$$

La puissance relative est donc:

$$1,435 \times 11,83 + 50,8 = 67,8 \text{ \% PAM}$$

## 4. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

### 4.1. Première et deuxième catégories d'études

Comme cela a été souligné ci-dessus, 53 études ont rapporté la valeur du % PAM qui peut être maintenu pour une valeur donnée et isolée de Tlim (Tableau 1), alors que dans les 19 études résumées au tableau 2, les auteurs disposaient d'au moins deux valeurs du % PAM observées à deux valeurs différentes de Tlim. Toutefois aucun d'entre eux n'a analysé de façon statistique la relation % PAM-Tlim. Ceci tient à ce que les données ont été observées en général sur une étendue limitée de Tlim et donc de % PAM (Figure 1, de 1,33 à 3,22min et de 10,73 à 166,38min et de 78,3 à 79,9% et de 105 à 150% respectivement). Seuls Davies et Thompson (1979), Farrell et al. (1979), Scrimgeour et al. (1986), rapportent des données qui s'étendent sur une étendue élevée de Tlim (15,82 à 188,76 min, 37,1 à 176,5 min, et 10,73 à 166,38 min respectivement). Dans ces conditions la relation entre les deux variables même si elle peut être calculée de façon statistique (ou algébrique lorsque 2 ou 3 points seulement sont disponibles) ne revêt qu'une signification fonctionnelle limitée. Comme le montre le tableau 6, il est toujours possible de décrire la relation Tlim-% PAM de façon satisfaisante: le coefficient de corrélation étant supérieur à 0,9 dans tous les cas sauf deux (bien entendu il est égal à 1,0 lorsque deux points seulement sont disponibles). Toutefois, pour un même modèle statistique utilisé, le second coefficient des équations, qui reflète la réduction progressive du % PAM lorsque Tlim augmente, varie considérablement et

Tableau 6: Relations entre le % PAM et le Tlim calculées selon divers modèles de données à partir des données rapportées par divers auteurs (y = % PAM; x = Tlim).

Auteurs	Ecart (min)	Modèle	Corrélation
Allen et al. 1985	33,0 - 41,70	$y = 119,94034 - 0,84256 * (x)$	$r = 0,732$
Costill et Winrow 1970	149,12 - 216,87	$y = 90,90704 - 0,03799 * (x)$	$r = 0,997$
di Prampero et al. 1989	103,40 - 188,90	$y = 90,97485 - 0,09357 * (x)$	(1)
Lacour et al. 1990	9,45 - 35,67	$y = 103,71224 - 0,39283 * (x)$	(1)
Maron et al. 1976	156,57 - 159,47	$y = 166,28345 - 0,55172 * (x)$	(1)
Ramsbottom et al. 1992	18,77 - 21,80	$y = 119,59835 - 1,35314 * (x)$	(1)
Wells et al. 1981	178,75 - 192,67	$y = 160,23154 - 0,43822 * (x)$	(1)
Billat et al.	2,45 - 7,02	$y = 138,17016 - 46,62571 * \log (x)$	$r = 0,995$
Billat et al. 1995	2,95 - 17,67	$y = 114,11860 - 19,32055 * \log (x)$	$r = 0,999$
Farrell et al. 1979	10,73 - 166,38	$y = 110,38540 - 16,24779 * \log (x)$	$r = 0,996$
Péronnet et al.	7,60 - 12,40	$y = 143,26566 - 48,75442 * \log(x)$	$r = 0,986$
Vandewalle et al. 1989	1,33 - 3,22	$y = 161,64353 - 114,74424 * \log (x)$	$r = 0,992$

(1) deux points seulement

Tableau 6 (suite)

Bosch et al. 1990	151,1 - 178,05	$y = 267,94321 * 10^{-0,00328(x)}$	$r = 0,934$
Davies et Thompson 1979	14,03 - 240,0	$y = 97,01978 * 10^{-0,00045(x)}$	$r = 0,992$
Noakes et al. 1988	205,80 - 240,0	$y = 92,23950 * 10^{-0,00051(x)}$	$r = 0,754$
Mclellan et al. 1985	11,0 - 59,0	$y = 100,24227 * 10^{-0,00235(x)}$	$r = 0,998$
Scimgeour et al. 1986	37,10 - 240,0	$y = 87,59811 * 10^{-0,00040(x)}$	$r = 0,996$

aucune comparaison entre les données des diverses études n'est possible. Les seules exceptions sont les études de Davies et Thompson (1979), Farrell et al. (1979) et Scrimgeour et al. (1986), dans lesquelles l'étendue de Tlim, et donc du % PAM est plus vaste. L'analyse des données de ces études, qui sont très cohérentes entre elles, est résumée à la figure 2. La valeur de Tlim est portée en abscisse et la valeur du % PAM en ordonnée. Un modèle logarithmique permet de très bien décrire les données de chaque étude, les coefficients de corrélation étant élevés dans les trois cas et la dispersion des données expérimentales autour de la courbe étant faible et aléatoire (Figure 2). Le deuxième coefficient de l'équation calculé à partir des données de Farrell et al. (1979) et de Scrimgeour et al. (1986) sont en fait pratiquement identiques. Les sujets étudiés par Davies et Thompson (1979) étaient sensiblement plus endurants et par conséquent, le coefficient calculé est plus bas.

Les 132 données provenant de toutes les études dans lesquels la valeur du % PAM a été mesurée ou estimée pour une ou plusieurs valeurs de Tlim, ont été analysées ensemble. Elles sont présentées à la figure 3 qui montre les % PAM maintenu jusqu'à épuisement en fonction de Tlim, lequel est placé sur une échelle logarithmique pour rendre plus claire la partie gauche de la figure. Afin de décrire les variations du % PAM en fonction de Tlim ces données ont été analysées selon deux modèles mathématiques différents. Le premier est de la forme:

$$\% \text{ PAM} = a + b \log (\log \text{ Tlim}).$$

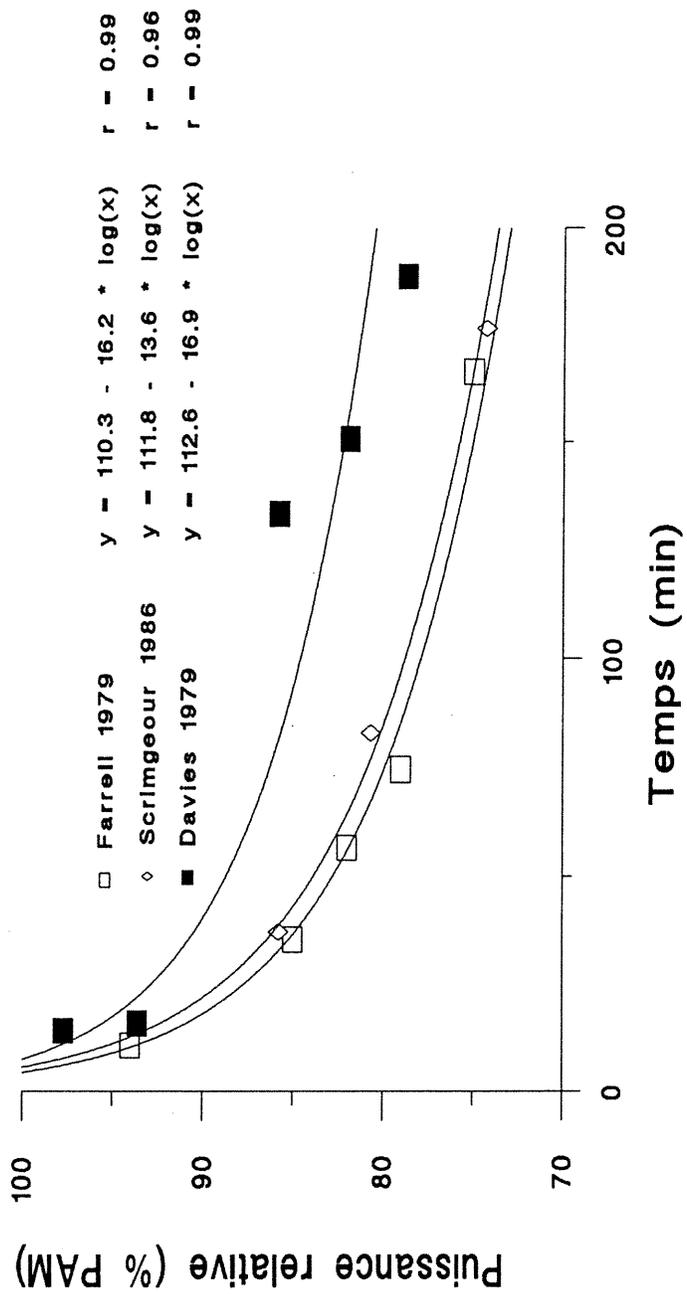
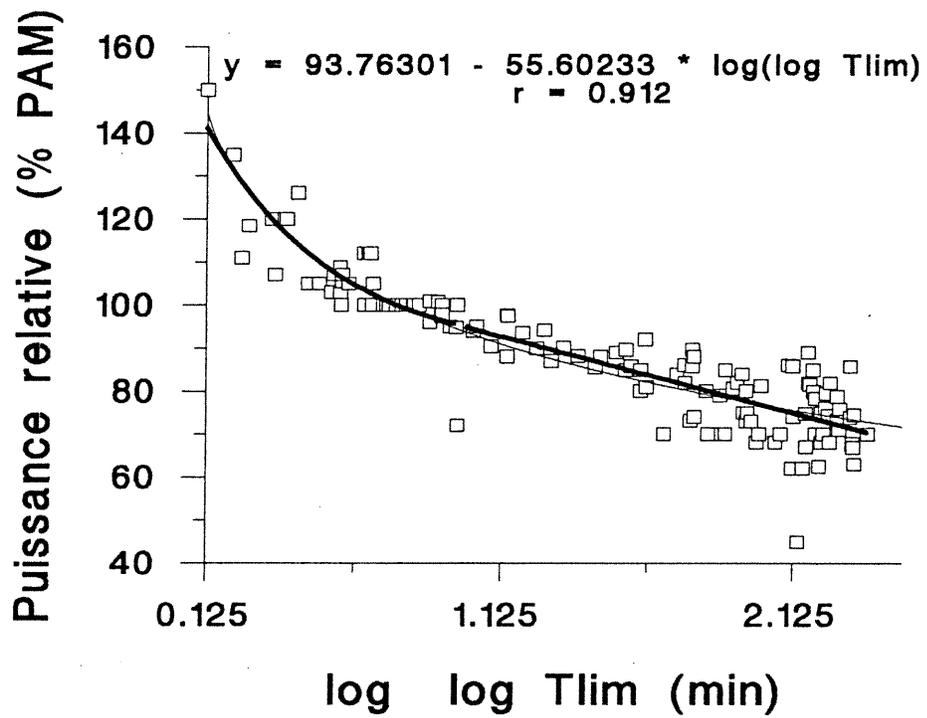


Figure 2: Relation entre le % PAM et le T<sub>lim</sub> calculée à partir des données de trois groupes d'auteurs qui ont rapporté plusieurs couples T<sub>lim</sub>-% PAM sur une large étendue de T<sub>lim</sub> et de % PAM (données du tableau 2).



Les coefficients de cette équation qui ont été calculés par la méthode des moindres carrés sont:

$$\% \text{ PAM} = 93.76 - 55,60 \log (\log T_{\text{lim}}),$$

le coefficient de corrélation associé à cette équation étant élevé et significatif (0,91). Le second est un modèle mathématique qui comprend deux équations différentes. Pour les durées d'exercice supérieures à environ 7 à 10 minutes, la diminution progressive du % PAM en fonction de  $T_{\text{lim}}$  suit de façon satisfaisante une fonction logarithmique (Péronnet et Thibault 1989):

$$\% \text{ PAM} = a + b \log T_{\text{lim}}.$$

Pour des valeurs de  $T_{\text{lim}}$  supérieures à environ 7 à 10 minutes, la réduction du % PAM peut être décrite par une relation hyperbolique de la forme:

$$\% \text{ PAM} = a + (b / T_{\text{lim}})$$

Les coefficients  $a$  et  $b$  de cette équation ont été calculées à partir des données expérimentales observées pour des valeurs de  $T_{\text{lim}}$  inférieurs à 9,2 min en modifiant l'équation ci-dessus de la façon habituelle, soit en multipliant les deux membres par  $T_{\text{lim}}$ :

$$\% \text{ PAM} \times T_{\text{lim}} = (a \times T_{\text{lim}}) + b$$

Cette équation, qui est celle d'une droite, décrit l'augmentation linéaire de la quantité de travail totale réalisée (qui est le produit de la puissance par le temps: % PAM  $\times$   $T_{\text{lim}}$ ) lorsque  $T_{\text{lim}}$  augmente. Les coefficients  $a$  et  $b$  peuvent ainsi être estimés par la méthode des moindres carrés. Dans le cas des données expérimentales résumées à la figure 3 l'équation de la droite

de régression calculée ainsi est:

$$\% \text{ PAM} \times \text{Tlim} = (87,93 \times \text{Tlim}) + 70,84$$

le coefficient de corrélation étant très voisin de l'unité: 0,98. L'équation de l'hyperbole décrivant les variations du % PAM en fonction de Tlim, entre 1,33 min et 9,2 min est donc:

$$\% \text{ PAM} = 87,93 + (70,84 / \text{Tlim})$$

Pour les valeurs de Tlim supérieures à 9,2 min, la réduction du % PAM en fonction de Tlim peut être décrit par l'équation logarithmique suivante:

$$\% \text{ PAM} = 112,84 - 17,90 \times \log \text{Tlim}$$

auquel est associé un coefficient de corrélation significatif, mais beaucoup plus bas, de 0,77. La valeur de Tlim = 9,2 min qui sépare les deux domaines a été déterminée de façon arbitraire par approximations successives de façon à ce que les deux courbes calculées convergent en un même point à la frontière entre les deux domaines.

Comme le montre la figure 3 les deux courbes d'estimations calculées à l'aide des deux modèles sont pratiquement superposées et les indices de dispersion des résidus sont voisins (Tableau 7). Dans la mesure où il est plus facile de manipuler un modèle qui ne comporte qu'une seule équation et que, d'autre part la dispersion des Tlim en deux domaines comporte un certain arbitraire nous avons choisi le premier modèle pour décrire les données. Comme le montre la figure 4 les résidus sont dispersés de façon aléatoire autour de la courbe d'estimation. L'équation de cette courbe permet de calculer pour n'importe quelle valeur de Tlim, la valeur moyenne

Tableau 7: Équations et résidus des modèles décrivant la relation entre le % PAM et le Tlim selon les données des tableaux 1 et 2

	modèle log-log	modèle hyperbolique/logarithmique	
	de 1,3 à 240 min % PAM = $93,6 - 55,60 \log(\log T_{lim})$ $r = 0,91$	de 1,3 à 9,2 min % PAM = $87,93 + (70,84 / T_{lim})$ $r = 0,98$	de 9,2 à 240 min % PAM = $112,84 - 17,90 \times \log T_{lim}$ $r = 0,77$
somme	0,13		-6,45
moyenne	$9 \times 10^{-4}$		-0,047
écart type	6,7		6,7

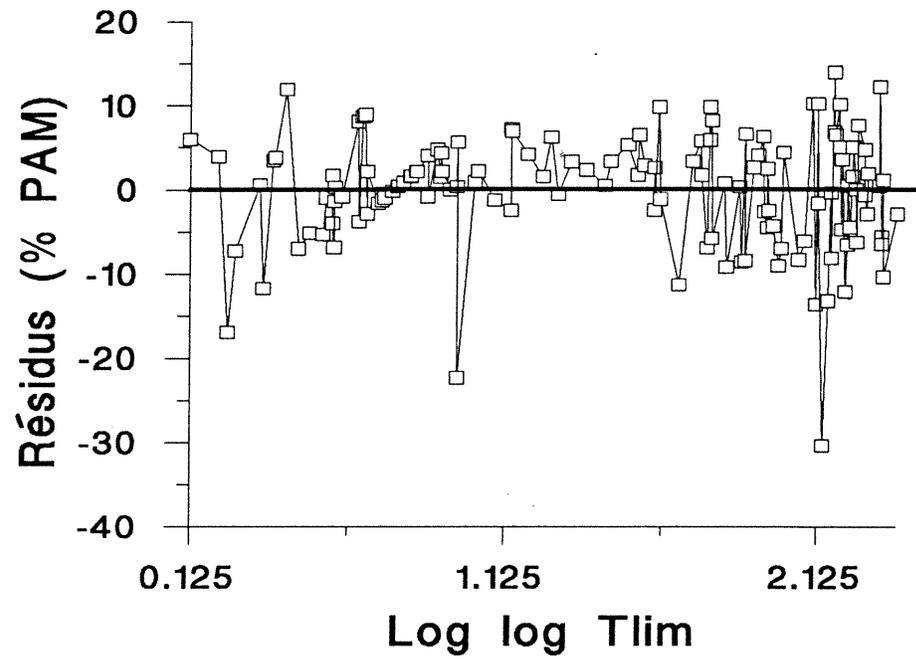


Figure 4: Dispersion des résidus autour de la relation entre le % PAM mesuré ou estimé et Tlim pour l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM

du % PAM qui peut être maintenue au cours d'un exercice poursuivi jusqu'à épuisement. Ces valeurs du % PAM moyens ont été calculés pour différentes valeurs de  $T_{lim}$  variant de 1,33 à 240 minutes, et sont présentées au tableau 8. La figure 5 montre la relation entre les puissances réelles observées dans les études présentées aux tableaux 1 et 2, et les puissances estimées en utilisant le modèle présenté ci-dessus. La corrélation entre les deux groupes de données ( $r = 0,91$ ) est significative et élevée ce qui indique que le modèle utilisé décrit relativement bien la tendance générale des données analysées. Toutefois, une dispersion importante des données demeure autour de cette la ligne d'identité qui est représentée à la figure 5. Par exemple, pour une puissance observée réelle de 100 % PAM, qui a été utilisée dans plusieurs études, la valeur de  $T_{lim}$  varie de 3,82 à 8,4 et, par conséquent la valeur de la puissance relative qui est estimée par le modèle varie de 113,8 à 93,6 % PAM. D'une façon générale, la dispersion des données expérimentales autour de la ligne d'identité est plus faible pour les % PAM les plus élevés (100 à 140 % PAM). La dispersion est plus importante pour les puissances les plus faibles où de très grosses erreurs d'estimation sont présentes (par exemple 74,7 % PAM estimé pour 45 % PAM observé).

#### **4.2. Troisième catégorie d'études**

Dans les études de la troisième catégorie les auteurs utilisent des observations faites sur une étendue de  $T_{lim}$  variant de 0,1 min à 240 min

Tableau 8: Valeurs du % de la PAM correspondant à diverses valeurs de Tlim choisies entre 1,3 et 240 min, selon l'analyse des données de la littérature (tableaux 1 et 2, et tableau 3)

Temps (min)	Couples % PAM-Tlim	Modèles	Limite supérieure	Moyenne
1,3	146	146	152	146
1,4	140	140	146	140
1,5	136	135	142	136
1,6	132	132	138	132
1,7	129	129	136	129
1,8	127	127	133	127
1,9	125	125	131	125
2	123	123	130	123
2,1	121	121	128	121
2,2	120	120	127	120
2,3	118	118	126	118
2,4	117	117	124	117
2,5	116	116	123	116
2,6	115	115	122	115
2,7	114	114	122	114
2,8	113	113	121	113
2,9	112	113	120	113
3	112	112	119	112
3,1	111	111	119	111
3,2	110	111	118	110
3,3	110	110	117	110
3,4	109	109	117	109
3,5	108	109	116	109
3,6	108	108	116	108
3,7	107	108	115	108
3,8	107	107	115	107
3,9	106	107	114	107
4	106	106	114	106
4,5	104	104	112	104
5	102	103	111	103
5,5	101	101	109	101
6	100	100	108	100
6,5	99	99	107	99
7	98	98	106	98
7,5	97	98	106	97
8	96	97	105	97
8,5	96	96	104	96
9	95	95	104	95
9,5	94	95	103	95
10	94	94	103	94
15	90	91	99	90
20	87	88	97	88
30	84	85	94	85
60	80	81	90	80
90	78	79	87	78
120	76	77	86	77
180	74	75	84	75
240	73	74	83	73

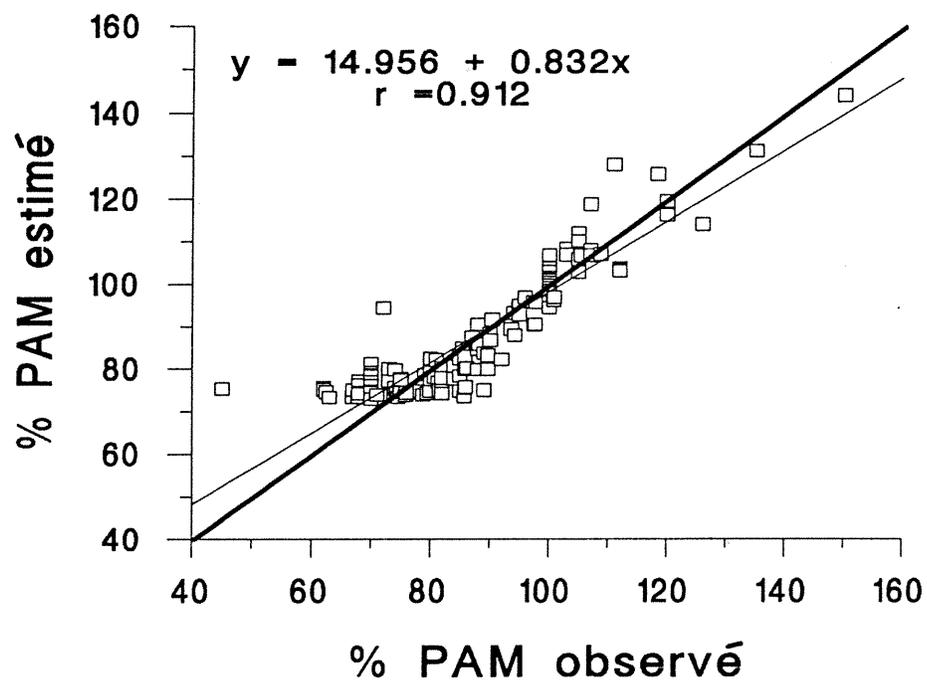


Figure 5: Relation entre le % PAM observé pour l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM, et le % PAM estimé à partir de l'équation calculée à la figure 3.

mais qui est suffisante, dans chaque cas, pour décrire la relation entre % PAM et Tlim. Tous les auteurs sauf Londeree (1986) et Olds et al. (1993) expriment cette relation sous une forme mathématique (Tableau 3) qui permet de calculer la valeur de % PAM pour n'importe quelle valeur de Tlim, moyennant les transformations explicitées à la section 3.2. Londeree (1986), quant à lui ne fournit qu'une expression graphique de la relation entre le % PAM et Tlim. Elle est toutefois accompagnée d'un tableau indiquant pour les diverses valeurs de % PAM les valeurs correspondantes de Tlim (Figure 6). Olds et al. (1993) suggèrent seulement l'allure de la relation entre la puissance soutenue et le temps de travail, sans indiquer de valeurs numériques pour le % de la PAM (Figure 7). Comme on peut le voir à la figure 7 la relation présentée dans cette article de Olds et al. (1993) suggère que la PAM peut être maintenue pour des durées allant de 3,5 min (3:38,2) à 10 min. Entre 10 et 30 min la puissance relative développée diminue de façon linéaire jusqu'au niveau de la puissance correspondant au "seuil anaérobie". Cette puissance relative correspondant au seuil anaérobie peut être maintenue sans réduction pour des durées variant de 30 min à 180 min. Au delà la puissance diminue d'une façon qui est laissée volontairement vague. Cette relation entre le % PAM et Tlim décrit mal la réalité. Pour des efforts aussi court que 3,5 min la puissance développée est supérieure à 100 % de la PAM. Inversement il n'existe pas de puissance relative qui puisse être soutenue indépendamment de Tlim: la puissance relative décroît avec Tlim, contrairement à ce que suggère le plateau présenté par Olds et

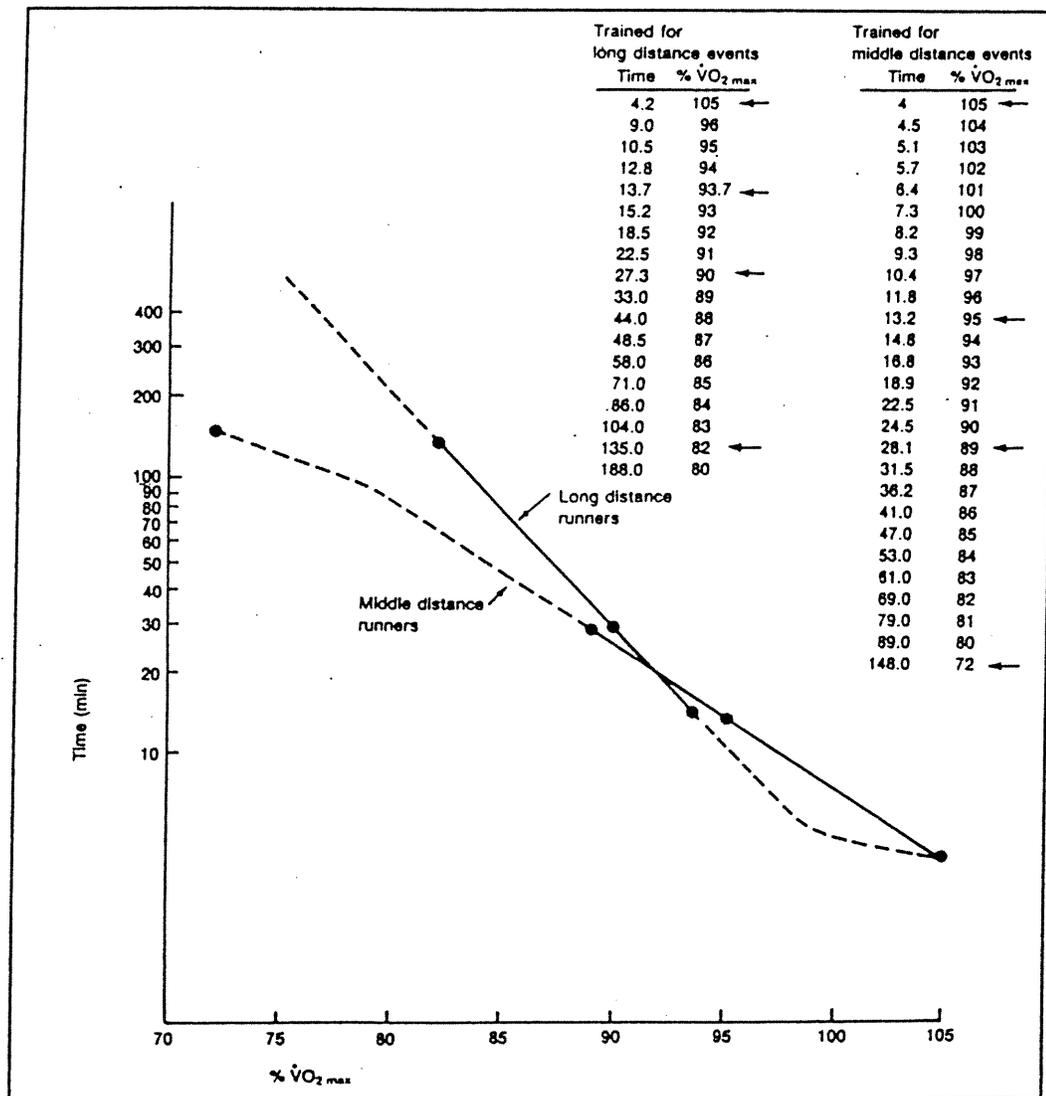


Figure 6: Relation graphique entre le % PAM (%  $\dot{V}O_{2max}$ ) et Tlim (Time, min) selon Londeree (1986) chez des coureurs de fond (Trained for long distance events/Long distance runners) et de demi-fond (Trained for middle distance events/Middle distance runners).

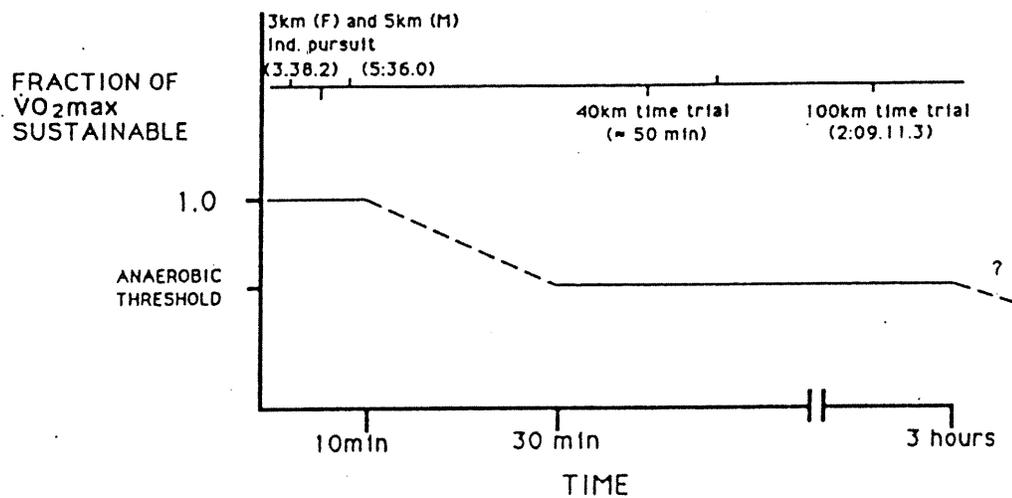


Figure 7: Relation graphique entre % PAM (Fraction of  $VO_2\max$  sustainable, fraction de  $VO_2\max$ ) et  $T_{lim}$  (Time, min) selon Olds et al. 1993 chez des cyclistes (Anaerobic threshold = seuil anaérobie; 3 km (F) and 5 km (M) ind. pursuit = poursuite individuelle sur 3 (femmes) et 5 km (hommes); 40 km time trial = 40 km contre la montre; 100 km time trial = 100 km contre la montre).

al. (1993) entre 30 et 180 min (Figure 7).

Comme pour les études de la catégorie 2, l'étendue des valeurs de  $T_{lim}$  et donc du % PAM restent faibles dans la plupart des études de la catégorie 3. C'est le cas, en particulier de la majorité des études dans lesquelles le modèle hyperbolique de la performance a été utilisé (Gaesser et Wilson 1988, Jenkins et Quigley 1990, 1991 et 1993, Lechevalier et al. 1989, Mclellan et Cheung 1992, Moritani et al. 1981) (Figure 8). Ceci tient à ce que ce modèle simpliste de la performance n'est valide que sur une étendue de puissance limitée. Camus et al. (1988) ont également étudié la relation  $T_{lim}$ -%PAM sur une très faible étendue: 1,35 min à 5,5 min et 150 à 100 % PAM, en utilisant une équation dans laquelle le temps de travail est une fonction exponentielle de la puissance. Dans les autres études l'étendue des valeurs de  $T_{lim}$  est plus importante (Figure 8). Comme cela a déjà été souligné, le modèle de Londeree (1986) est seulement un modèle graphique. Les autres auteurs, à l'exception de Péronnet et al. (1989) (voir ci-dessus) proposent un modèle de données, qui ne cherche donc pas à expliquer les déterminants bioénergétique de la performance mais dont le but est seulement de décrire la courbe de performance. Pour cela trois groupes d'auteurs utilisent des modèles de nature exponentielle ou logarithmique (Aunola et al. 1990, Gleser et Vogel 1973, Montmayer et Villaret 1990), seul Léger et al. (1986) utilisent une fonction polynomiale.

Les résultats des études de la catégorie 3 sont résumés à la figure 9. Dans l'ensemble les données sont relativement concordantes,

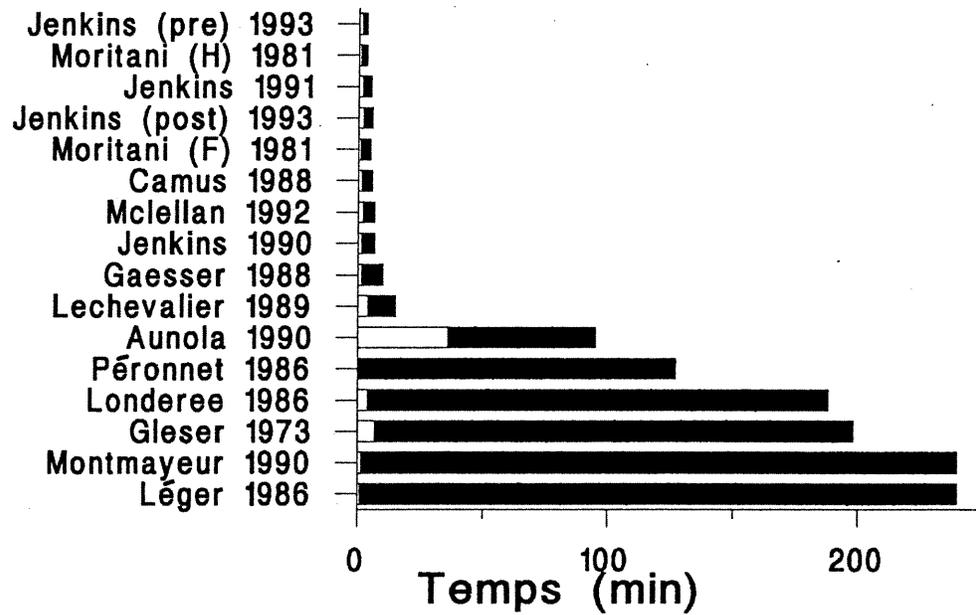


Figure 8: Étendues de Tlim (barre noire) dans les études ayant modélisé la relation % PAM-Tlim (données du tableau 3).

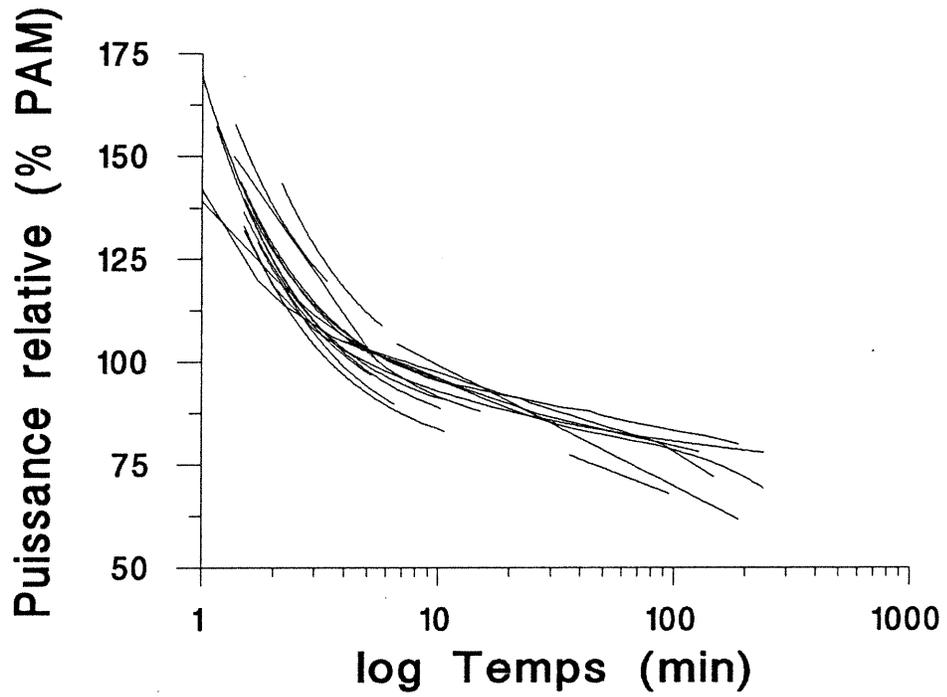


Figure 9: Représentation graphique des relations entre  $T_{lim}$  et le % PAM rapportées dans les études ayant modélisé cette relation (données du tableau 3).

particulièrement pour les puissances de travail les plus élevées et les valeurs les plus basses de Tlim où les courbes se chevauchent. Pour les valeurs plus importantes de Tlim, la plupart des courbes sont aussi bien regroupées, à l'exception de celles correspondant aux données de Aunola et al. (1990) et de Gleser et Vogel (1973). Ces auteurs rapportent, en effet, des valeurs du % PAM comparativement plus faibles que celles rapportées par les autres auteurs (Léger et al. 1986, Londeree 1986, Montmayeur et Villaret 1990, Péronnet et Thibault 1989,) pour des durées de travail supérieures à 30 à 60 min.

La figure 10 montre la superposition des données des études de la troisième catégorie et de la courbe correspondant au modèle  $\log(\log)$  estimé à partir des données des études de la première et deuxième catégorie. Les résultats de ces deux analyses sont concordantes puisque la courbe  $\log(\log)$  estimées à partir des données de la première et de la deuxième catégories se retrouve bien au milieu des données des études de la troisième catégorie. En outre, si l'on analyse les données de la troisième catégorie à l'aide du même modèle  $\log(\log)$  la relation obtenue dont l'équation est:

$$\% \text{ PAM} = 94,37 - 54,47 \times \log (\log \text{ Tlim})$$

avec un coefficient de corrélation significatif et élevé de 0,96, se confond pratiquement avec celle calculée à partir des données de la première et de la seconde catégories réunies:

$$\% \text{ PAM} = 93,76 - 55,60 \log (\log \text{ Tlim})$$

comme le montre la figure 11, ainsi que le tableau 8. Le fait que les relations

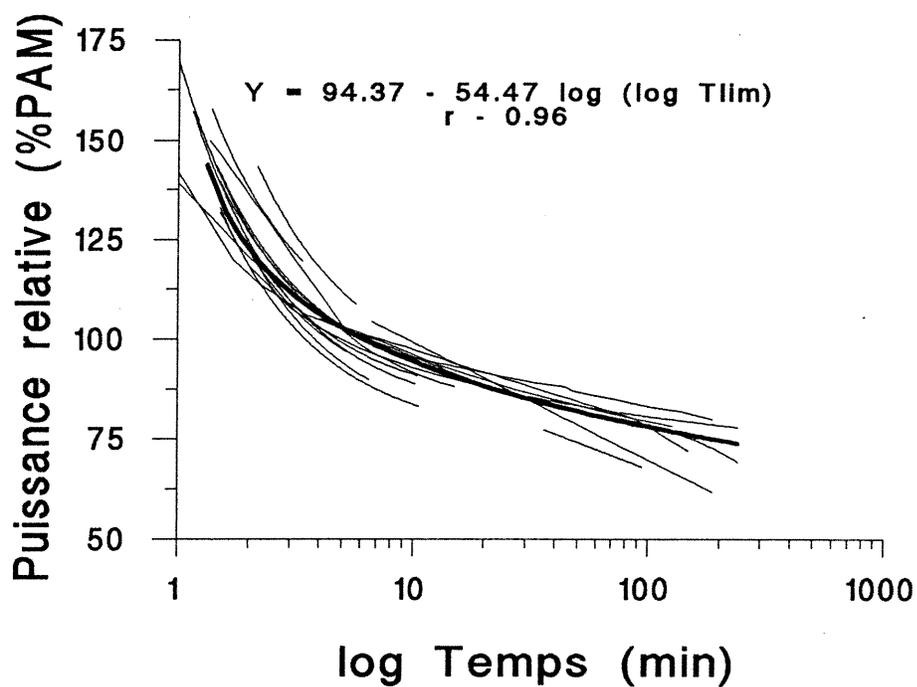


Figure 10: Relation log log calculée entre  $T_{lim}$  et le % PAM à partir des données des études ayant modélisé cette relation (données du tableau 3).

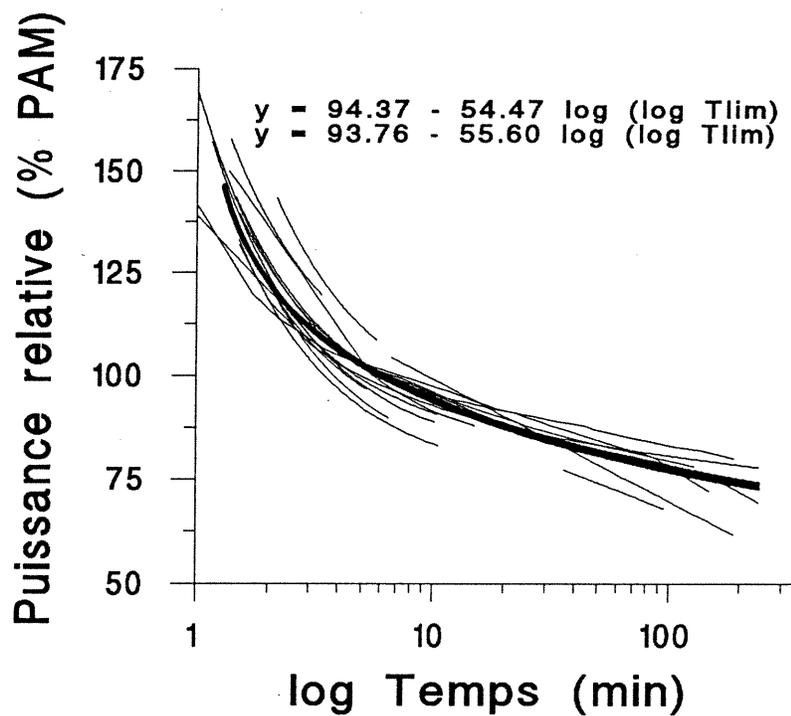


Figure 11: Comparaison des relations log log calculées entre  $T_{lim}$  et le % PAM à partir des données rapportées dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples  $T_{lim}$ -% PAM (données des tableaux 1 et 2) et à partir des données des études ayant modélisé cette relation (données du tableau 3). Les courbes décrivant les deux équations sont pratiquement superposables.

estimées entre Tlim et le % PAM à partir de deux séries importantes de données absolument indépendantes l'une de l'autre, soient ainsi pratiquement confondues suggère fortement que ces relations décrivent de façon convenable la tendance générale de la réduction progressive de la puissance relative de travail lors d'un effort poursuivi jusqu'à épuisement lorsque le temps total de travail augmente de 1,3 à 240 min, chez l'Homme.

## **5. DESCRIPTION DE LA RELATION ENTRE % PAM ET Tlim**

Les données qui viennent d'être analysées et présentées permettent de décrire la relation entre le % PAM et Tlim, c'est à dire 1) de suggérer la relation moyenne existant entre ces deux variables; 2) d'expliquer une partie de la dispersion autour de ces valeurs moyennes; et 3) de suggérer les valeurs les plus élevées de la puissance relative qui semblent pouvoir être soutenues pour une valeur donnée de Tlim.

### **5.1. Relation moyenne entre le % PAM et Tlim**

Comme ceci est expliqué à la section 4.1 le modèle log(log) qui décrit l'allure générale de la relation entre Tlim et le % PAM, permet de calculer la relation moyenne existant entre ces deux variables, sur une grande étendue de valeurs de Tlim. Ces relations sont illustrées à la figure 11, et elles sont détaillées au tableau 8. Comme cela vient d'être souligné ces données sont remarquablement concordantes, et ceci sur l'ensemble de l'étendue des valeurs de Tlim. Il semble donc possible de suggérer quelles

sont les valeurs moyenne du % PAM qui peuvent être soutenus pour différentes valeurs de Tlim. Ceci est une première conclusion de cette analyse des données de la littérature scientifique existant sur cette question, qui est présentée sous forme de figure (Figure 11) et sous forme de tableau chiffré détaillé (Tableau 8) en combinant par une simple moyenne arithmétique les estimations faites à partir des relations log(log) calculées à partir des deux séries de données (résultats des études des premières et deuxième catégories, et résultats des études de la troisième catégorie).

Selon ces calculs:

136% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 1,5 min  
123 % PAM peut être soutenu en moyenne pendant 2,0 min  
112 % PAM peut être soutenu en moyenne pendant 3,0 min  
106 % PAM peut être soutenu en moyenne pendant 4,0 min  
102 % PAM peut être soutenu en moyenne pendant 5,0 min  
100 % PAM peut être soutenu en moyenne pendant 6,0 min  
97% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 7,50 min  
94 % PAM peut être soutenu en moyenne pendant 10 min  
90% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 15 min  
84% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 30 min  
80% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 60 min  
78% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 90 min  
76% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 120 min  
74% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 180 min.

73% PAM peut être soutenu en moyenne pendant 240 min.

Les données ci-dessus, les équations

$$\%PAM = 93,76 - 55,60 \times \log (Tlim) \text{ et}$$

$$\% PAM = 94,37 - 54,47 \times \log (\log Tlim),$$

et les données présentées au tableau 8 et à la figure 11 indiquent les valeurs moyennes du % PAM pour des valeurs de Tlim, ou réciproquement.

Comme le montre les figures 3 et 10 il existe des variations importantes autour de ces valeurs moyennes. Cette variation tient sans doute aux différences de conditions expérimentales dans lesquelles les observations ont été faites, qui diffèrent sensiblement d'une étude à l'autre, ainsi qu'aux caractéristiques particulières des sujets étudiés. Dans les sections ci-dessous certaines des causes de variations possibles de la relation % PAM-Tlim, qui peuvent être analysées à partir des données dont on dispose, sont discutées. D'autres facteurs dont on peut soupçonner qu'ils affectent la relation entre le % PAM et Tlim, comme l'état d'entraînement, ne peuvent malheureusement pas être analysés sur la base des données dont on dispose actuellement.

## **5.2. Sources de variations de la relation % PAM-Tlim**

### **5.2.1. Compétition vs laboratoire**

La figure 12 contraste les résultats études ayant utilisé l'ergocycle, par rapport aux résultats de celles qui ont été conduites à la course sur tapis roulant ou sur le terrain. On constate que pour les valeurs de Tlim les plus

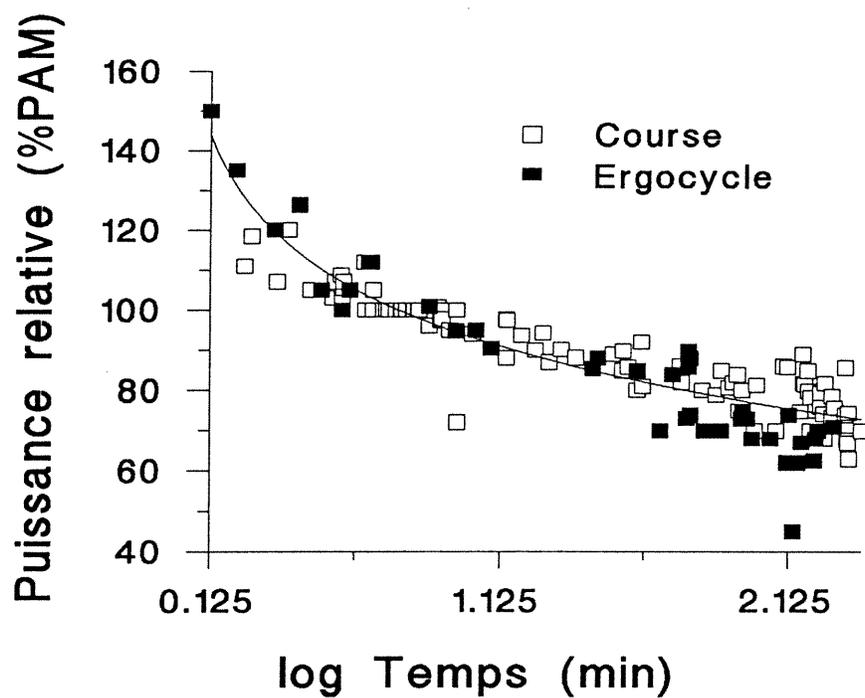


Figure 12: Comparaison des données observées sur ergocycle et en course à pied (sur piste ou tapis roulant) dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2).

hautes et, par conséquent, les valeurs du % PAM les plus basses, qui sont celles où il existe le plus de dispersion autour de la relation moyenne, les études conduites sur ergocycle sont celles où les valeurs du % PAM les plus basses ont été observées pour des valeurs comparables de  $T_{lim}$ . Toutefois, ceci ne semble pas être dû à l'ergomètre lui-même comme le suggèrent les résultats de Camus (1988), qui ont rapporté des valeurs de  $T_{lim}$  semblables à 105 % de la PAM sur ergocycle (4,87 min) et sur tapis roulant (4,05 min). Ceci pourrait plutôt tenir aux conditions dans lesquelles les observations ont été faites. En effet, si l'on contraste d'une part les observations faites en laboratoire, sur ergocycle ou tapis roulant, et celles qui ont été faites en course à pied en compétition simulée, par rapport aux résultats des études conduites en condition réelles de compétition en course à pied, d'autre part, on constate que pour des valeurs comparables de  $T_{lim}$  supérieures à 10 min, les valeurs du % PAM les plus basses et qui s'écartent le plus de la tendance centrale de la distribution, sont observés en laboratoire (Figure 13). Pour les valeurs de  $T_{lim}$  les plus hautes, les valeurs du % PAM observées en compétition réelle sont globalement supérieures à celles observées en laboratoire. Ceci confirme une donnée intuitive ou d'expérience qui suggère que les performances que l'on peut obtenir dans un effort prolongé sont moins bonnes en laboratoire, en compétition simulée ou à l'entraînement, qu'elles ne le sont en compétition. Ceci tient sans doute à plusieurs facteurs comme la préparation spécifique particulière qui précède une compétition réelle, que l'on appelle parfois l'affûtage, la

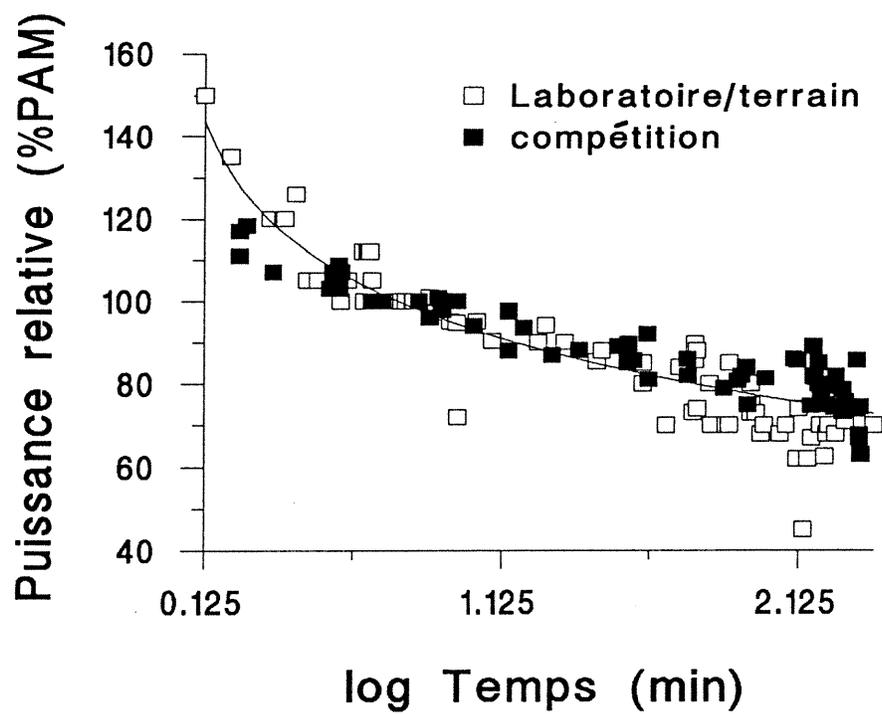


Figure 13: Comparaison des données observées en compétition et lors d'évaluation en laboratoire ou sur le terrain dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2).

motivation, qui est en général plus élevée en compétition réelle que lors d'une compétition simulée ou d'un entraînement, et enfin l'émulation fournie par les adversaires. Le phénomène inverse est observée pour les valeurs de  $T_{lim}$  les plus basses (inférieures à environ 3 min) pour lesquelles les % PAM observés sont systématiquement plus grands en laboratoire que sur le terrain (Figure 13). Ceci peut s'expliquer au moins de deux façons. La première est que, contrairement à ce que l'on vient de discuter pour des efforts prolongés, il est sans doute possible d'obtenir des performances (et donc des % PAM) comparables en laboratoire et sur le terrain pour des efforts plus courts. La seconde est que les quatre points situés au dessous de la courbe, pour des valeurs de  $T_{lim}$  inférieures à 2 min 30 s, sont des valeurs estimées à partir de données de compétition en course à pied (Tableau 9). Pour ces estimations, comme cela est expliqué à la section 3.2, la puissance de travail a été calculée à partir de la vitesse en utilisant l'équation de Léger et Mercier (1983). Ceci peut introduire une sous estimation du % PAM dans la mesure où cette équation perd de sa validité pour les vitesses élevées (plus de 24 à 25 km.h<sup>-1</sup>) qui correspondent à des courses de 800 à 1000 m. Si l'on estime plutôt la puissance développée par le coureur à l'aide de l'équation de di Prampero

$$P_v = BMR + 3,86 v + 0,4 BSA v^3 / BM + 2 v^3 / D$$

qui est plus appropriée pour ce type de vitesses, les % PAM estimés sont plus hauts et se rapprochent des valeurs observées en laboratoire, sur ergocycle (Tableau 9). Dans cette équation,  $P_v$  (W.kg<sup>-1</sup>), BMR (W.kg<sup>-1</sup>),

Tableau 9: Estimations de la puissance relative selon l'équation de Léger et Mercier (1984) et de di Prampero (1984) d'après les données de divers auteurs

	Lacour et al. 1990	Daniels 1974	Conley et al. 1984	Conley et al. 1984
VO <sub>2</sub> max (mL.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	71.3	81	80.1	80.1
PAM (W)	1747	1985	1962	1962
Distance (m)	800	800	800	1000
Temps (min:s)	1:51	1:45	1:45	2:16,2
Vitesse (m.s <sup>-1</sup> )	7,2	7,62	7,62	7,34
VO <sub>2</sub> (1) (mL.kg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	84,4	94.8	88.9	85.7
% PAM	118,4	117	111	107
P (W) (2)	2363	2663	2663	2407
% PAM	135	134	135	123

(1) Selon Léger et Mercier (1984)

(2) Selon di Prampero (1984): les calculs ont été faits en estimant la masse corporelle à 70 kg et la surface corporelle à 1,8 m<sup>2</sup>

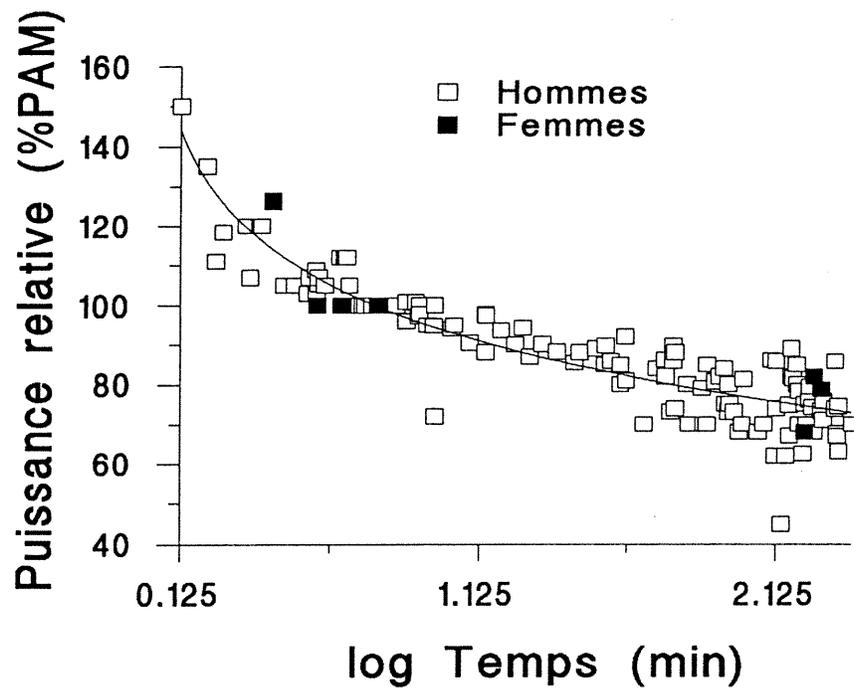
BSA ( $m^2$ ), BM (kg),  $v$  ( $m.s^{-1}$ ) et D (m) signifient respectivement la puissance, le métabolisme de base, la surface corporelle, la masse corporelle, la vitesse et la distance.

### 5.2.2. Hommes vs femmes

La figure 14 contraste les quelques observations faites chez les femmes (4 études) avec les observations faites chez les hommes. Aucune différence systématique n'apparaît entre les sexes, les données observées chez les femmes étant très voisines de la courbe décrivant l'ensemble des données.

### 5.2.3. Niveau du $VO_2max$

La figure 15 contraste les observations faites chez les sujets possédant un  $VO_2max$  plus petit ou plus grand respectivement que  $60 \text{ mL}O_2.kg^{-1}.min^{-1}$ . Cette valeur a été choisie car elle permet de séparer les études en deux groupes d'à peu près égale importance numérique. Pour les puissances relatives supérieures à 100 % de la PAM, toutes les études, sauf une, ont été conduites sur des sujets dont le  $VO_2max$  est supérieur à  $60 \text{ mL}.kg^{-1}.min^{-1}$ . Il est donc impossible d'établir de comparaisons. Par contre, pour les puissances relatives inférieures à 100 % de la PAM, on trouve tout aussi bien des sujets ayant un  $VO_2max$  haut que des sujets ayant un  $VO_2max$  bas parmi les études ayant rapporté des puissance relatives moyennes ou hautes pour une valeur donnée de  $T_{lim}$ . Par contre, les valeurs basses du % de la PAM ne sont observées que chez des sujets qui



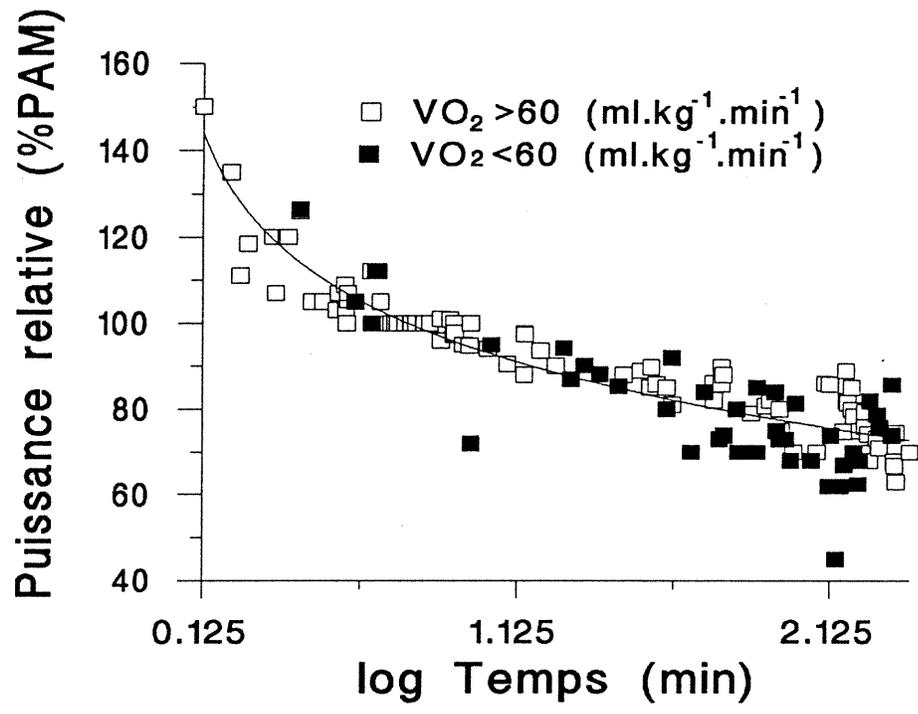


Figure 15: Comparaison des données observées chez des sujets ayant un  $VO_2$ max inférieur et supérieur à 60 mL.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> dans l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM (données des tableaux 1 et 2).

présentent des  $VO_{2max}$  inférieurs à  $60 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ . Cette observation permet de suggérer qu'un  $VO_{2max}$  élevé n'est pas une condition nécessaire pour soutenir une puissance relative élevée pour une valeur de  $Tlim$  donnée. Par contre, en moyenne, les sujets qui présentent un  $VO_{2max}$  plus élevé tendent à soutenir des % PAM plus élevés de façon plus consistante.

### **5.3. Enveloppe supérieure de la performance**

Cette observation soulignée dans la figure 13 conduit à remarquer que dans des protocoles expérimentaux réalisés en laboratoire, en compétition simulée ou en compétition réelle, et dans lesquels la consigne donnée au sujet est de poursuivre l'exercice aussi longtemps qu'il le peut, le problème pratique reste toujours de s'assurer de sa motivation à travailler jusqu'à la limite de ses ressources et à accomplir ainsi véritablement la performance dont il est physiologiquement capable. Le risque d'erreur systématique est donc toujours du côté de la sous-estimation de la performance. Il n'est jamais du côté de la sur-estimation, puisque, par définition, il est impossible que le sujet réalise une performance supérieure à ses capacités. Ce phénomène intuitivement facile à comprendre est objectivé à la figure 16 qui montre la distribution des écarts des puissances relatives réellement soutenues, aux valeurs moyennes estimées selon la relation du type log (log) à partir des données des études de la première et de la deuxième catégorie. L'histogramme des distributions des fréquences a été établi selon des catégories dont l'étendue est de 2 % PAM. La figure

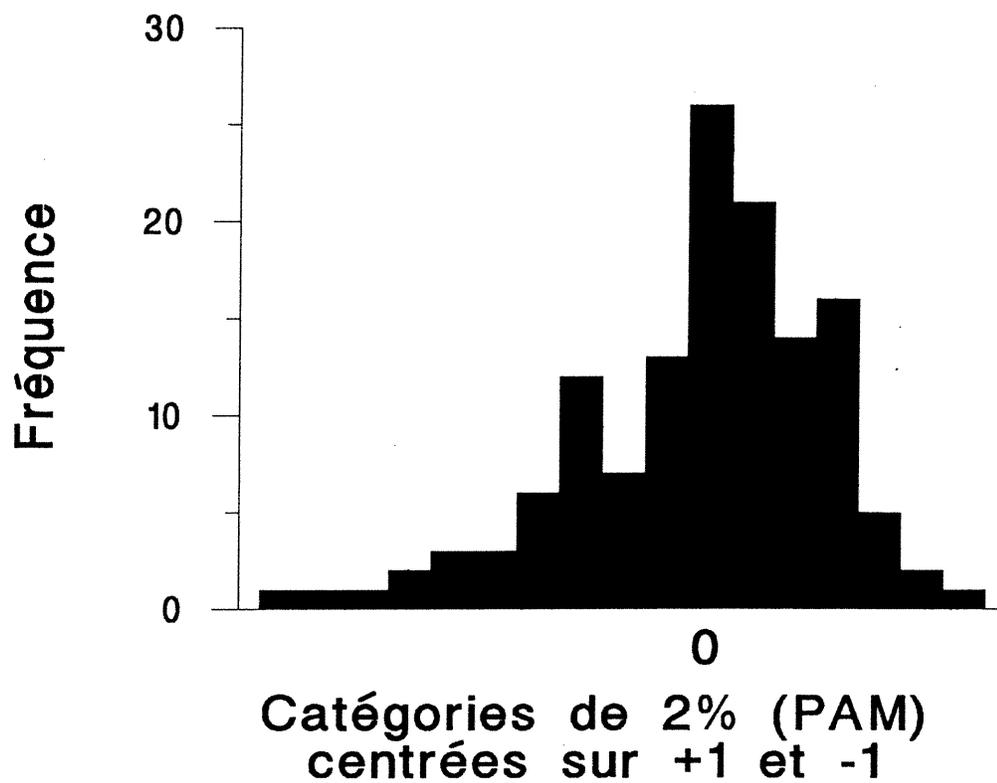


Figure 16: Distribution de fréquence des résidus autour de la relation entre le % PAM mesuré ou estimé et Tlim pour l'ensemble des études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM.

ainsi obtenu montre que les écarts entre le % de la PAM réel et la valeur moyenne de la puissance relative calculée ne suivent pas une distribution symétrique centrée sur la valeur moyenne (écart = 0). Au contraire la distribution s'étire presque deux fois plus vers la gauche (% de la PAM inférieur à la puissance relative moyenne) qu'elle ne le fait vers la droite (% de la PAM supérieur à la puissance relative moyenne). En d'autres termes: on trouve des valeurs de la puissance relative bien inférieures à la valeur moyenne; on en trouve peu qui lui soit très supérieures. Il y a tout lieu de penser que les valeurs correspondant à la partie gauche de l'histogramme de la figure 16 sont dues en partie au moins à une sous estimation des capacités des sujets, alors que les valeurs correspondant à la partie droite les représentent plus fidèlement. Selon cette interprétation de la distribution des données expérimentales, on peut considérer que pour une valeur donnée de Tlim, plus la valeur de % PAM est basse, plus elle est entachée d'erreur, alors que les données les plus hautes, nécessairement, représentent le mieux les % PAM les plus élevées qui peuvent être soutenus. Pour estimer la relation entre Tlim et ces valeurs les plus élevées du % PAM qui peut être soutenu nous avons sélectionné les 17 points le plus éloignées au dessus de la courbe sur la figure 3. L'analyse de ces données selon le modèle log log indique que la relation entre le % PAM et Tlim est :

$$\% \text{ PAM} = 103,01847 - 53,56621 * \log \log \text{ Tlim}$$

avec un coefficient de corrélation de 0,998 (Figure 17). Ce modèle permet

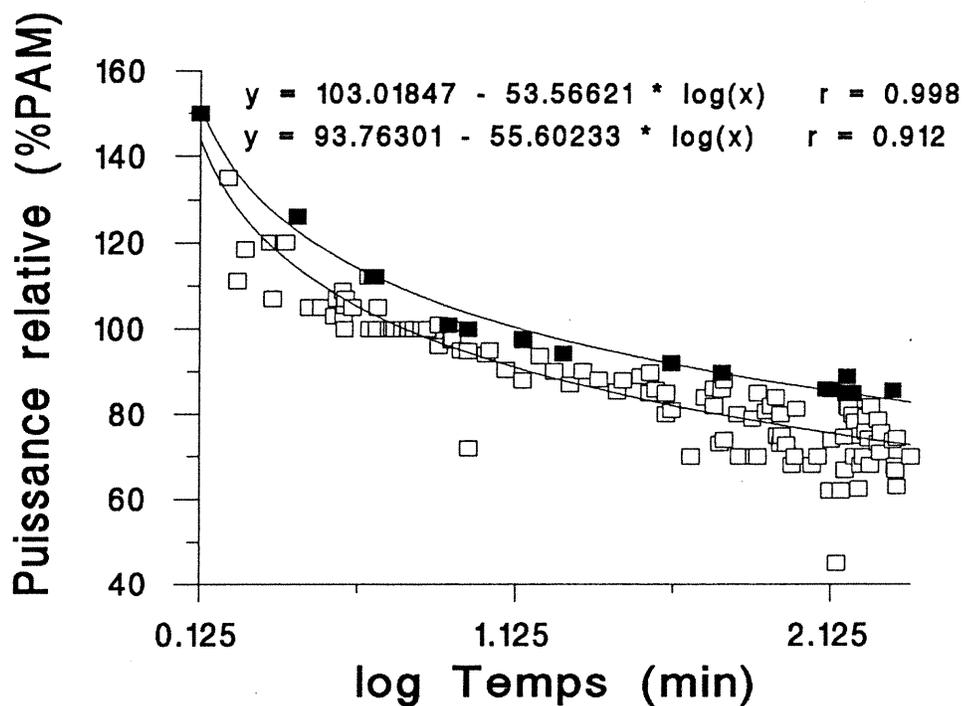


Figure 17: Relation entre le % PAM mesuré ou estimé et Tlim pour les études fournissant un ou plusieurs couples Tlim-% PAM et qui rapportent les valeurs de % PAM les plus élevés pour les Tlim correspondants. Cette courbe peut être considérée comme l'enveloppe supérieure de la performance.

de calculer les durées de travail maximales pendant lesquelles les puissances relatives correspondantes peuvent être soutenues (Tableau 8).

## RAPPORT DE RECHERCHE

### 1. INTRODUCTION

La relation inverse existant entre le % de la PAM et le Tlim au cours de l'exercice localisé (Scherrer et al. 1954; Monod et Scherrer 1965) ou généralisé (voir la revue de littérature) a retenu l'attention de plusieurs groupes d'auteurs. Comme on l'a vu dans la revue de littérature il est possible de décrire de façon assez fiable la relation entre le % de la PAM et le Tlim pour des durées d'exercice variant entre 1,3 et 240 min et des % de la PAM variant, en moyenne de 146 à 73 %. Toutefois, selon les études et les conditions expérimentales une assez grande variation existe autour et surtout au dessous de la courbe décrivant la relation % de la PAM en fonction de Tlim. C'est le cas du Tlim à 100 % de la PAM, qui a été mesuré directement ou peut être calculé à partir des résultats rapportés par une douzaine d'auteurs (Tableau 10 et figure 18). La moyenne pondérée de l'ensemble des valeurs est de 6:16 (min:s) (6:29 min pour les hommes et 5:52 min pour les femmes). Toutefois, les valeurs s'échelonnent de 3,82 min (Lavoie et Mercer 1987) à 8,4 min (Lacour et al. 1990). La valeur de Tlim de 3,82 min a été rapportée par LaVoie et Mercer (1987) chez des femmes travaillant sur ergocycle. La comparaison des données observées chez les femmes et chez les hommes indiquent que ces derniers pourraient travailler un peu plus longtemps à la PAM (Figure 18) mais la différence reste modérée (6,47 contre 5,85 min). La basse valeur de Tlim rapportée par

Tableau 10: Résumé des études de Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM (VO<sub>2</sub>max, en ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>; VAM en m.s<sup>-1</sup>; Tlim en secondes; étendue).

Auteurs	sujets	ergomètres	VO <sub>2</sub> max	VAM	Tlim	min	max
Billat 94	8	tapis roulant	69,6	21,25	673	4,37	9,97
Billat 94	8	tapis roulant	69,6	21,25	6,7	4,92	10,53
Higgs 1973	20	tapis roulant	41,32	-	4,58		
Lavoie 1987	5	ergocycle	61,4	-	3,82	2,21	5
Padilla 1992	14	course	65,3	19,5	7	2,8	10
Billat 1995	14	tapis roulant	75	22,4	5,35	5,35	7,67
Billat 1995	16	tapis roulant	75	22,3	5,42	2,67	8
Billat 1996	15	tapis roulant	77,7	20,9	6,12	2,5	11
Billat 1996	14	tapis roulant	63,2	17,3	7,02	4,17	12
Conley 1984	1	course	80,1	24,0	4,86		
Lacour 1989	17	course	71,6	22,2	6,33		
Lacour 1990	27	course	71,3	-	8,4	5,1	12,6
Adopo 1988	7	ergocycle	69,9	-	7,6	5	10
Hannon 1993	12	tapis roulant	78,4	21,12	5,53	2,67	8,55
Hannon 1993	10	tapis roulant	63,1	17,19	6,1	2,67	8,55
Billat 1994	38	tapis roulant	71,4	21,8	6	2,5	11

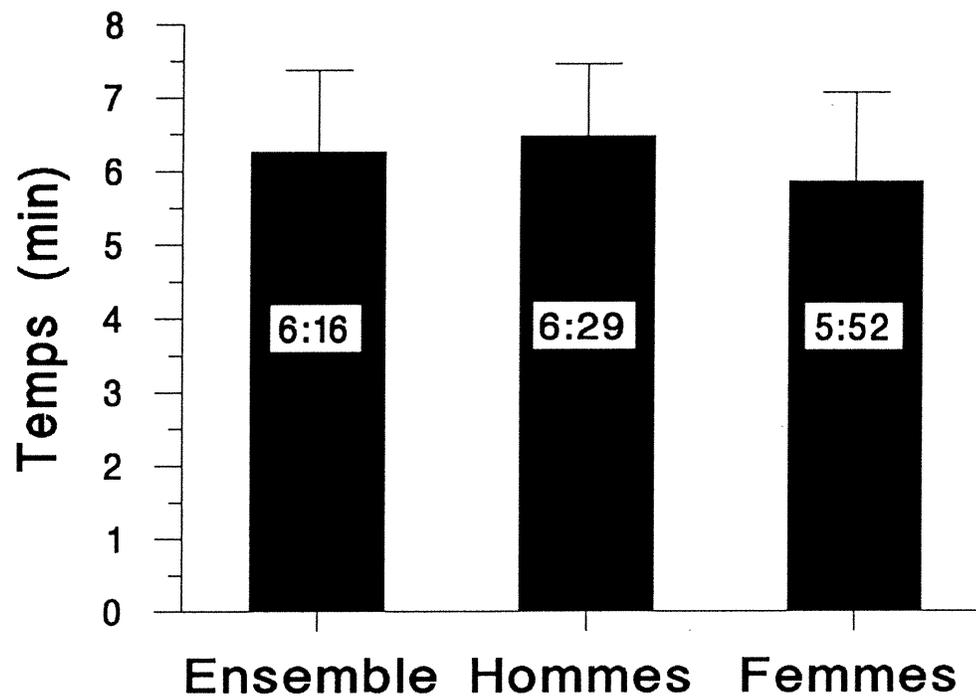


Figure 18: Moyennes ( $\pm$  écarts types) du Tlim à 100 % de la PAM rapportées pour l'ensemble des sujets, pour les hommes et pour les femmes (données du tableau 10).

LaVoie et Mercer (1987) pourrait plutôt être due à ce que les sujets travaillaient sur ergocycle. Il existe peu de données sur le Tlim à 100 % de la PAM sur ergocycle: à l'exception des données de LaVoie et Mercer (1987) seuls Adopo et al. (1988) ont étudié cet ergomètre. La valeur de Tlim à 100 % de la PAM s'établit à 7,60 min. Par contre, à 105 % de la PAM sur ergocycle Vandewalle et al. (1989) rapportent une valeur de Tlim relativement basse: 3,22 min, alors que l'analyse de l'ensemble des données de la littérature suggère qu'à cette puissance le Tlim soit d'environ 4,25 min (voir tableau 8). Camus et al. (1988) ont d'ailleurs montré qu'à 105 % de la PAM, le Tlim était significativement plus court sur ergocycle que sur tapis roulant (4,05 à 4,87 min). Ces auteurs attribuent ce phénomène au fait que les sujets étudiés étaient des coureurs à pied.

Ces observations suggèrent que la valeur de Tlim à 100 % de la PAM pourrait être plus basse sur ergocycle que sur tapis roulant, au moins pour des coureurs à pied. Toutefois, en l'absence de données directes sur cette question, le but de cette étude expérimentale était de mesurer chez des coureurs récréatifs, sur ergocycle et sur tapis roulant, le Tlim à 100 % de la PAM, elle-même mesurée sur chacun des ergomètres.

## **2. MÉTHODES**

### **2.1 Sujets et protocole**

Dix coureurs à pied récréatifs âgés de  $33,1 \pm 5,6$  ans, mesurant  $174,1 \pm 3,6$  cm et pesant  $69,1 \pm 6,9$  kg (moyenne  $\pm$  écart type), ont été les sujets

de nos études (Tableau 11). Ils étaient volontaires et ils ont signé un formulaire de consentement éclairé. Leurs performances sur des distances variant de 800 m au marathon (42 195 m) sont présentées au tableau 12. Lors de la première visite le  $VO_2$ max a été déterminé sur tapis roulant. Lors de la deuxième visite, les sujets ont été soumis à une course sur tapis roulant à une puissance correspondant à 100 % du  $VO_2$ max et la durée maximale de l'exercice réalisé à cette puissance a été mesurée. Lors des troisième et quatrième visites, les mêmes mesures ont été reprises sur ergocycle:  $VO_2$ max sur ergocycle et durée maximale d'un exercice à la puissance correspondant à 100 % du  $VO_2$ max sur ergocycle.

## **2.2 Détermination du $VO_2$ max**

La consommation maximale d'oxygène sur tapis roulant (Quinton Instruments, modèle 24-72) et sur ergocycle (Ergomeca, Sorem) a été mesurée par la méthode du circuit ouvert (Sensormedics, Beckman Instruments) selon les protocoles suivants.

Le protocole de course sur tapis roulant à une pente nulle, était effectué après une période de familiarisation de 5 min à une vitesse de 6 à 10 km/h, un échauffement de 5 à 10 minutes effectué à une vitesse variant de 10 à 12 km/h selon le souhait du sujet, et 5 minutes de repos, assis ou debout, au choix du sujet. Le sujet effectuait alors une série de paliers de courses d'une durée de 5 min à des vitesses croissantes (+1km/h par palier) entrecoupés de périodes de repos, assis ou debout, au choix du sujet, de 5

Tableau 11: Caractéristiques des sujets

Sujets	Âge	Masse (kg)	Taille (cm)
SR	36	71	179
CS	37	66	174
PV	28	71	173
PA	42	55	168
SS	35	75	180
JN	34	64	173
GE	38	80	173
RL	29	67	170
SH	28	68	175
DM	24	75	175
Moyenne	33,1	69,1	174,1
Ecart type	5,6	6,9	3,6

Tableau 12: Performances (h:min:s) en course à pied réalisées par les sujets

Sujets	800 m	5000 m	10 000 m	20 000 m	Marathon
SR	00:02:21	00:18:44	00:38:06	01:21:30	03:15:00
CS	00:02:19	00:17:06	00:35:06	01:14:00	
PV		00:18:48	00:40:00	01:29:00	
PA	00:02:25		00:39:20		03:06:00
SS	00:02:24	00:17:15	00:36:37	01:17:20	02:57:40
JP			00:33:42	01:10:00	02:35:41
GE	00:02:30	00:17:13	00:35:37	01:24:24	03:00:16
RL			00:37:37	01:26:00	03:39:00
SH	00:02:16	00:17:36	00:36:46		03:02:00
DM	00:02:37		00:40:34	01:30:00	03:35:07

min également, et ceci jusqu'à ce que le  $VO_2\text{max}$  soit atteint. Afin de réduire le nombre de paliers nécessaires à l'atteinte du  $VO_2\text{max}$  et donc la durée du protocole et la fatigue accumulée, une estimation de son  $VO_2\text{max}$  était effectuée au préalable à partir de ses performances en courses (Péronnet et Thibault 1989). La vitesse du premier palier était fixée à environ  $3 \text{ km.h}^{-1}$  de moins que la vitesse correspondant au  $VO_2\text{max}$ . Le nombre de paliers effectués par les sujets varie de quatre à sept. Les critères de l'atteinte du  $VO_2\text{max}$  étaient: une fréquence cardiaque voisine de la fréquence cardiaque maximale ( $220 - \text{âge}$ ) ou qui n'augmente plus malgré l'augmentation de la vitesse de course; un quotient d'échange gazeux respiratoires supérieur à 1,0; un  $VO_2$  stable malgré l'augmentation de la vitesse; l'incapacité de terminer le palier de 5 min. La vitesse de déplacement de la courroie du tapis roulant était mesurée à l'aide d'une cellule photo-électrique actionnée par une marque placée sur la courroie.

Le protocole d'exercice utilisé pour déterminer le  $VO_2\text{max}$  sur ergocycle était semblable à celui utilisé sur tapis roulant. Il comprenait une période de familiarisation de 5 min et une période d'échauffement de 5 à 10 min selon le souhait du sujet, suivies de 5 min de repos. Le sujet effectuait ensuite des paliers successifs de 5 min à des puissances croissantes correspondant à 60, 75, 85, et 100 % du  $VO_2\text{max}$  estimé. Les paliers étaient entrecoupées de périodes de repos de 5 min. La fréquence de pédalage, de 60 révolutions par minute imposée par un métronome, était maintenue constante. La première puissance était fixée de façon à correspondre à

environ 60 % de la puissance à laquelle le  $VO_2$ max était attendu, afin de réduire le nombre de paliers et la durée du protocole. Le nombre de paliers effectués par les sujets varient de trois à quatre. Les critères d'atteinte du  $VO_2$ max utilisés étaient les mêmes que pour le protocole de détermination du  $VO_2$ max sur tapis roulant.

Les fréquences cardiaques étaient enregistrées à la fin de chaque palier des protocoles de mesure du  $VO_2$ max sur tapis roulant et sur ergocycle, à l'aide d'un cardio-fréquence-mètre (Sport tester PE 3000).

### **2.3. Vitesse et puissance correspondant au $VO_2$ max**

La vitesse de course correspondant au  $VO_2$ max (vitesse maximale aérobie: VAM) était déterminée pour chaque sujet à partir de la régression linéaire effectuée entre le  $VO_2$  atteint à chaque palier avant le plafonnement du  $VO_2$ max et la vitesse correspondant au palier. Le nombre de couples  $VO_2$ /vitesse utilisé pour la régression varie de quatre à sept selon les sujets. La VAM est la vitesse qui correspond au  $VO_2$ max selon l'équation de régression calculée. Un exemple de détermination de la VAM est présenté à la figure 19.

La puissance sur ergocycle correspondant au  $VO_2$ max (puissance maximale aérobie: PAM) a été calculée de la même façon pour chaque sujet à partir de la régression linéaire entre le  $VO_2$  atteint à chaque palier avant le plafonnement du  $VO_2$ max et la puissance correspondant au palier. Le nombre de couples  $VO_2$ /puissance utilisé pour la régression varie de trois

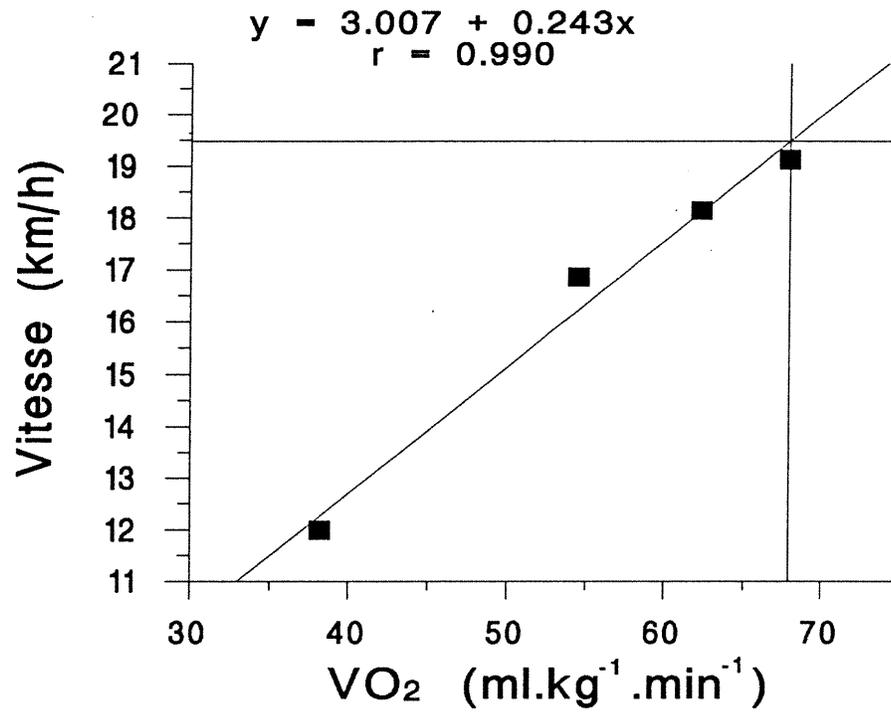


Figure 19: Exemple d'extrapolation de la VAM (voir texte pour explication).

à quatre selon les sujets. La PAM est la puissance qui correspond au  $VO_2\text{max}$  selon l'équation de régression trouvée Figure 20.

#### **2.4 Détermination de la durée maximale à 100% du $VO_2\text{max}$**

Le test sur tapis roulant à la VAM était précédé par une période de réchauffement de 10 min effectuée à environ 70% du  $VO_2\text{max}$ , soit à une vitesse comprise entre 9 et 13 km/h, suivi de 5 min de récupération. Lorsque le test débutait la vitesse du tapis était augmentée aussi rapidement que le permettait l'accélération du tapis, jusqu'à la VAM qui était atteinte en 20 à 30 secondes. Le sujet était alors encouragé verbalement à soutenir cette vitesse aussi longtemps qu'il le pouvait. La durée de l'exercice était chronométrée à partir du moment où la VAM était atteinte jusqu'au moment où le sujet posait les mains sur la barre de sécurité et interrompait sa course. Il est à noter que pendant cet exercice comme pendant la détermination du  $VO_2\text{max}$  sur tapis roulant, le sujet était assuré par un des techniciens à l'aide d'un harnais et d'une corde passée dans une poulie fixée au plafond au dessus du tapis roulant. Le  $VO_2$  était mesuré pendant les quatre premières minutes de l'exercice après quoi le sujet était débarrassé de l'embout buccal et du pince nez et courait librement.

Le test à la PAM sur ergocycle se déroule selon un protocole semblable à celui utilisé sur tapis roulant: 10 min de réchauffement à environ 50 % de la PAM; 5 min de repos; augmentation aussi rapide que possible de la puissance au début du test; encouragement à poursuivre l'effort jusqu'à

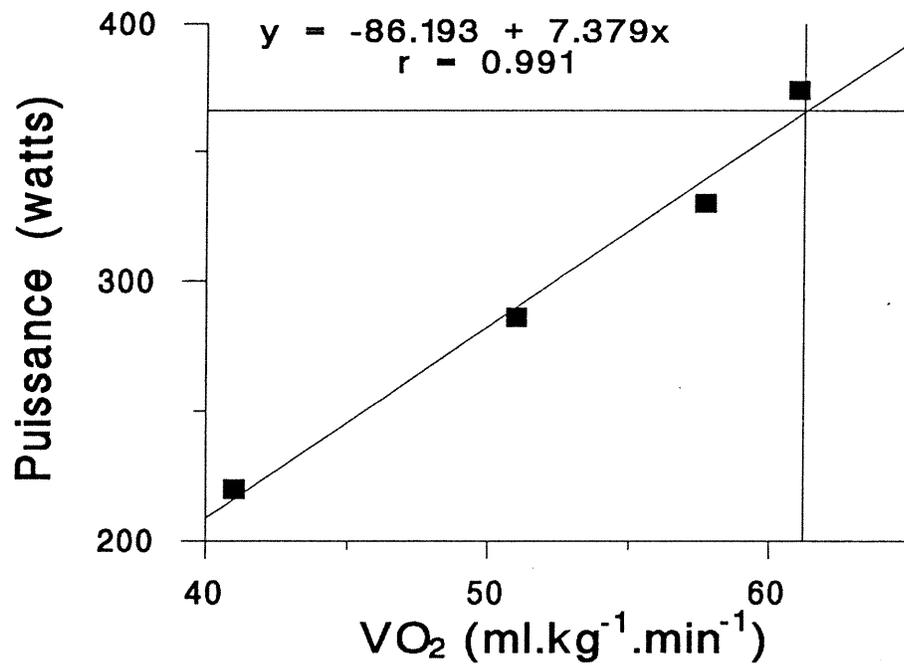


Figure 20: Exemple d'extrapolation de la PAM (voir texte pour explication).

épuisement; chronométrage de la durée de l'effort entre le moment où la PAM est atteint jusqu'à l'arrêt de l'exercice; mesure de la  $VO_2$  pendant les quatre premières minutes de l'épreuve; mesure de la fréquence cardiaque à la fin de chaque palier. La fréquence de pédalage, imposée par un métronome a été maintenue constante à 60 révolutions par minute.

Les fréquences cardiaques étaient enregistrées au cours des deux épreuves d'exercice jusqu'à épuisement sur tapis roulant et sur ergocycle, à l'aide d'un cardio-fréquence-mètre (Sport tester PE 3000).

### **2.5 Analyse des performances en course**

Les performances réalisées en course à pied par les sujets sur des distances variant de 800 m au marathon ont été analysées à l'aide d'un logiciel basé sur le modèle bioénergétique de la course à pied développé par Péronnet et Thibault (1989). Ce modèle permet d'estimer, outre la puissance aérobie maximale en course à pied, en  $ml$  d'oxygène par  $kg \cdot min^{-1}$  équivalent, la capacité anaérobie, en joules par  $kg$ , et un index de l'endurance.

### **2.6 Statistiques**

Les valeurs moyennes des variables sont présentées avec les écarts types. Les comparaisons de moyenne ont été faites en utilisant des test de  $t$  de Student pour données paires, au seuil de probabilité de 5 %. Les corrélations ont été calculées selon la méthode des moindres carrés.

### 3. RÉSULTATS

Les valeurs de  $VO_2$ max obtenus respectivement sur tapis roulant et sur ergocycle lors du test progressif ( $60,4 \pm 4,7$  et  $59,6 \pm 6,0$   $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) (Tableau 13) et lors de l'exercice jusqu'à épuisement ( $61,3 \pm 5,2$  et  $58,2 \pm 5,5$   $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) (Tableau 14), ne sont pas significativement différents, même si l'on observe une tendance à ce que les valeurs obtenues sur ergocycle soient un peu plus basses. Il en est de même pour les valeurs de la  $F_{cmax}$ :  $185 \pm 6$  et  $185 \pm 5$  bpm sur tapis roulant, et  $180 \pm 6$  et  $179 \pm 7$  bpm sur ergocycle, au test progressif et au cours de l'exercice jusqu'à épuisement, respectivement (Tableaux 13 et 14). Une corrélation significative est observée entre le  $VO_2$ max mesuré sur tapis roulant et sur ergocycle ( $r = 0,736$ ) (Figure 21) ainsi qu'entre le  $VO_2$  observé sur tapis roulant et sur ergocycle lors de l'épreuve à 100 % du  $VO_2$ max ( $r = 0,663$ ) (Figure 22).

Le tableau 15 présente les valeurs de la puissance aérobie maximale, de la capacité anaérobie et de l'endurance estimées à partir des performances en course à pied pour les dix sujets. La valeur de la puissance aérobie maximale, exprimée en  $ml.kg^{-1}.min^{-1}$  ( $63,0 \pm 2,7$ ) est non significativement différente de celles calculée sur tapis roulant ou ergocycle ( $60,4 \pm 4,7$  et  $59,6 \pm 6,0$ , respectivement).

Les tableaux 16 et 17 présentent les données utilisées pour évaluer la vitesse ou la puissance correspondant à 100 % du  $VO_2$ max sur tapis

Tableau 13: Fréquence cardiaque (bpm),  $VO_2$ max ( $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) et quotient d'échanges gazeux respiratoires à la fin du test de  $VO_2$  max sur tapis roulant et sur bicyclette ergométrique.

Sujets	Tapis roulant			Bicyclette ergométrique		
	Fc	$VO_2$ max	RER	FC	$VO_2$ max	RER
SR	186	57,5	1,15	179	58,7	1,11
CS	179	64,4	1,16	174	60,9	1,04
PV	184	61,4	1,02	180	62,9	1,01
PA	177	57,0	1,18	176	58,8	1,25
SS	185	67,9	0,98	174	61,2	1,13
JN	197	65,8	1,23	184	72,2	1,05
GE	178	51,8	1,11	172	48,5	1,07
RL	190	60,3	1,09		55,6	1,12
SH		60,2	1,06	189	56,8	1,18
DM	185	57,8	1,00	189	60,2	1,05
Moyenne	185	60,4	1,10	180	59,6	1,10
Ecart type	6	4,7	0,08	6	6	0,07

Tableau 14: Fréquence cardiaque (bpm),  $VO_2$  ( $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ ) et quotient d'échanges gazeux respiratoires lors du test à 100 % du  $VO_{2max}$  sur tapis roulant et sur bicyclette ergométrique.

Sujets	Tapis roulant			Bicyclette ergométrique		
	Fc	$VO_2$	RER	Fc	$VO_2$	RER
SR	182	58,3	1,19	171	59,4	1,20
CS	183	68,6	1,12	177	58,6	1,17
PV	182	59,9	1,09	176	57,5	1,20
PA	185	63,4	1,08	176	62,2	1,24
SS	179	66,4	1,09	178	55,0	1,16
JN	192	68,3	1,18	191	70,1	1,18
GE	182	53,0	1,15	168	49,0	1,19
RL	192	58,2	1,17	182	57,6	1,14
SH	190	59,7	1,16	186	58,2	1,20
DM	186	57,2	1,07	183	54,5	1,24
Moyenne	185	61,3	1,13	179	58,2	1,19
Écart type	5	5,2	0,05	7	5,5	0,03

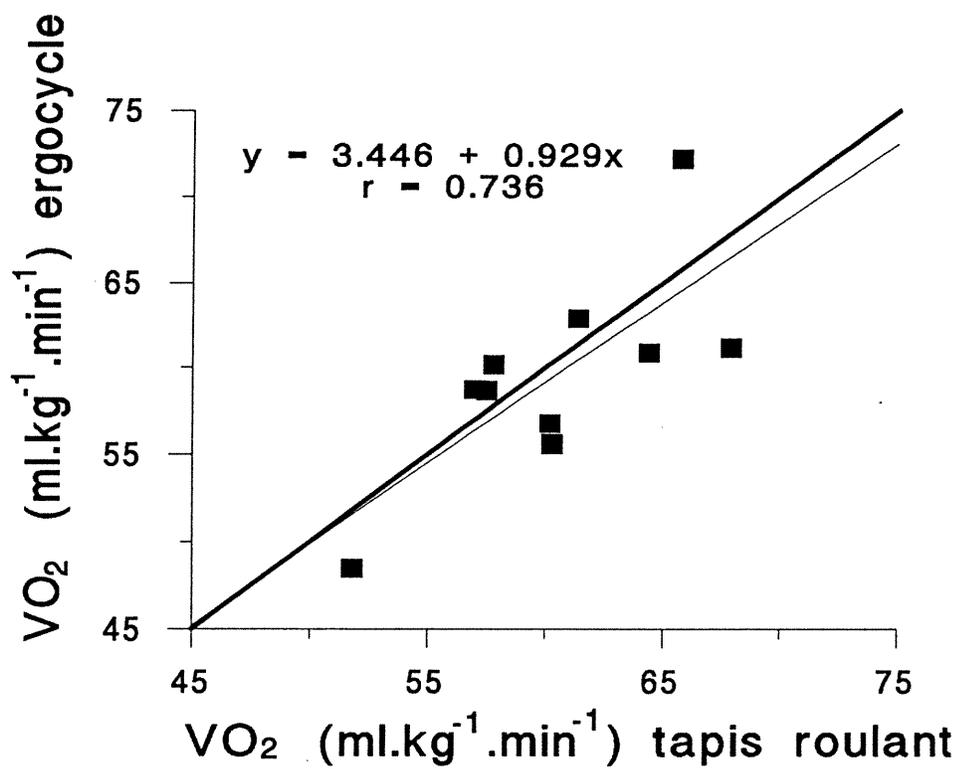


Figure 21: Relation entre le  $VO_{2max}$  mesuré sur tapis roulant et sur ergocycle au cours du test progressif.

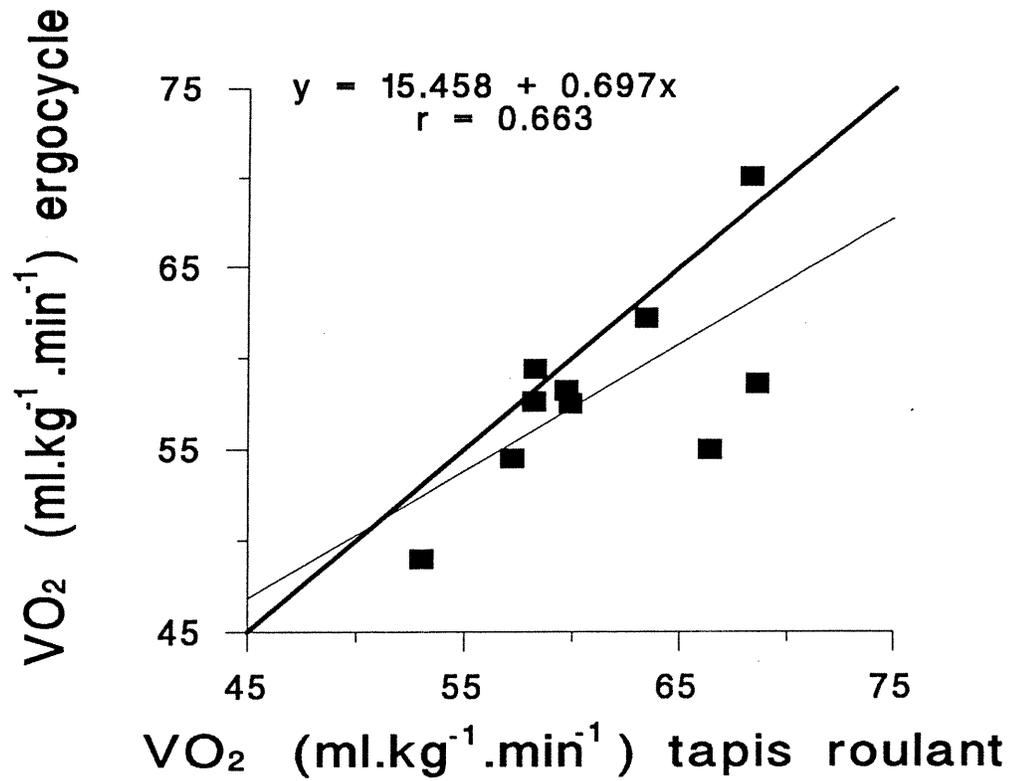


Figure 22: Relation entre le  $VO_{2max}$  mesuré sur tapis roulant et sur ergocycle au cours du test à 100 % de la VAM ou de la PAM jusqu'à épuisement.

Tableau 15: Estimations de la puissance aérobie maximale ( $\text{ml. kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ), de la capacité anaérobie ( $\text{J.kg}^{-1}$ ) et de l'endurance (sans unité) à partir des performances en course à pied.

Sujets	PAM estimée	cap anaérobie	endurance
SR	63,1	1102	8,23
CS	62,7	1177	4,40
PV	59,4	1177	8,45
PA	58,7	1190	6,05
SS	64,5	9750	7,21
JN	67,1	1330	7,14
GE	65,2	7920	7,92
RL	65,4	1296	9,50
SH	62,0	1284	6,83
DM	61,9	7540	10,03
Moyenne	63,0	1108	7,58
Ecart type	2,65	204	1,64

Tableau 16: Calculs de la vitesse (km.h<sup>-1</sup>) correspondant à 100 % du VO<sub>2</sub>max (ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>) sur tapis roulant pour tous les sujets.

Sujets	km/h VO <sub>2</sub>	VAM r	VO <sub>2</sub> max							
SR				11,99 43,5	14,90 50,7	15,88 53,8	17,35 57,5	17,36 0,999		57,5
CS	12,96 42,3	13,93 44,7	14,90 46,6	15,88 51,2	16,85 54,3	18,14 61,2	19,12 64,4	19,21 0,991		64,4
PV			11,99 37,9	14,90 42,3	15,88 53,0	16,85	18,14	18,12 0,948		61,4
PA			11,99 42,0	14,90 47,0	15,88 54,1	16,85 55,6	18,14 57,0	17,60 0,961		57,0
SS			11,99 38,2	14,90 47,0	15,88 54,5	16,85 62,3	18,14 67,9	19,48 0,990		67,9
JN			12,96 50,4	15,88 55,9	19,12 63,5	20,09 65,8	20,13 0,998			65,8
GE			11,99 35,9	14,90 43,9	15,88 47,7	16,85 49,2	18,14 51,8	17,83 0,993		51,8
RL			11,99 40,3	14,90 47,0	15,88 54,2	16,85 55,1	18,14 59,9	18,37 0,980		60,3
SH			11,99 39,4	15,88 50,8	16,85 53,3	18,14 59,0	18,64 60,2	18,73 0,996		60,2
DM			13,93 43,8	14,90 51,2	15,88 51,2	16,20 55,1	16,20 0,984			57,8

Tableau 17: Calculs de la puissance correspondant à 100 % du VO<sub>2</sub>max sur ergocycle (le VO<sub>2</sub> et le VO<sub>2</sub>max sont exprimées en mL.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>) pour tous les sujets.

Sujets	watt VO <sub>2</sub>	PAM r	VO <sub>2</sub> max				
SR	147 34,3	174 39,5	215 47,2	275 0,999	58,7		
CS	175 36,8	246 51,0	316 60,9	310 0,995	60,9		
PV	172 34,8	241 47,0	310 62,9	312 0,997	62,9		
PA	133 34,5	176 43,5	257 58,8	247 0,986	58,8		
SS	220 41,0	286 51,0	374 61,0	366 0,991	61,2		
JN	147 34,0	206 46,0	307 70,0	322 0,995	72,2		
GE	197 36,9	247 43,3	280 48,5	281 0,998	48,5		
RL	157 32,8	220 45,3	267 54,1	274 1,0	55,6		
SH	147 30,4	206 42,0	253 50,7	284 0,999	56,8		
DM	147 27,5	206 38,0	291 60,2	297 0,990	60,2		

roulant et sur ergocycle, ainsi que les VAM et les PAM calculées pour chaque sujets. La VAM moyenne observée a été de  $18,3 \pm 1,1 \text{ km.h}^{-1}$ , tandis que la puissance de travail maximale aérobie moyenne sur ergocycle a été de  $1804 \pm 138 \text{ kgm.min}^{-1}$  ( $297 \pm 33 \text{ watts}$ ). Le coût en oxygène moyen de la foulée à la VAM est de  $0,198 \pm 0.011 \text{ ml d'AU.kg}^{-1}.\text{m}^{-1}$  parcouru (Lacour et al. 1990), alors que le rendement mécanique externe brut sur ergocycle est de  $21,2 \pm 1,4 \%$  (Tableau 18).

Le temps d'exercice jusqu'à épuisement à la VAM a été de  $388 \pm 71 \text{ s}$  ( $6,47 \pm 1,18 \text{ min}$ ) sur tapis roulant (Tableau 19). Le temps d'exercice moyen jusqu'à épuisement à la puissance aérobie maximale sur ergocycle n'a pas été différent ( $386 \pm 52 \text{ s}$  soit  $6,43 \pm 0,87 \text{ min}$ ), par contre la corrélation entre le temps de travail jusqu'à épuisement sur tapis roulant et sur ergocycle n'est pas significativement différente de zéro (Figure 23). De la même façon aucune corrélation significative n'a été observée entre aucun des deux temps de travail jusqu'à épuisement et aucune des autres variables (Tableau 20).

#### 4. DISCUSSION

Le principal résultat de cette étude est que chez un groupe de coureurs à pied récréatifs la durée de travail moyenne jusqu'à épuisement est identique à 100 % de la VAM sur tapis roulant et à 100 % de la PAM sur ergocycle ( $6,47$  contre  $6,43 \text{ min}$ , respectivement). Il existe, toutefois, une assez grande dispersion des données individuelles autour de ces moyennes

Tableau 18: Estimation du cout énergétique (C, en ml.kg<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>) de la course sur tapis roulant et du rendement énergétique brut (%) sur bicyclette ergométrique.

Sujets	Tapis roulant			Bicyclette ergométrique		
	VO <sub>2</sub> max	VAM	C	VO <sub>2</sub> max	PAM	Rendement (%)
SR	57,5	17,36	0,199	58,7	275	18,8
CS	64,4	19,21	0,201	60,9	310	23,0
PV	61,4	18,12	0,203	62,9	312	22,0
PA	57,0	17,60	0,194	58,8	247	22,6
SS	67,9	19,48	0,209	61,2	366	22,8
JN	65,8	20,13	0,196	72,2	322	20,8
GE	51,8	17,83	0,174	48,5	281	20,8
RL	60,3	18,37	0,197	55,6	274	20,4
SH	60,2	18,73	0,193	56,8	284	20,1
DM	57,8	16,20	0,214	60,2	297	20,9
Moyenne	60,4	18,3	0,198	59,6	297	21,2
Ecart type	4,7	1,14	0,011	6	33	1,4

Tableau 19: Durée de l'exercice jusqu'à épuisement, en secondes, à 100% du VO<sub>2</sub>max sur tapis roulant et bicyclette ergométrique.

Sujets	Tapis roulant	Bicyclette ergométrique
SR	424	354
CS	485	363
PV	487	424
PA	393	333
SS	353	473
JN	320	443
GE	447	305
RL	370	380
SH	285	415
DM	319	374
Moyenne	388	386
Ecart type	71,1	51,9

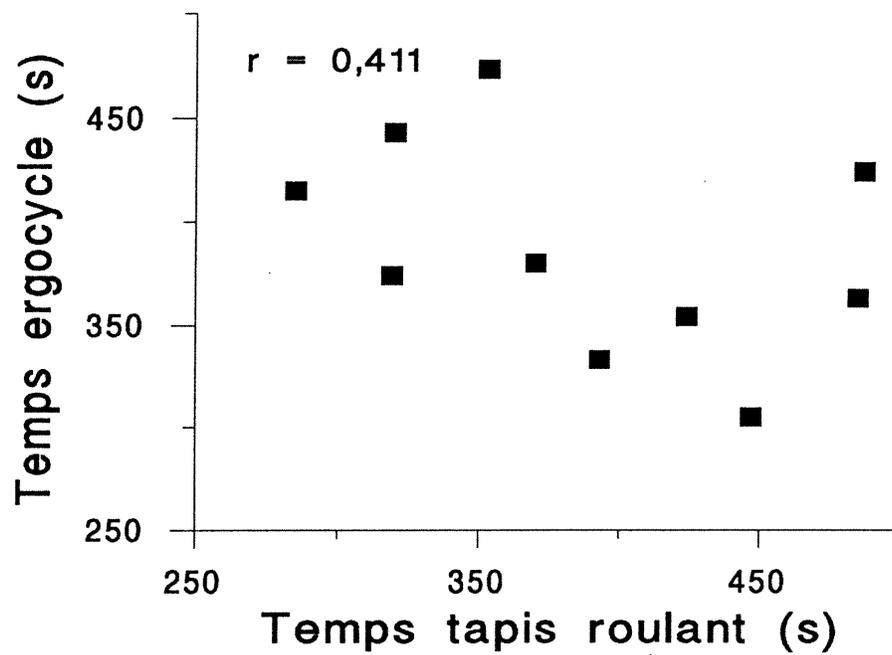


Figure 23: Diagramme de dispersion des valeurs de Tlim à 100 % de la VAM et de la PAM.

Tableau 20: Corrélation entre le temps maintenu à 100% du VO<sub>2</sub>max sur tapis roulant et sur ergocycle et différentes caractéristiques des sujets (r = 0,549 et 0,715 à 5 et 1 % respectivement)

Variables	Tapis roulant	Bicyclette ergométrique
âge	0,393	-0,398
poids	0,085	0,045
taille	-0,096	0,442
VO <sub>2</sub> max progressif tapis roulant	-0,186	0,045
VO <sub>2</sub> max progressif ergocycle	-0,217	0,366
VO <sub>2</sub> max 100% tapis roulant	-0,051	0,538
VO <sub>2</sub> max 100% ergocycle	-0,269	0,355
capacité anaérobie	-0,096	0,334
PAM estimée	-0,273	0,191
économie (C)	-0,479	0,550
endurance	-0,256	0,024
rendement (%)	0,307	0,197

(coefficient de variation de 18,3 et 13,4 % sur tapis roulant et sur ergocycle respectivement). Par contre les sujets qui présentent les valeurs de Tlim les plus élevées sur un des ergomètres ne sont pas ceux qui présentent les valeurs de Tlim les plus élevées sur l'autre. En effet, le coefficient de corrélation calculé entre les deux valeurs de Tlim n'est pas significativement différent de zéro (Figure 23).

#### **4.1. Comparaisons aux données de la littérature**

La valeur observée de Tlim autant sur ergocycle que sur tapis roulant est proche de la moyenne calculée à partir des données des diverses études qui se sont attachées à cette question (Figure 24) laquelle est de 6,48 min chez des sujets masculins. Lorsque les données observées dans notre étude sont incluses dans les calculs la moyenne pondérée de Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM s'établit à 6,28 min pour l'ensemble des données disponibles dans la littérature et à 6,47 min pour les hommes. La figure 24 montre qu'entre des valeurs de Tlim de 5 et 7 min, on retrouve 11 des données compilées (13/18 si l'on inclut ceux de cette étude). En deçà de la limite inférieure de cette étendue, on ne trouve que trois études: la donnée isolée calculée à partir des données rapportées pour Steve Scott par Conley et al. (1984) (Tlim = 4,86 min), et les moyennes observées par LaVoie et Mercer (1987) (Tlim = 3,82 min) et par Higgs et al. (1975) (Tlim = 4,58 min). Il est difficile de commenter la donnée isolée de Steve Scott qui peut tenir aux caractéristiques individuelles particulières de ce coureur de très haut

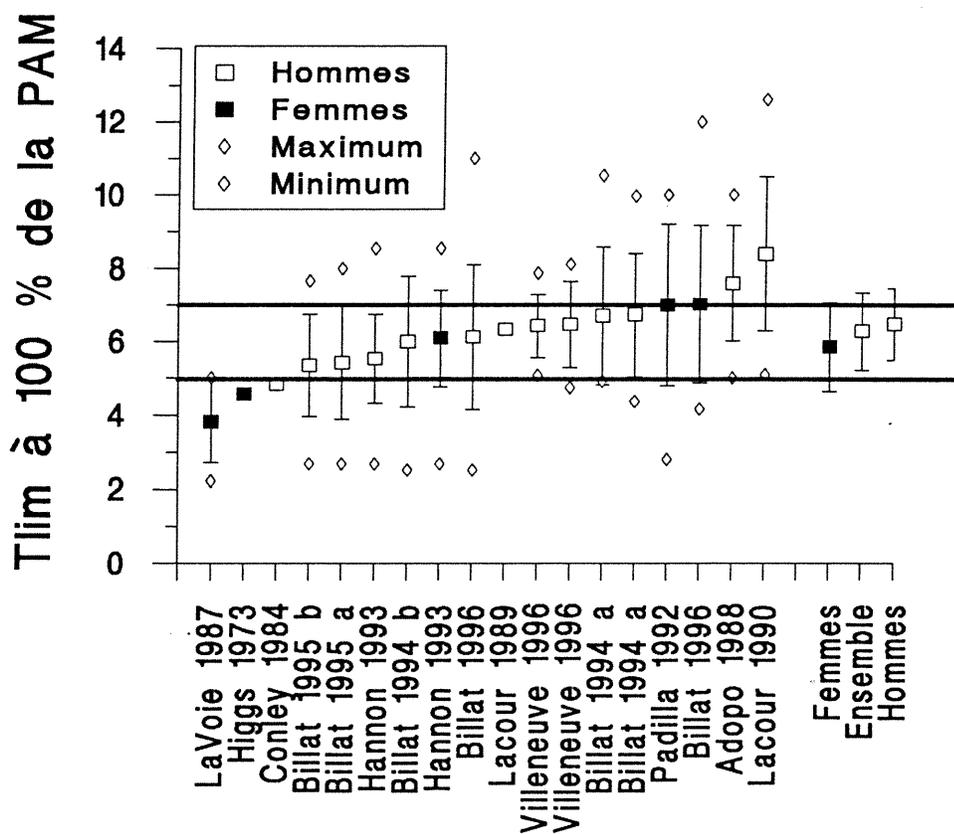


Figure 24: Moyennes (carrés noirs) ( $\pm$  écarts types), et étendues (losanges) des valeurs de Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM rapportées dans les études listées au tableau 10 et dans notre étude (Villeneuve 1996).

niveau et au fait que la valeur de Tlim a été estimée en combinant des données de laboratoire et de terrain. Pour ce qui est données de LaVoie et Mercer (1987) et de Higgs et al. (1975), il est intéressant de noter que les unes et les autres ont été observées chez des sujets qui étaient actifs mais n'étaient pas entraînés à des efforts continus de puissance maximale sur l'ergomètre employé dans ces études. Ceci pourrait en partie expliquer les valeurs relativement faibles de Tlim rapportées. En outre, dans ces deux études des sujets féminins ont été évalués. Il est possible que les femmes soutiennent moins longtemps que les hommes une puissance correspondant à la PAM, bien qu'il soit difficile encore de conclure sur ce point. En effet, il n'existe actuellement que peu de données comparatives directes sur le Tlim à 100 % de la PAM chez les sujets masculins et féminins (Padilla et al. 1992; Billat et al. 1996) et les résultats rapportés sont contradictoires. Padilla et al. (1992) rapportent une valeur de Tlim à 100 % de la VAM sur le terrain, assez nettement plus basse pour des coureurs féminins que des coureurs masculins de haut niveau (7,0 contre 8,4 min). Au contraire, Billat et al. (1996) n'observent pas de différence significative entre des sujets masculins (6,12 min) et féminins (7,02 min).

#### **4.2. Valeurs extrêmes de Tlim à 100 % de la PAM**

Il faut aussi souligner que dans les études de LaVoie et Mercer (1987) et de Higgs et al. (1973), la PAM sur ergocycle (LaVoie et Mercer 1987) ou la VAM sur tapis roulant (Higgs et al. 1973) ont été évaluées au

cours d'exercices en rampe dont les paliers étaient courts (3 min) (Higgs et al. 1973) voire très courts (2 min) (LaVoie et Mercer 1987). Dans ce type de protocole, il n'est pas certain qu'un plateau de  $VO_2$  soit atteint à la fin de chaque palier avant que la puissance du travail ne soit augmentée au palier suivant, particulièrement pour des paliers de 2 min seulement. Ainsi, la relation entre la puissance de travail ou la vitesse de course et le  $VO_2$  correspondant, tend à sous estimer systématiquement le  $VO_2$ . En conséquence, la puissance de travail sur ergocycle ou la vitesse sur tapis roulant correspondant au  $VO_{2max}$  mesuré tend à surestimer systématiquement la PAM et la VAM réelle. Ceci a pour résultat de sous estimer le Tlim à ces puissances, puisque lors de l'épreuve jusqu'à épuisement le sujet est soumis à des puissances supérieures à sa PAM ou sa VAM. Ce biais méthodologique pourrait expliquer aussi les faibles valeurs de Tlim rapportées dans les études de LaVoie et Mercer (1987) et de Higgs (1973). La figure 25 est présentée en support à cette interprétation. Cette figure montre les valeurs de Tlim rapportées par divers auteurs en fonction de la durée des paliers utilisées dans le test progressif destiné à mesurer le  $VO_{2max}$  et donc la PAM ou la VAM. La valeur de Tlim tend, en moyenne à s'élever lorsque la durée des paliers augmente, et qu'en conséquence les estimations faites de la PAM ou de la VAM se rapprochent et coïncident avec leurs valeurs réelles. Ceci peut expliquer les valeurs plus élevées de Tlim calculées à partir des données rapportées par Padilla et al (1992) et Lacour et al. (1990) (7,0 et 8,4 pour les femmes et les hommes

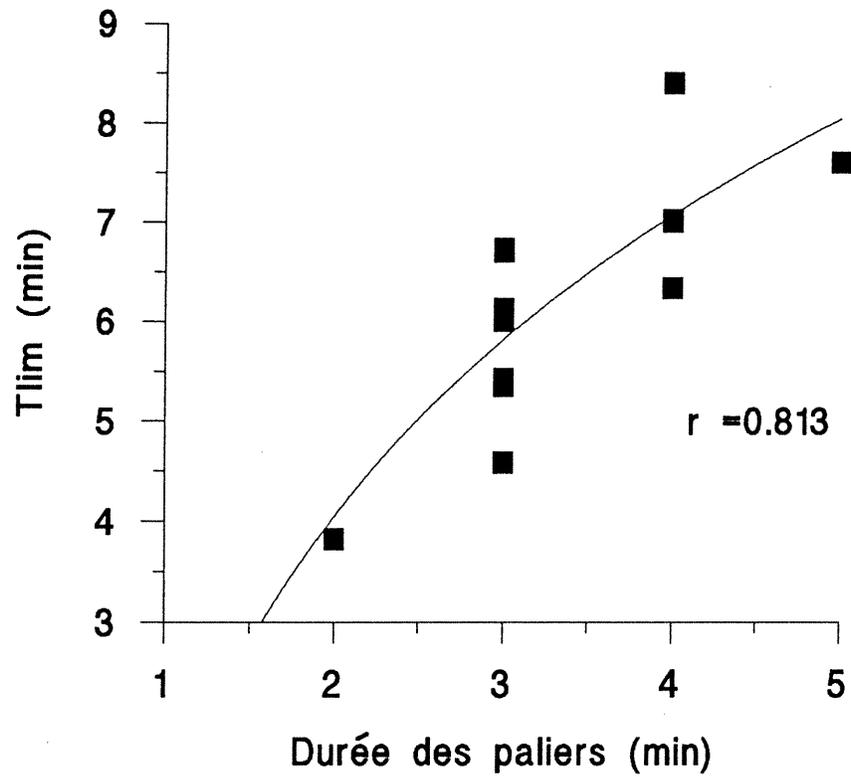


Figure 25: Relation entre Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM et la durée des paliers de l'exercice utilisé pour mesurer le  $VO_2$ max et la PAM ou la VAM (études du tableau 10).

respectivement). Dans ces études, le  $VO_2\text{max}$  était mesuré au cours d'une épreuve discontinue dont les paliers étaient de 4 min. Finalement, il faut souligner que les valeurs de  $T_{lim}$  correspondant à la VAM dans ces études ont été intrapolées à partir des performances réalisées en course à pied en compétition. Il est possible que dans des conditions de compétition les coureurs soutiennent 100 % de leur VAM pour des durées supérieures à celles observées en laboratoire. Ceci expliquerait pour une part que dans les études de Padilla et al. (1992) et de Lacour et al. (1990) les valeurs de  $T_{lim}$  à 100 % de la VAM soient parmi les plus élevées. En fait, si l'on tient compte que la VAM mesurée sur tapis roulant est légèrement inférieure à la VAM mesurée sur piste, en raison de la résistance aérodynamique présente sur la piste mais non sur le tapis roulant, les valeurs de  $T_{lim}$  rapportés par Padilla et al. (1992) et par Lacour et al. (1990) pourraient être même un peu sous estimées. En effet, ces auteurs ont estimés la VAM sur tapis roulant et on intrapolé ou extrapolé la relation entre la vitesse et le temps de course sur diverses distances en compétition, pour trouver le temps de course auquel correspond cette VAM, qui est donc la valeur de  $T_{lim}$ . Par exemple, dans l'étude de Lacour et al. (1990) la VAM a été estimée à  $5,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  qui correspond à une durée de course de 8,4 min et à une distance de 2998,8 m. Toutefois, le coût énergétique de la course sur piste à  $5,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  est supérieur au coût énergétique de la course à la même vitesse sur tapis roulant. Si l'on utilise l'équation de Léger et Mercier (1984) ou l'équation de di Prampero (1984) pour estimer le coût énergétique de la course avec et

sans la composante aérodynamique, une vitesse de 21,4 km.h<sup>-1</sup> (5,95 m.s<sup>-1</sup>) sur tapis roulant correspond à une vitesse d'environ 20,05 km.h<sup>-1</sup>(5,57 m.s<sup>-1</sup>) sur piste:

$$2,209 + (3,163 \times 21,4) = 69,9 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$$

$$2,2,09 + (3,163 \times 20,05) + (0,000525542 \times 20,05^3) = 69,9 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$$

ou

$$1,2 + (3,86 \times 5,95) = 24,2 \text{ W.kg}^{-1}$$

$$1,2 + (3,86 \times 5,57) + (0,4 \times 1,8 \times 5,57^3 \times 70^{-1}) = 24,4 \text{ W.kg}^{-1}$$

Cette vitesse correspond à la vitesse maintenue sur environ 5000 m par des coureurs qui réalisent environ 8 min 24 s au 3000 m (14 min 55 s au 5000 m). Ces estimations suggèrent qu'en compétition les coureurs étudiés par Lacour et al. (1990) pourraient soutenir 100 % de leur VAM pendant presque 15 min. Cette valeur de  $T_{lim}$  est toutefois très supérieure à ce qui est effectivement observé en laboratoire (Figure 24) et est sans doute surestimé. L'explication la plus simple pour expliquer cette surestimation est que, pendant une course de demi-fond en compétition, les athlètes courent en peloton. Ils sont donc, le plus souvent, au moins partiellement protégés contre la résistance aérodynamique. En conséquence, le coût énergétique de leur course est sans doute bien inférieur au coût estimé pour un sujet qui court seul et doit vaincre entièrement la résistance aérodynamique. Il est possible que le coût énergétique de la course sur piste en demi-fond, en peloton, soit finalement assez voisin du coût énergétique mesuré sur tapis roulant.

### 4.3. Variabilité de Tlim à 100 % de la PAM

Dans l'étude présentée ici l'écart type autour de la moyenne de Tlim à 100 % de la VAM et de la PAM est respectivement de 51,9 et 71,1 s sur ergocycle et tapis roulant, respectivement (coefficient de variation de 13,4 et de 18,3 %, respectivement; étendue de 305-473 et 285-487 s, respectivement). Ces indices montrent que la variation interindividuelle des valeurs de Tlim à 100 % de la PAM est importante. En fait, la figure 24 montre que les variations interindividuelles que nous avons observées sont parmi les plus faibles de celles qui ont été rapportées dans la littérature. À l'exception de la valeur estimée pour Steve Scott, de la valeur estimée à partir des données de Lacour et al. (1989) et des données de Higgs et al. (1973) qui sont rapportées sans aucun indice de dispersion, toutes les études indiquent les écarts types et les étendues. Les coefficients de variation calculés à partir de ces données s'étendent de 20,9 à 32,5 %. Les étendues sont également considérables. À l'exception des données de LaVoie et Mercer (1987) les étendues les plus faibles sont de 5 min (c'est à dire que 5 min séparent le sujet qui a soutenu 100 % de la PAM le moins longtemps de celui qui l'a soutenu le plus longtemps), et les plus grandes atteignent 8,5 min. Certains auteurs rapportant des valeurs de Tlim à 100 % de la PAM inférieures à 3 min (LaVoie et Mercer 1987; Billat et al. 1995a et b, 1994 b, 1996; Hanon et Stéphan 1993; Padilla et al. 1992) ou supérieures à 10 min (Billat 1994 a et b, 1996; Padilla et al. 1992; Adopo et al. 1988; Lacour 1990). Prises dans leur ensemble ces données indiquent

qu'il existe une variation interindividuelle importante dans la capacité de soutenir une puissance de travail correspondant à 100 % du  $VO_2$ max.

#### **4.4 Relations entre Tlim à 100 % PAM et d'autres variables**

Dans l'étude présentée ici il n'a pas été possible de mettre en évidence de relations significatives entre cette caractéristique bioénergétique individuelle et d'autres caractéristiques bioénergétiques mesurées en laboratoire ou à partir de l'analyse des performances en course à pied, à la seule exception de la relation trouvée entre le Tlim à 100 % de la PAM sur ergocycle et le  $VO_2$ max sur ergocycle. Par contre, dans leurs études de cette question, Billat et al. (1994 a) ont observé des relations significatives entre Tlim à 100 % de la VAM sur tapis roulant et diverses autres caractéristiques bioénergétiques. Ces relations rapportées par Billat et al. (1994 a et b, 1995 a et b, et 1996 ) sont résumées au tableau 21 Les variables avec lesquelles Tlim à la VAM est parfois reliées sont relatives à la PAM et à la VAM elles-mêmes, aux caractéristiques du métabolisme énergétique anaérobie et à l'économie de la foulée. Pour ce qui est de la

Tableau 21: coefficients de corrélations observés par Billat et al. (1994 a et b, 1995 a et b, 1996) entre  $T_{lim}$  à 100% de la PAM et diverses variables.

Référence	Variabes	r	P
1994 b	$VO_2max$	-0,347	0,05
1995 a	$VO_2max$	-0,502	< 0,05
1995 b	$VO_2max$	-0,20	ns
1994 a	$VO_2max$	0,138	0,744
1996	$VO_2max$	0,602	<0,05
1994 b	VAM	-0,362	0,05
1995 a	VAM	-0,691	< 0,01
1995 b	VAM	-0,54	0,05
1994 a	VAM	0,241	0,565
1996	VAM $\sigma + \text{♀}$	-0,42	< 0,05
1996	VAM $\sigma$	-0,795	< 0,01
1996	DOA (1)	0,690	< 0,02
1995 b	a (2)	0,42	ns
1994 a	LT (3)	0,745	0,03

(1) DOA: déficit en oxygène accumulé

(2) ordonnée à l'origine de la relation  $W_{lim} = a + b T_{lim}$

(3) LT: seuil d'accumulation du lactate

moyens et les valeurs moyennes de  $T_{lim}$  à 100 % de la PAM (Figure 26), Cependant l'observation de la figure 26 montre que l'absence de relation est due à deux données, celles de LaVoie et Mercer (1987) et celle de Higgs et al. (1973) qui sont peut être sous estimées comme on l'a discuté ci-dessus. Si l'on exclut ces valeurs, une relation significative négative apparaît entre le  $VO_2max$  et  $T_{lim}$  à 100 % de la PAM: les sujets présentant les  $VO_2max$  les plus élevés soutiennent moins longtemps la PAM ou la VAM que les sujets dont les  $VO_2max$  sont plus bas. Pour ce qui est de la VAM, les résultats de Billat et al. (1994 a et b, 1995 a et b, et 1996) sont plus concordants. Ainsi, dans cinq des six études effectuées la VAM apparaît reliée négativement avec le  $T_{lim}$  à 100 % de la VAM: les sujets ayant les VAM les plus élevées étant ceux qui ont les  $T_{lim}$  les plus courts et inversement. Lorsque l'on analyse les résultats des 14 études dans lesquelles le  $T_{lim}$  à 100 % de la VAM a été mesuré ou estimé (Conley 1984, Lacour 1989) (Figure 27) on observe également une tendance à ce que le  $T_{lim}$  à 100 % de la VAM soit inversement relié à la VAM ( $r = -0,362$ ,  $p < 0,075$ ). Pour ce qui est des caractéristiques du métabolisme anaérobie, Billat et al. (1995 b, 1996) ont montré que le  $T_{lim}$  à 100 % de la VAM était relié à la dette d'oxygène accumulée, mais non à l'ordonnée à l'origine de la relation  $W_{lim} = a + b T_{lim}$  (Tableau 21). Ces deux variables sont considérées comme des indices de la capacité anaérobie. Ainsi les sujets ayant la plus grande capacité anaérobie pourraient être ceux qui soutiennent 100 % de la VAM le plus longtemps. Enfin, Billat et al. (1994 a) ont aussi rapporté une relation

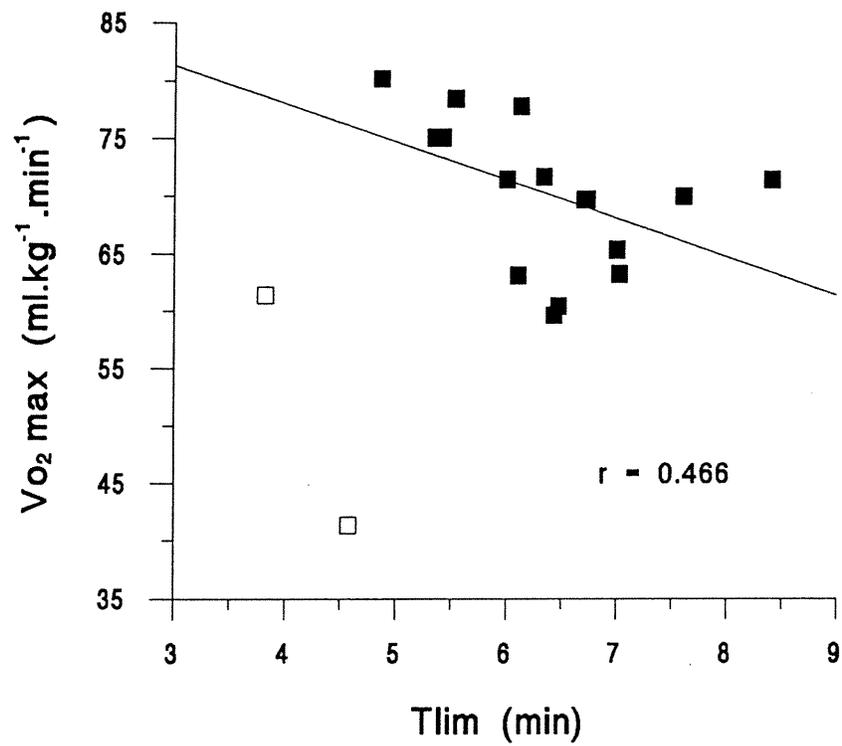


Figure 26: Relation entre les valeurs de Tlim à 100 % de la VAM ou de la PAM et le VO<sub>2</sub>max rapportés dans les études sur cette question (données du tableau 10 plus résultats de cette étude).

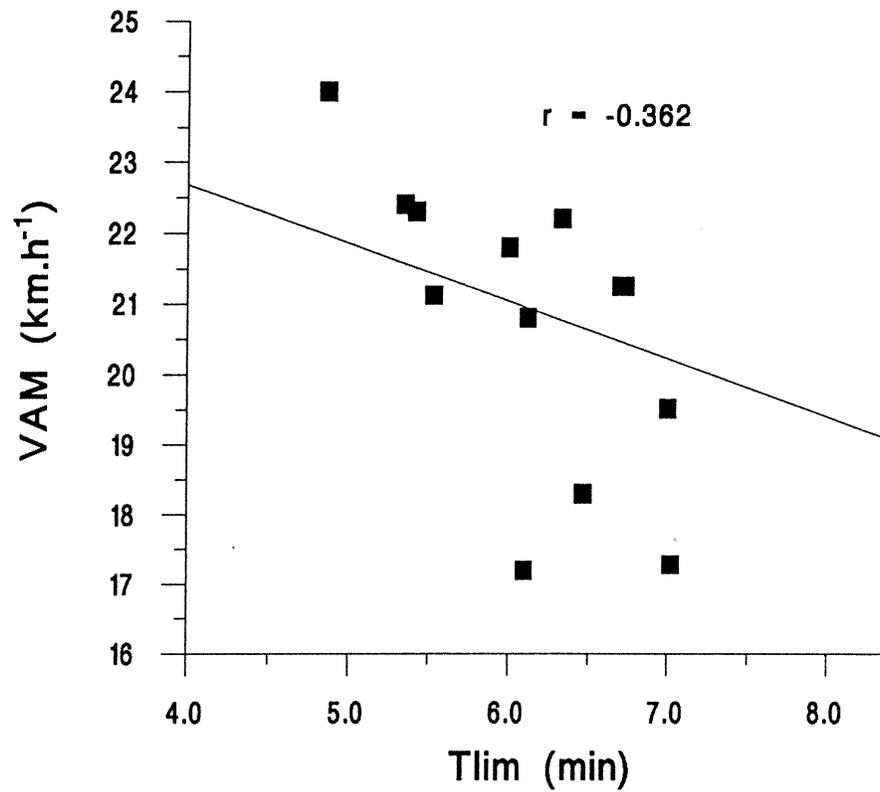


Figure 27: Relation entre les valeurs de Tlim à 100 % de la VAM et de la VAM rapportées dans les études sur cette question (données du tableau 10 plus les résultats de cette étude).

positive entre Tlim à la VAM et le seuil d'accumulation du lactate, défini comme la vitesse à laquelle la concentration de lactate "*augmente rapidement autour de 3,5 mmol.L<sup>-1</sup>*" et exprimée en % de la VAM. Dans la mesure où ce seuil pourrait être relié à l'endurance, cette donnée indique que les sujets les plus endurants sont ceux qui soutiennent le plus longtemps Tlim à 100 % de la VAM. Des études sur des effectifs plus importants et sur des échantillons très hétérogènes seraient nécessaire pour mieux décrire les relations qui peuvent exister entre Tlim à 100 % de la VAM ou de la PAM et d'autres caractéristiques bioénergétiques individuelles.

#### **4.5 Tlim à 100 % de la PAM et performance**

Même s'il existe des relations entre Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM et d'autres caractéristiques bioénergétiques, ces relations restent en général faibles (Tableau 21). Ceci indique que Tlim à 100 % de la PAM ou de la VAM peut être considéré lui-même comme une caractéristique bioénergétique indépendante qui détermine par elle-même, en partie, la performance que peut réaliser le sujet. Ceci peut être illustré en prenant comme exemple trois coureurs à pied possédant les mêmes caractéristiques bioénergétiques déterminantes de la performance telles que définies dans le modèle de Péronnet et Thibault (1989): capacité anaérobie (1390 J.kg<sup>-1</sup>), PAM (24,3 W.kg<sup>-1</sup> soit un VO<sub>2</sub>max de 69,9 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>), et endurance (index d'endurance = 6,15 correspondant à 80 % de la PAM soutenus pendant une course de 180 min). On suppose que l'efficacité de leur foulée

est identique et qu'elle correspond à l'équation du coût énergétique de la course selon di Prampero (1984). Toutefois on suppose que les trois coureurs possèdent des  $T_{lim}$  à 100 % de la PAM, différents soit 5 min, 7,5 min et 10 min. Cette étendue de 2,5 min entre les valeurs extrêmes de  $T_{lim}$  est modeste compte tenu des grandes variations rapportées dans la littérature (voir section précédente). Le modèle de la performance en course à pied de Péronnet et Thibault (1989) a été utilisé pour estimer les performances que peuvent réaliser ces trois coureurs sur diverses distances de course allant du 100 m au marathon. Comme le montre le tableau 22 et la figure 28 les performances de ces trois coureurs sont, bien entendu, identiques pour des courses dont la durée est inférieure à 5 min (moins de 1500 m). Pour des courses dont la durée est comprises entre 5 et 7,5 min, le coureur dont la valeur de  $T_{lim}$  à 100 % de la PAM est seulement de 5 min, ne peut soutenir sa PAM, alors que les deux autres coureurs le peuvent. Ces derniers développent donc une plus grande puissance et, en conséquence, réalisent de meilleures performances sur 2000 m, par exemple. Entre 7,5 et 10 min un seul des coureurs, celui qui soutient 100 % de sa PAM pendant 10 min, peut soutenir sa PAM: les deux autres ne peuvent soutenir qu'une puissance aérobie inférieure à leur PAM. Ces derniers développent donc des puissances inférieures et réalisent de moins bonnes performances sur 3000 m par exemple. Au delà de 10 min tous les coureurs maintiennent une puissance aérobie inférieure à leur PAM et leur performance tendent à nouveau à se rapprocher d'autant plus que la

Tableau 22: Effet de la variation de Tlim à 100 % de la PAM sur les performances en course à pied de trois sujets pour une large étendue de distance.

	sujet 1	sujet 2	sujet 3
Tlim a 100% de la MAP	5 min	7,5 min	10 min
100 m	11.08	11.08	11.08
400 m	51.70	51.70	51.70
800 m	2:02.04	2:02.04	2:02.04
1500 m	4:07.77	4:07.77	4:07.77
2000 m	5:41.22	5:37.76	5:37.76
3000 m	8:59.99	8:43.98	8:37.96
5000 m	15:46.22	15:24.13	15:06.23
10000 m	33:16.85	32:44.57	32:17.67
21100 m	1:13:58.09	1:13:18.14	1:12:44.18
42195 m	2:35:15.36	2:34:55.76	2:34:39.49

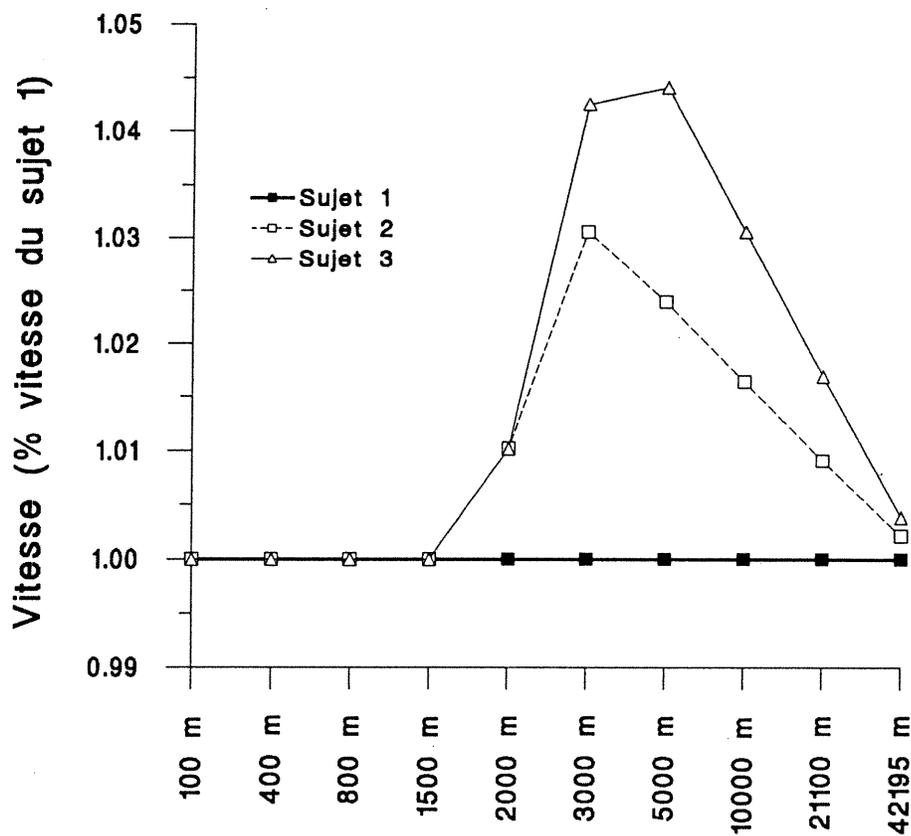


Figure 28: Comparaison des vitesses soutenues par trois coureurs ayant les mêmes caractéristiques bioénergétiques ( $VO_2$ max, capacité anaérobie, endurance, économie de la foulée) mais soutenant 100 % de la VAM pendant 5 min (sujet 1), 7,5 min (sujet 2), ou 10 min (sujet 3). Les vitesses sont exprimées en pourcentage (fractions) de la vitesse du sujet 1.

distance de course s'allonge.

Cet exemple illustre comment la valeur de Tlim à la PAM pourrait significativement contribuer de façon indépendante des autres caractéristiques bioénergétiques, à la performance en course à pied pour des distances variant entre le 2000 et le 5000 m. À ce titre, la valeur de Tlim à la PAM pourrait être parmi les facteurs qui pourraient être évalué initialement chez des athlètes qui participent à ce type de course, qui pourrait être spécifiquement entraîné, et dont l'évolution au cours des phases de l'entraînement pourrait être suivie. Le problème pratique est que ce facteur de la performance semble difficile à mesurer de façon reproductible chez un sujet donné. Billat et al. (1994 a) ont montré que la valeur moyenne de Tlim chez un groupe de huit coureurs était reproductible d'une semaine à l'autre. Dans leur étude, le temps observé était de  $404 \pm 101$  s la première semaine et de  $402 \pm 113$  s la seconde, le coefficient de corrélation entre les deux séries de valeurs s'établissant à 0,864. À première vue ces chiffres suggèrent une bonne reproductibilité de la mesure de Tlim à 100 % de la VAM. Toutefois, ceci n'est pas le cas. Les différences absolues entre les deux valeurs de Tlim individuelles sont assez importantes. Les plus grands écarts sont voisins de 1 min 30 s, et la moyenne s'établit à 45 s. Ceci signifie qu'il est difficile de reproduire chez un sujet donné la mesure de sa valeur de Tlim à 100 % de la VAM. Dans notre étude nous faisons la même observation. Même si les moyennes de la valeur de Tlim à 100 % de la VAM sur tapis roulant ( $386 \pm 52$  s) et à 100

## CONCLUSIONS

En conclusion la revue des études disponibles dans la littérature qui rapportent des données concernant la relation entre le % de la PAM et la durée du travail jusqu'à épuisement montre qu'il existe actuellement suffisamment d'information pour établir de façon relativement précise la relation entre le pourcentage du  $VO_2$ max et le temps de travail jusqu'à épuisement pour une étendu de temps de travail allant de 1,3 à 240 min. L'analyse de ces données montre que cette relation peut être décrite par l'équation:

$$\% \text{ PAM} = 93,76 - 55,60 \times \log (\log T_{lim})$$

qui est dérivée des études ayant rapporté un ou plusieurs couples % PAM- $T_{lim}$ , ou par l'équation:

$$\% \text{ PAM} = 94,37 - 54,47 \times \log (\log T_{lim})$$

qui est dérivée des études ayant modélisé la relation % PAM- $T_{lim}$  (dans ces équations,  $T_{lim}$  est en min). Le fait que ces deux équations soient très voisines bien qu'elles dérivent de deux ensemble de données expérimentales totalement indépendantes, est un gage de leur validité. La valeur de  $T_{lim}$  pour une PAM donnée pourrait être un peu plus bas sur ergocycle que sur tapis roulant ou à la course sur le terrain, au moins pour les valeurs élevées de  $T_{lim}$ . Ils sont aussi plus bas en laboratoire ou lors d'une évaluation sur le terrain qu'en compétition. Par contre, ils ne semblent pas être différents selon les sexes. Enfin ils pourraient être un peu plus haut pour les sujets qui ont un  $VO_2$ max élevé. Finalement, si l'on considère

l'enveloppe supérieure des données décrivant la relation Tlim-% PAM, son équation, qui est:

$$\% \text{ PAM} = 103,02 - 53,57 \times \log (\log \text{ Tlim})$$

pourrait représenter la limite de l'endurance chez l'Homme.

L'étude expérimentale qui a porté sur dix coureurs à pied de niveau récréatifs, montre que Tlim à 100 % de la PAM se situe aux environs de 6 min 30 secondes, comme cela a été rapporté en moyenne dans la quinzaine d'études conduites sur cette question. Comme l'a montré Billat et al. (1994 a) la valeur moyenne de Tlim à 100 % de la PAM est très reproductible, même si les sujets sont évalués sur deux ergomètres différents (tapis roulant et ergocycle). Toutefois, l'étendue des valeurs de Tlim sur chacun des deux ergomètres est importante, comme cela a été aussi observé dans toutes les études sur cette question. En outre, nous ne trouvons pas de relation entre les valeurs de Tlim sur les deux ergomètres, contrairement aux résultats de Billat et al. (1994 a) qui ont observé une relation significative entre les valeurs de Tlim mesurées à deux reprises, sur tapis roulant dans les deux cas. Billat et al. (1994 a et b, 1995 a et b, 1996) ont aussi observé dans certains cas des relations entre Tlim à 100 % de la PAM et diverses autres caractéristiques bioénergétiques, comme le  $\text{VO}_2\text{max}$ , la VAM, et des indices de la capacité de l'anaérobie et de l'endurance. Ces relations ne sont pas toujours consistantes et nous ne les avons pas retrouvées dans notre étude. Par contre, l'analyse de toutes les données de la littérature suggère que Tlim à 100 % de la PAM pourrait être effectivement, relié de façon inverse

au  $VO_2$ max et à la VAM. Prises dans leur ensemble les données de Billat et al. (1994 a) et nos propres données sur la fidélité de Tlim à 100 % de la PAM montrent que la mesure de cette variable est reproductible, dans un groupe de sujets, mais ne l'est pas de façon convenable pour un sujet pris individuellement: les risques d'erreurs étant beaucoup trop grand. Ceci empêche de pouvoir actuellement considéré la valeur de Tlim à 100 % de la PAM comme une variable d'intérêt dans l'évaluation de l'athlète et dans le suivi de son entraînement.

## RÉFÉRENCES

Allen, W. K., D. R. Seals, B. F. Hurley, A. A. Ehsani, J. M. Hagberg. Lactate threshold and distance-running performance in young and older endurance athletes. *J. Appl. Physiol.* 58(4): 1281-1284, 1985.

Astrand P.-O., K. Rodahl. Textbook of work physiology. Second edition. pp. 302-304, Masson, Paris 1977.

Astrand P.-O., K. Rodahl. Précis de physiologie de l'exercice musculaire. 3<sup>e</sup> édition. Mise à jour, Masson, Paris 1994.

Aunola, S., E. Alanen, J. Marniemi, H. Rusko. The relation between cycling time to exhaustion and anaerobic threshold. *Ergonomics* 33: 1027-1042, 1990.

Billat, V., J. C. Renoux, J. Pinoteau, B. Petit, J. P. Koralsztein. Time to exhaustion at 90, 100 and 105% of velocity at  $VO_2$ max (Maximal aerobic speed) and critical speed in Elite Longdistance Runners. *Arch. Physiol. Biochem.* 103(2): 129-135, 1995.(b)

Billat, V., J. C. Renoux, J. Pinoteau, B. Petit, J. P. Koralsztein. Hypoxémie et temps limite à la vitesse aérobie maximale chez les coureurs de fond. *Can. J. Appl. Physiol.* 20(1): 102-111, 1995.(a)

Billat, V., C. Hanon, H. Stephan, J. Beillot, J. Jon, P. Rochongar, F. Carre. Gender effect on the relationship among time limit at 100% of  $vVO_2$ max with other bioenergetic characteristics and performance in elite middle-distance runners. (Manuscrit en préparation) 1996

Billat, V., J. C. Renoux, J. Pinoteau, B. Petit, J. P. Koralsztein. Reproducibility of running time to exhaustion at VO<sub>2</sub>max in subelite runners. *Med. Sci. Sports exerc.* 26(2): 254-257, 1994.(a)

Billat, V., J. C. Renoux, J. Pinoteau, B. Petit, J. P. Koralsztein. time to exhaustion at 100% of velocity at VO<sub>2</sub>max and modeling of the time-limit velocity relationship in elite long-distance runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 271-373, 1994. (b)

Björkman, O., K. Sahlin, L. Hagenfeldt, J. Wahren. Influence of glucose and fructose ingestion on the capacity for long term exercise in well-trained men. *Clin. Physiol.* 4: 483-494, 1984.

Bosch, A. N., B. R. Goslin, T. D. Noakes, S.C. Dennis. Physiological differences between black and white runners during a treadmill marathon. *Eur. J. Appl. Physiol.* 61: 68-72 1990.

Briggs, C. A. Maximum aerobic power and endurance as predictors of middle distance running success. *Aust. J. Sports Med.* 9: 28-31, 1977.

Brooke, J. D., G. I. Davies, L. F. Green. The effect of normal and glucose syrup work diets on the performance of racing cyclists. *J. Sports Med.* 15: 257-265, 1975.

Brooks, G. A., T. D. Fahey, T. P. White. Exercise physiology. Human bioenergetics and its applications. Mayfield Publishing Company, Mountain View, California 1996.

Calles-Escandòn, J., J. T. Devlin, W. Whitcomb, E. S. Horton. Pre-exercise feeding does not affect endurance cycle exercise but attenuate post-exercise starvation-like response. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23: 818-824, 1991.

Camus, G., J. Juchmes, H. Thys, A. Foisson. Relation entre le temps-limite et la consommation maximale d'oxygène dans la course supramaximale. *J. Physiol. Paris* 83: 26-31, 1988.

Camus, G., J. Charlier-Grisart, B. Pirson, H. Thys. Temps limite dans l'exercice supramaximum sur tapis roulant et sur bicyclette ergométrique. *Science et motricité* 5:19-22, 1988.

Chryssanthopoulos, C., L. C. M. Hennessy, C. William. The influence of pre-exercise glucose ingestion on endurance running capacity. *Br. J. Sports Med.* 28: 105-109, 1994.

Coggan, A. R., E. F. Coyle. Metabolism and performance following carbohydrate ingestion late in exercise. *Med Sci Sports Exer.* 21(1): 59-65, 1989.

Costill, D. L., E. L. Fox. Energetics of marathon running. *Med. Sci. Sports* 1(2): 81-86, 1969.

Costill, D. L., G. Branam, D. Eddy, K. Sparks. Determinents of marathon running success. *Int. Z. Angew. Physiol.* 29: 249-254, 1971.

Costill, D. L., H. Thomasson, E. Roberts. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med. Sci. Sports* 5(4): 248-252, 1973.

Costill, D. L., E. Winrow. A comparison of two middle-aged ultramarathon runners. *Res. Quart.* 41(2): 135-139, 1970.

Coyle, E. F., M. E. Feltner, S. A. Kautz, M. T. Hamilton, S. J. Montain, A. M. Baylor, L. D. Abraham, G. W. Petrek. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23(1): 93-107, 1991.

Coyle, E. F., A. R. Coggan, M. K. Hopper, T. J. Walters. Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J. Appl. Physiol.* 64(6): 2622-2630, 1988.

Coyle, E. F., A. R. Coggan, M. K. Hemmert, J. L. Ivy. Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J. Appl. Physiol.* 61: 165-172, 1986.

Coyle, E. F., J. M. Hagberg, B. F. Hurley, W. H. Martin, A. A. Ehsani, J. O. Holloszy. Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J. Appl. Physiol.* 55: 230-235, 1983.

Daniels, J. T. Running with Jim Ryun: A five-year study. *The Physician and Sports medicine* 2(september): 62-67, 1974.

Davies, C. T. M., M. W. Thompson. Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 41: 233-245, 1979.

Davies, C. T. M., M. W. Thompson. Physiological responses to prolonged exercise in ultramarathon athletes. *J. Appl. Physiol.* 61(2): 611-617, 1986.

Delvin, J. T., J. Calles-Escandòn, E. S. Horton. Effects of preexercise snack feeding on endurance cycle exercise. *J. Appl. Physiol.* 60: 980-985, 1986.

DeVries, H. A.. *Physiology of exercise for physical education and athletics.* Dubuque, Iowa; Brown, c1974.

di Prampero, P. E.. I record del mondo di corsa piana. *Riv. Cult. Sportiva* 3: 3-7, 1984

di Prampero, P. E., G. Atchou, J.-C. Bruckner, C. Moia. The energetics of endurance running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 55: 259-266, 1986.

Douglas, L. C., G. S. Krahenbuhl, L. N. Burkett, A. L. Millar. Following Steve Scott: Physiological changes accompanying training. *The Physician and Sports medicine* 12(1): 103-106, 1984.

Edington, D. W., V. R. Edgerton. *The biology of physical activity.* Boston: Houghton Mifflin c1976.

Farrel, P. A., J. H. Wilmore, E. F. Coyle, J. E. Billing, D. L. Costill. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med. Sci. Sports.* 11(4):338-344, 1979.

Felig, P., A. Cherif, A. Minagawa, J. Wahren. Hypoglycemia during prolonged exercise in normal men. *New. Engl. J. Med.* 306; 895-900, 1982.

Foster, C., D. L. Costill, W. J. Fink. Effects of preexercise feedings on endurance performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 11: 1-5, 1979.

Fox, E. L., D. K. Mathews. Bases physiologiques de l'activité physique. Montréal : Paris: Décarie; Vigot ,1984.

Fox, E.L., R. W. Bowers, M. L. Foss. The physiological basis of physical education and athletics. 4<sup>e</sup> edition. Iowa: Wm. C. Brown Publishers 1989.

Fruth, J. M., C. V. Gisolfi. Effects of carbohydrate consumption on endurance performance: fructose versus glucose. In: Nutrient utilization during exercise. Fox Ed., Ross Laboratories Publication, Ohio, pp.68-77, 1993.

Gaesser, G. A., L. A. Wilson. Effects of continuous and interval training on the parameters of the power-endurance time relationship for high-intensity exercise. *Int. J. Sports Med.* 9(6): 417-421, 1988.

Gleeson, M., R. J. Maughan, P. L. Greenhaff. Comparaison of the effects of pre-exercise feeding of glucose, glycerol and placebo on endurance and fuel homeostasis in man. *Eur. J. Appl. Physiol.* 55: 645-653, 1986.

Gleser, M. A., J. A. Vogel. Endurance capacity for prolonged exercise on the bicycle ergometer. *J. Appl. Physiol.* 34(4): 438-442, 1973.

Hanon, C., H. Stephan. Temps-limite a la vitesse maximale aérobie chez les coureurs de demi-fond de haut niveau. *Congres ACAPS, Caen, 28-29-30 octobre 1993.*

Hanson, P., A. Claremont, J. Dempsey, W. Reddan. Determinants and consequences of ventilatory responses to competitive endurance running. *J. Appl. Physiol.* 52(3): 615-623, 1982.

Hargreaves, M., D. L. Costill, W. J. Fink, D. S. King, R. A. Fielding. Effects of pre-exercise carbohydrate feedings on endurance cycling performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 19: 33-36, 1987.

Higgs, S. L. Maximal oxygen intake and maximal work performance of active college women. *Res. Quart.* 44(2): 125-131, 1973.

Horvath, S. M., E. D. Michael, Jr. Responses of young women to gradually increasing and constant load maximal exercise. *Med. Sci. Sports* 2(3): 128-131, 1970.

Jenkins, D. G., B. M. Quigley. Blood lactate in trained cyclists during cycle ergometry at critical power. *Eur. J. Appl. Physiol.* 61: 278-283, 1990.

Jenkins, D. G., B. M. Quigley. The influence of high-intensity exercise training on the Wlim-Tlim relationship. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25(2): 275-282, 1993.

Jenkins, D. G., B. M. Quigley. The y-intercept of critical power function as a measure of anaerobic work capacity. *Ergonomics* 34(1): 13-22, 1991.

Jensen, C. R., A. G. Fisher. Scientific basis of athletic conditioning. 2<sup>e</sup> edition. Philadelphia : Lea et Febiger. 1979.

Johnson, W. R.. Science and medicine of exercise and sports. Harper et Brothers, New York 1960.

Knapik, J. J., B. H. Jones, C. Meredith, W. J. Evans. Influence of 3.5 days fast on physical performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 56: 428-432, 1987.

Lacour, J. R., S. Padilla-Magunacelaya, J. C. Barthelemy, D. Dormois. The energetics of middle-distance running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 60: 38-43, 1990.

Lacour, J. R., A. Montmayeur, D. Dormois, G. Gacon, S. Padilla, C. Viale. Validation de l' épreuve de mesure de la vitesse maximale aerobie (VMA) dans un groupe de coureurs de haut niveau. *Science et Motricité* 7:3-8, 1989.

Lamb, D. R.. *Physiology of exercise. Responses and adaptations.* New york Macmillon c1978.

Lavoie, N. F., T. H. Mercer. Incremental and constant-load determinations of  $VO_2$ max and maximal constant-load performance time. *Can. J. Spt. Sci.* 12(4): 229-232, 1987.

Lechevalier, J. M., H. Vandervalle, J. C. Chatard, A. Moreaux, V. Gandrieux, F. Besson, H. Monod. Relationship between the 4 mmol running velocity, the time-distance relationship and the Léger-Boucher's test. *Arch. Int. Physiol. Bioch.* 97: 355-360, 1989.

Léger, L., D. Mercier, L. Gauvin. The relationship between %  $VO_2$ max and running performance time. *The olympic scientific congress proceedings vol 3, Human Kinetics Publishers, inc., Champaign (Il), 1986.*

Léger, L., Mercier, D. Gross energy of horizontal treadmill and track running *Sports Med.* 1:270-277, 1984.

Londeree, B. R. The use of laboratory test result with long distance runners. *Sports medecine* 3: 201-213, 1986.

Maron, M. B., S. M. Horvath, J. E. Wilkerson, J. A. Gliner. Oxygen uptake measurements during competitive marathon running. *J. Appl. Physiol.* 40(5): 836-838, 1976.

Maughan, R. J., J. B. Leiper. Aerobic capacity and fractional utilisation of aerobic capacity in elite and non-elite male and female marathon runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 52: 80-87, 1983.

Maughan, R. J., C. E. Fenn, L. B. Leiper. Effects of fluid, electrolyte and substrate ingestion on endurance capacity. *Eur. J. Appl. Physiol.* 58: 481-486 1989.

Maughan, R. J., M. Gleeson. Influence of 36 h fast followed by refeeding with glucose, glycerol or placebo on metabolism and performance during prolonged exercise in man. *Eur. J. Appl. Physiol.* 57: 570-576, 1988.

Mayhew, J. L., J. Andrew. Assessment of running performance in college males from aerobic capacity percentage utilization coefficients. *J. Sports Med.* 15: 342-346, 1975.

Mcardle, W. D., F. I. Katch, V. L. Katch. *Exercise physiology: energy, nutrition, and human performance.* 3<sup>rd</sup> edition. pp. 189-190, Philadelphia: Lea and Fibiger, 1991.

Mclellan, T. M., K. S. Y. Cheung. A comparative evaluation of the individual anaerobic threshold and the critical power. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24(5): 543-550, 1992.

Mclellan, T. M., J. S. Skinner. Submaximal endurance performance related to the ventilation thresholds. *Can. J. Appl. Spt. Sci.* 10(2): 81-87, 1985.

McMurray, R. G., J. R. Wilson, B. S. Kitchell. The effects of fructose and glucose on high intensity endurance performance. *Res. Quat.* 54: 156-162, 1983.

Monod, H., R. Flandrois. *Physiologie du sport. Bases physiologiques des activités physiques et sportives.* 3<sup>e</sup> édition. rev. et augm.pp. 21-22, Paris: Masson 1994.

Monod, H., Scherrers J. The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics* 8:329-338 1965

Montmayeur, A., M. Villaret. Etude de la vitesse maximale aérobie derrière cycliste. *Science et motricité* 10: 27-31, 1990.

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

Myhre L. G., G. H. Hartung, D. M. Tucker. Plasma volume and blood metabolites in middle-age runners during a warm weather marathon. *Eur. J. Physiol.* 48:227-240, 1982.

Noakes T. D., E. V. Lambert, M. I. Lambert, P. S. McArthur, K. H. Myburgh, A. J. Spinndler Benade. Carbohydrate ingestion and muscle glycogen depletion during marathon and ultramarathon racing. *Eur. J. Appl. Physiol.* 57: 482-489, 1988.

Nishibata, I., T. Sadamoto, Y. Mutoh, M. Miyashita. Glucose ingestion before and during exercise does not enhance performance of daily repeated endurance exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 66: 65-69, 1993.

Oja, P., K. Kukkonen-Harjula, R. Nieminen, I. Vuori, M. Pasanen. Cardiorespiratory strain of middle-age men in mass events of long-distance cycling, rowing, jogging and skiing. *Int. J. Sports Med.* 8(1): 45-51, 1987.

Okano, G., H. Takeda, I. Morita, M. Katoh, Z. Mu, S. Miyake. Effect of pre-exercise glucose ingestion on endurance performance in fed men. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20:105-109, 1988.

Olds, T. S., K. I. Norton, N. P. Craig. Mathematical model of cycling performance. *J. Appl. Physiol.* 75: 730-737, 1993.

Padilla, S., M. Bourdin, J. C. Barthelemy, J. R. Lacour. Physiological correlates of middle-distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 65: 561-566, 1992.

Peronnet, F., G. Thibault, E. C. Rhodes, D. C. McKenzie. Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 19(6): 610-615, 1987.

Péronnet, F., E. Adopo, G. Thibault, R. Montpetit. Exercise to exhaustion at maximal aerobic power: an important factor for performance. (Pas publié)

Powers, S. K., J. Lawler, S. Dodd, R. Tulley, G. Landry, K. Wheeler. Fluid replacement drinks during high intensity exercise: effect on minimizing exercise-induced disturbances in homeostasis. *Eur. J. Appl. Physiol.* 60: 54-60, 1990.

Powers, S. K., E. T. Howley. *Exercise physiology*. Second edition. Dubuque, IA: Wm. C. Brown. 1994.

Ramsbottom, R., M. G. Nute, C. Williams. Determinants of five kilometre running performance in active men and women. *Brit. J. Sports Med.* 21(2): 9-13, 1987.

Ramsbottom, R., C. Williams, D. G. Kerwin, M.L.G. Nute. Physiological and metabolic responses of men and women to 5-km treadmill time trial *J. Sports Sci.* 10: 119-129, 1992.

Riley, M. L., R. G. Israel, D. Holbert, E. B. Tapscott, G. L. Dohm. Effect of carbohydrate ingestion on exercise endurance and metabolism after a 1 day-fast. *Int. J. sportsmed.* 9: 3230-324, 1988.

Sasaki, H., J. Maeda, S. Usui, T. Ishiko. Effects of sucrose and caffeine ingestion on performance of prolonged strenuous running. *Int. J. Sports Med.* 8: 261-265, 1987.

Scherrer, J., Samson M. Paléologue A. Etude du travail musculaire et de la fatigue. Données ergométriques obtenues chez l'homme. *J. Physiol. (Paris)* 46: 887-916, 1954.

Scimgeour, A. G., T. D. Noakes, B. Adams, K. Myburgh. The influence of weekly training distance on fractional utilization of maximum aerobic capacity in marathon and ultramarathon runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 55: 202-209, 1986.

Segal, K., A. Nyman, J. G. Kral, P. Bjorntorp, D. P. Kotler, F. X. Pi-Sunyer. Effects of glucose ingestion on submaximal intermittent exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 17: 205, 1985.

Shephard, R. J., P.-O. Astrand. *Endurance in sport*. Oxford, Boston Blackwell Scientific Publications. Mosby-Year Book [distributor], 1992.

Sirotniak, A. C., V. L. Foster. Glucose electrolyte ingestion: Influence in endurance factors in highly trained female cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24: S21, 1992.

Snyder, A. C., D. R. Lamd, T. Baur, D. Conners, G. Brodowicz. Maltodextrine feeding immediatly before prolonged cycling at 61%  $VO_2$ max increases time to exhaustion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 15: S126, 1983.

Thomas, D. E., J. R. Bratherhood, J. C. Brand. Carbohydrate feeding before exercise: Effect of glycemic index. *Int. J. Sports Med.* 12: 180-186, 1991.

Vandewalle, H., B. Kapitaniak, S. Grun, S. Raveneau, H. Monod. Comparison between a 30-s all-out test and a time-work test on a cycle ergometer. *Eur. J. Appl. Physiol.* 58: 375-381, 1989.

Wells, C. L., L. H. Hecht, G. S. Krahenbuhl. Physical characteristics and oxygen utilisation of male and female marathon runners. *Res. Q. Exerc. Sport.* 52(2): 281-285, 1981.

Weltman, A., J. D. Regan. Prior exhaustive exercice and subsequent, maximal constant load exercice performance. *Int. J. Sports Med.* 4: 184-189, 1983.

Wilber, R. L., R. J. Moffat. Influence of carbohydrate ingestion on blood glucose and performance in runners. *Int. J. Sports Nutr.* 2: 317-327, 1992.

Wilmore, J. H., D. L. Costill. *Physiology of sport and exercise*. Champaign, IL: Human kinetics, c1994.