
Université de Reims Champagne Ardenne

UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Ecole doctorale Sciences, Technologies, Santé

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Reims Champagne Ardenne

Discipline : **Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives**

<p>Statistiques appliquées à la physiologie du sport dans l'exploration des variables influençant la performance chez les cyclistes</p>

SOUDAIN-PINEAU Mickaël

Date de soutenance : 12 Décembre 2008

Composition du Jury

Jean MEDELLI, Medecin, CHU Amiens, France (Rapporteur)

Aurelio CAPPOZZO, Professeur, Istituto Universitario di Scienze Motorie, Italie (Rapporteur)

Frédéric BOHR, Professeur, Université de Reims Champagne Ardenne (Co-encadrant)

Philippe JOLY, Maître de conférences, Université de Reims Champagne Ardenne (Co-encadrant)

William BERTUCCI, Maître de conférences, Université de Reims Champagne Ardenne

Alain LODINI, Professeur, Université de Reims Champagne Ardenne

Krzysztof WIERZBANOWSKI, Professeur, Faculté de Cracovie, Pologne

Remerciements

En premier lieu, je voudrais tout particulièrement remercier ma maman sans qui rien de tout cela n'aurait été possible ainsi que ma famille qui a toujours été là pour moi.

Depuis le début de cette thèse, une autre femme (que ma maman) partage ma vie. Elle est devenue récemment mon épouse et je la remercie de son soutien quotidien. Je remercie également sa famille.

J'adresse des remerciements particuliers à mon co-encadrant, Mr Philippe JOLY, et à mon directeur de laboratoire, Mr Alain LODINI. Merci de m'avoir accordé votre confiance, de m'avoir conseillé, éclairé, apporté et instruit tant de choses durant ces années.

Merci au Dr Jean MEDELLI de m'avoir permis de mener cette étude avec l'aide de ses conseils éclairés, de s'être investi et d'avoir accepté d'être mon rapporteur. Je remercie aussi Mr Aurelio CAPPOZZO, qui fait le déplacement depuis l'Italie, d'avoir accepté d'être également mon rapporteur, ainsi que Mr Krzysztof WIERZBANOWSKI de la faculté de Cracovie, Mr William BERTUCCI et Mr Frédéric BOHR qui a suivi la bonne marche de ce manuscrit, d'avoir accepté d'être membres du jury. Merci également à Mr ROMEUR Jean Pascal.

Je remercie également les membres du laboratoire d'analyse des contraintes mécaniques qui de part leurs encouragements m'ont apporté un peu d'espoir, surtout dans les moments difficiles.

Je remercie le directeur de l'UFR STAPS de Reims, les enseignants et surtout toute la scolarité qui a tout mis en œuvre pour que les enseignements dont j'avais la charge se passent dans les meilleures conditions possibles. J'ai une reconnaissance particulière pour Sylvette.

Embarqué dans le même bateau, je remercie les thésards que j'ai eu l'occasion de côtoyer dans le bureau des « ATER ». Je les remercie de tous les moments passés ensemble, des innombrables discussions, non pas autour du feu, mais autour du bureau.

Enfin, je pense à tous les amis et les gens que j'ai pu rencontrer depuis que je suis arrivé dans cette ville où il fait un peu plus frais que sur mon île natale. Ils ont par leur accueil réchauffé mon cœur de sympathie et ont rendu le climat plus acceptable.

« L'homme de culture doit être un inventeur d'âmes. »

Aimé Césaire

Table des matières

Chapitre I - Etude bibliographique.....	11
1. Introduction.....	12
1.1. La performance et les caractéristiques techniques.....	13
1.2. La performance et les caractéristiques physiologiques.....	17
1.2.1. Facteurs énergétiques et facteurs limitants.....	17
1.2.2. Facteurs hormonaux.....	31
1.3. La performance et les autres caractéristiques.....	34
1.3.1. Facteurs psychologiques.....	34
1.3.2. Facteurs liés à l'échauffement, l'entraînement et la récupération.....	34
1.3.3. Facteurs liés au rythme nyctéméral.....	37
1.4. Problématique.....	38
Chapitre II - Analyse discriminante appliquée aux sportifs, cas des cyclistes amateurs.	40
2.1. Protocole.....	41
2.2. Analyses statistiques.....	44
2.2.1. Statistiques descriptives.....	44
2.2.2. Examen des distributions.....	44
2.2.3. Statistiques analytiques.....	46
2.2.3.1. L'analyse de variance.....	46
2.2.3.2. Le test de Kruskal-Wallis.....	49
2.2.4. Analyse discriminante.....	49
2.2.4.1. La règle « bayésienne » de classement.....	49
2.2.4.2. La sélection des variables.....	50
2.2.4.3. Les conditions d'applications.....	50
2.3. Résultats.....	51
2.3.1. Statistiques descriptives.....	51
2.3.2. Statistiques analytiques.....	54
2.3.3. L'Analyse discriminante.....	56
2.3.3.1. Les variables sélectionnées.....	56
2.3.3.2. Les fonctions discriminantes.....	58
2.4. Discussion.....	69

Chapitre III – Analyses des variables hormonales et de l’influence des variables physiques et physiologiques sur la puissance, cas de cyclistes professionnels.....	71
3.1. Protocole.....	72
3.1.1. Matériel	72
3.1.1.1. La chaîne de mesure de la consommation d’oxygène.....	72
3.1.1.2. L’ergocycle.....	74
3.1.1.3. Chaîne électro-cardiographique	75
3.1.1.4. L'appareil de mesure du lactate	76
3.1.1.5. Techniques de dosage des paramètres hormonaux	77
3.1.2. Expérimentation	79
3.1.2.1 Séquence protocolaire	79
3.1.2.2. Déroulement du protocole.....	79
3.2. Etude des variables hormonales	83
3.2.1. Répartition des différentes hormones.....	83
3.2.2. Comparaison des situations de chaque hormone en fonction des critères physiques et physiologiques.....	94
3.2.2.1. La Testostérone totale	94
3.2.2.2. La Testostérone libre.....	98
3.2.2.3. L’hormone lutéïnisante (LH).....	102
3.2.2.4. L’hormone folliculostimulante (FSH).....	106
3.2.2.5. La prolactine.....	109
3.2.2.6. L’Insuline.....	113
3.2.2.7. Cortisol.....	118
3.2.3. Les régressions multiples	122
3.2.3.1. La sélection des variables.....	122
3.2.3.2. Le modèle général	130
3.2.3.3. Les hypothèses de base du modèle de régression linéaire	132
3.2.3.4. Validation des modèles	144
3.2.3.5. Un résultat d’analyse discriminante	144
Chapitre IV – Une modélisation de l’évolution complète du lactate sanguin, cas des cyclistes professionnels.....	147
Chapitre V – Discussion Générale	159
Perspectives.....	175
Bibliographie.....	176

Annexes.....	193
Annexe 1	194
Annexe 2	195
Annexe 3	199
Annexe 4	205
Annexe 5	208
Annexe 6 (Articles).....	210

Index des tableaux

Tableau 1 : Plusieurs études sur les réponses hormonales à l'exercice	33
Tableau 2 : Exemple de tableau de données	46
Tableau 3 : Résultat d'une analyse de variance	48
Tableau 4 : Statistiques descriptives de la population au « seuil lactique » et étude de la normalité pour chaque groupe.....	51
Tableau 5 : Statistiques descriptives de la population à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ » et étude de la normalité pour chaque groupe.....	53
Tableau 6 : Comparaison des groupes au « seuil lactique ».....	54
Tableau 7 : Comparaison des groupes à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ ».....	55
Tableau 8 : Sélection des variables discriminantes au « seuil lactique ».....	57
Tableau 9 : Sélection des variables discriminantes à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ ».....	57
Tableau 10 : Test d'égalité des matrices variances-covariances.....	58
Tableau 11 : Répartition des cyclistes « au seuil » pour fonction à 3 variables.....	59
Tableau 12 : Répartition des cyclistes « au seuil » pour la fonction à 6 variables.....	59
Tableau 13 : Taux d'erreur pour les modèles au « seuil lactique ».....	60
Tableau 14 : Sélection des variables discriminantes au « seuil lactique » après élimination des mal classés avec le modèle à 3 variables.....	61
Tableau 15 : Test d'égalité des matrices variances-covariances au « seuil lactique ».....	61
Tableau 16 : Taux d'erreur pour les modèles au « seuil lactique », après filtration	62
Tableau 17 : Répartition des cyclistes « au seuil lactique » pour la fonction à 5 variables	62
Tableau 18 : Répartition des cyclistes « au seuil lactique » pour la fonction à 4 variables	62
Tableau 19 : Taux d'erreur pour les modèles à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ ».....	63
Tableau 20 : Sélection des variables discriminantes à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ » après élimination des mal classés avec le modèle à 3 variables.....	64
Tableau 21 : Test d'égalité des matrices variances-covariances au « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ ».....	64
Tableau 22 : Taux d'erreur pour les modèles à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ », après filtration	65
Tableau 23 : Coefficients de la fonction discriminante linéaire au « seuil lactique ».....	65
Tableau 24 : Coefficients de la fonction discriminante quadratique à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ ».....	66
Tableau 25 : Statistiques descriptives des variables « hormonales ».....	83
Tableau 26 : Comparaison des hormones avant et après l'effort.....	84

Tableau 27 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de testostérone totale (moyenne \pm écart-type).....	96
Tableau 28 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de testostérone libre (moyenne \pm écart-type)	100
Tableau 29 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de LH (moyenne \pm écart-type)	105
Tableau 30 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de FSH (moyenne \pm écart-type)	108
Tableau 31 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de Prolactine (moyenne \pm écart-type).....	112
Tableau 32 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration d'insuline (moyenne \pm écart-type)	117
Tableau 33 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de cortisol (moyenne \pm écart-type).....	121
Tableau 34 : Modèle issu de la méthode de sélection pas à pas pour la variable PMA.....	123
Tableau 35 : Modèle issu de la méthode d'introduction progressive pour la variable W Ana	124
Tableau 36 : Modèle issu de la méthode d'introduction progressive pour la variable PMA.	125
Tableau 37 : Modèle issu de la méthode d'élimination progressive pour la variable W Ana	126
Tableau 38 : Modèle issu de la méthode du coefficient de détermination ajusté pour la variable PMA	127
Tableau 39 : Modèle issu de la méthode du coefficient de détermination ajusté pour la variable W Ana.....	128
Tableau 40 : Modèle issu de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour la variable PMA	129
Tableau 41 : Modèle issu de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour la variable W Ana	130
Tableau 42 : Résultat des tests concernant l'hypothèse d'espérance nulle.	134
Tableau 43 : Test sur l'hypothèse d'homoscédasticité pour les modèles obtenus.....	135
Tableau 44 : Test de Durbin-Watson sur l'hypothèse d'autocorrélation pour les modèles obtenus	137
Tableau 45 : Test de normalité des résidus des modèles de régression.	138
Tableau 46 : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des résidus	139
Tableau 47 : Test de diagnostique de la colinéarité des variables des modèles.....	143

Tableau 48 : Sélection de variables pour l'analyse discriminante de PMA	145
Tableau 49 : Sélection de variables pour l'analyse discriminante de W Ana.....	146
Tableau 50 : Variables des fonctions discriminantes et taux d'erreur	160
Tableau 51 : Coefficients standardisés pour chacune des trois fonctions discriminantes de Leone et al. (1998)	161
Tableau 52 : Coefficients non standardisés pour chacune des trois fonctions discriminantes	162
Tableau 53 : Estimation des valeurs moyennes des groupes	163
Tableau 54 : Variables étudiées et variables discriminantes, comparaison avec l'étude de Leone et al. (1998)	164
Tableau 55 : Etudes relatant les réponses hormonales à l'exercice	168
Tableau 56 : Modèles de régression pour la puissance	170
Tableau 57 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode de sélection pas à pas pour la variable PMA.	199
Tableau 58 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode d'introduction progressive pour la variable PMA.....	199
Tableau 59 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode d'élimination progressive pour la variable PMA.....	200
Tableau 60 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode du coefficient de détermination ajusté pour la variable PMA.....	200
Tableau 61 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour la variable PMA.	201
Tableau 62 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode de sélection pas à pas pour la variable W Ana.	201
Tableau 63 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode d'introduction progressive pour la variable W Ana.....	202
Tableau 64 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode d'élimination progressive pour la variable W Ana.....	202
Tableau 65 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode du coefficient de détermination ajusté pour la variable W Ana.....	203
Tableau 66 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour la variable W Ana.	204

Index des figures

Figure 1 : Relation entre cadence de pédalage, longueur de manivelle et stature.....	13
Figure 2 : Evolution de la consommation maximale d'oxygène à différentes cadences.....	14
Figure 3 : Evolution de la lactatémie pour différentes cadences.....	15
Figure 4 : Modèle de la cinétique de $\dot{V}O_2$	18
Figure 5 : Relation entre la ventilation et le débit de dioxyde de carbone.....	20
Figure 6 : Evolution de la consommation d'oxygène entre deux exercices (Ex-1 et Ex-2)....	22
Figure 7 : Evolution de la consommation d'oxygène pour quatre protocoles.....	24
Figure 8 : Relations consommation d'oxygène-cadence et taux d'effort perçu-cadence.....	36
Figure 9 : Répartition des individus au « seuil lactique » avant utilisation de la fonction discriminante (à priori).....	67
Figure 10 : Répartition des individus au « seuil lactique » après utilisation de la fonction discriminante (à posteriori).....	67
Figure 11 : Répartition des individus à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ » avant utilisation de la fonction discriminante (à priori).....	68
Figure 12 : Répartition des individus à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ » après utilisation de la fonction discriminante (à posteriori).....	68
Figure 13 : Configuration du matériel utilisé pour la réalisation des épreuves d'effort.....	72
Figure 14 : Schéma descriptif de l'Oxycon V.....	74
Figure 15 : Protocole de l'épreuve triangulaire.....	81
Figure 16 : Seuil Anaérobie : méthode de Stegmann.....	82
Figure 17 : Evolution des hormones lors du test d'effort.....	85
Figure 18 : Représentation des concentrations de Testostérone totale avant l'effort.....	86
Figure 19 : Représentation des concentrations de Testostérone totale après l'effort.....	86
Figure 20 : Représentation des concentrations de Testostérone libre avant l'effort.....	87
Figure 21 : Représentation des concentrations de Testostérone libre après l'effort.....	87
Figure 22 : Représentation des concentrations de LH avant l'effort.....	88
Figure 23 : Représentation des concentrations de LH après l'effort.....	88
Figure 24 : Représentation des concentrations de FSH avant l'effort.....	89
Figure 25 : Représentation des concentrations de FSH après l'effort.....	89
Figure 26 : Représentation des concentrations de prolactine avant l'effort.....	90

Figure 27 : Représentation des concentrations de prolactine après l'effort.....	90
Figure 28 : Représentation des concentrations d'insuline avant l'effort.....	91
Figure 29 : Représentation des concentrations d'insuline après l'effort.....	91
Figure 30 : Représentation des concentrations de cortisol avant l'effort.....	92
Figure 31 : Représentation des concentrations de cortisol après l'effort.....	92
Figure 32 : Répartition de la testostérone totale des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge.....	94
Figure 33 : Répartition de la testostérone totale des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle.....	95
Figure 34 : Répartition de la testostérone totale des sujets en fonction des situations par rapport à la taille.....	96
Figure 35 : Répartition de la testostérone libre des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge.....	98
Figure 36 : Répartition de la testostérone libre des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle.....	99
Figure 37 : Répartition de la testostérone libre des sujets en fonction des situations par rapport à la taille.....	100
Figure 38 : Répartition de [LH] des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge.....	102
Figure 39 : Répartition de [LH] des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle.....	103
Figure 40 : Répartition de [LH] des sujets en fonction des situations par rapport à la taille.....	104
Figure 41 : Répartition de [FSH] des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge....	106
Figure 42 : Répartition de [FSH] des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle.....	107
Figure 43 : Répartition de [FSH] des sujets en fonction des situations par rapport à la taille.....	108
Figure 44 : Répartition de la prolactine des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge.....	110
Figure 45 : Répartition de la prolactine des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle.....	111
Figure 46 : Répartition de la prolactine des sujets en fonction des situations par rapport à la taille.....	112
Figure 47 : Répartition de l'insuline des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge.....	114
Figure 48 : Répartition de l'insuline des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle.....	115

Figure 49 : Répartition de l'insuline des sujets en fonction des situations par rapport à la taille	116
Figure 50 : Répartition du cortisol des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge .	118
Figure 51 : Répartition du cortisol des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle.....	119
Figure 52 : Répartition du cortisol des sujets en fonction des situations par rapport à la taille	120
Figure 53 : Les variables expliquant la PMA.....	131
Figure 54 : Dispersion des résidus en fonction de la variable FC Ana	133
Figure 55 : Dispersion des résidus en fonction de la variable Taille	133
Figure 56 : Droite de Henry des résidus du modèle issu de la sélection pas à pas pour PMA	141
Figure 57 : Droite de Henry des résidus du modèle issu de la sélection d'introduction progressive pour PMA	142
Figure 58 : Droite de Henry des résidus du modèle issu de la sélection du coefficient Cp de Mallows pour PMA.....	142
Figure 59 : Evolution du lactate sanguin après l'effort.....	150
Figure 60 : Evolution de la lactatémie moyenne de nos sujets (148 sujets).....	151
Figure 61 : Ajustement de l'évolution de la lactatémie par un modèle polynomial	154
Figure 62 : Ajustement de l'évolution de la lactatémie par un modèle de rationnel.....	154
Figure 63 : Evolution du lactate sanguin pendant et après l'effort.....	156
Figure 64 : Simulation de l'évolution du lactate sanguin durant la phase de récupération	157
Figure 65 : Simulation de l'évolution du lactate sanguin durant la phase de récupération avec un niveau basal de l'ordre de 0,554 mmol/l.....	158
Figure 66 : Evolution de la lactatémie chez des cyclistes professionnels.....	172
Figure 67 : Modèle avec évolution et retour à une valeur basale de lactatémie pour des cyclistes professionnels.....	174
Figure 68 : Image du pneumotachographe MedGraphics™ Cardiopulmonary Exercise CPX/D system.....	195
Figure 69 : Masque facial pour le pneumotachographe	196
Figure 70 : Tube de pneumotachographe	196
Figure 71 : Embout buccale	197
Figure 72 : Histogramme des résidus du modèle issu de la méthode pas à pas pour PMA ...	205
Figure 73 : Histogramme des résidus du modèle issu de la méthode d'introduction progressive pour PMA.....	206

Figure 74 : Histogramme des résidus du modèle issu de la méthode du coefficient C_p de Mallows pour PMA..... 207

Chapitre I - Etude bibliographique

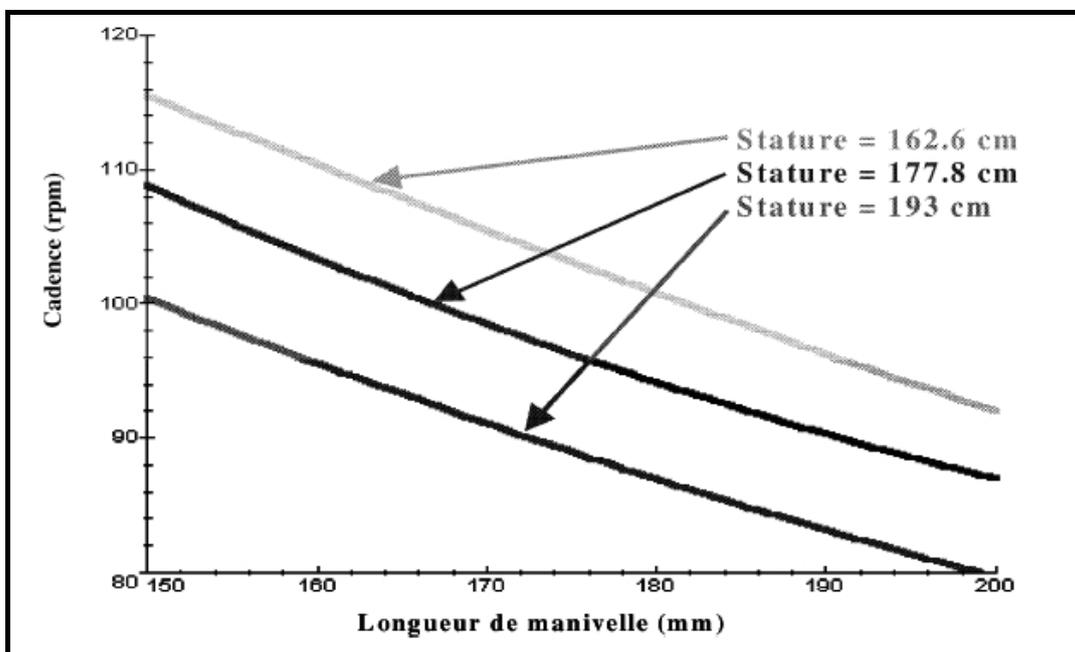
1. Introduction

Nombreux sont les travaux scientifiques qui essaient d'améliorer les conditions biomécaniques (cadence, moments de force s'exerçant au niveau du pédalier), physiques, physiologiques et psychologiques des sportifs. Tous ces domaines de recherches ont pour principal objectif de vouloir améliorer la performance sportive. Cela rejoint l'esprit du compétiteur dans la recherche du dépassement de soi, l'envie de donner toujours plus, de vouloir aller toujours plus loin. L'Homme va ainsi modifier son comportement et ce à différents niveaux afin d'être le plus performant possible. De façon à potentialiser la performance des athlètes, de nombreux auteurs (Zatsiorski (1966) ; Fox et al. (1984) ; Cazorla (1992) ; Lacour (1993) ; Weineck, (1996)) ont cherché à déterminer les paramètres qui définissent cette notion afin de l'optimiser. Leone et al. (1998) ont tenter de leur coté de montrer les paramètres qui différencient les cyclistes par rapport à d'autres athlètes. Pour expliquer la performance en cyclisme, beaucoup d'études (Davis et al. (1981) ; Ericson et al. (1988) ; Patterson et al. (1990) ; Di Prampero (2000) ; Lucia et al. (2001) ; Belli et al. (2002)) ont présentés des facteurs physiologiques et aérodynamiques ainsi que l'influence de paramètres mécaniques, biomécaniques et neuromusculaires. Hug et al.(2003) ont, avec une approche multiparamétrique, combiné des mesures anthropométriques, cardiovasculaires, respiratoires, ventilatoires et énergétiques, étudié les différences significatives pour l'ensemble de ces mesures entre les cinq épreuves de leur étude. Cependant, à notre connaissance de la littérature, aucune étude n'a tenté de combiner les caractéristiques anthropométriques, physiologiques et techniques afin de mettre en évidence les facteurs qui, provenant de chacune de ces caractéristiques, interviennent ensemble dans des modèles statistiques pour influencer la performance. Ce que nous tenterons de faire de ce manuscrit par l'étude de caractéristiques physiologiques comme les facteurs énergétiques, les facteurs limitants mais également les facteurs hormonaux par la suite associés à des caractéristiques techniques comme la cadence de pédalage, le développement ou encore la puissance ainsi qu'à des caractéristiques anthropométriques tel que l'âge, le poids et la taille Toutefois, ces caractéristiques ont toutes suscitées de façon spécifique l'intérêt de bons nombres de travaux sur l'étude de la performance en cyclisme.

1.1. La performance et les caractéristiques techniques

En ce qui concerne les caractéristiques techniques, Belluye et al. (2001), ont montré que le réglage complet du cycle nécessite une optimisation fine de la position, afin d'améliorer l'aérodynamisme de l'athlète et donc sa performance. Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser des outils d'analyse complexes, de plus, l'étude du positionnement nécessite d'aborder les aspects cinématique et dynamique de la gestuelle grâce à des outils vidéo et des capteurs d'efforts. Enfin, ils préconisent de relativiser les résultats obtenus en physiologie s'ils ne sont pas corrélés à d'autres issus de la biomécanique (cadence de pédalage, développement,...) et vice versa car l'interdépendance des différents domaines scientifiques permet d'affiner les études. En conclusion, la recherche expérimentale de ces auteurs définit uniquement des paramètres ergonomiques permettant une optimisation posturale. Cette notion d'optimisation est applicable par les cyclistes ou entraîneurs en pratique. Les paramètres ergonomiques mis en évidence consistent par exemple, en une relation entre la cadence de pédalage, la stature (taille du sujet) et la longueur de manivelle (Figure 1).

Figure 1 : Relation entre cadence de pédalage, longueur de manivelle et stature

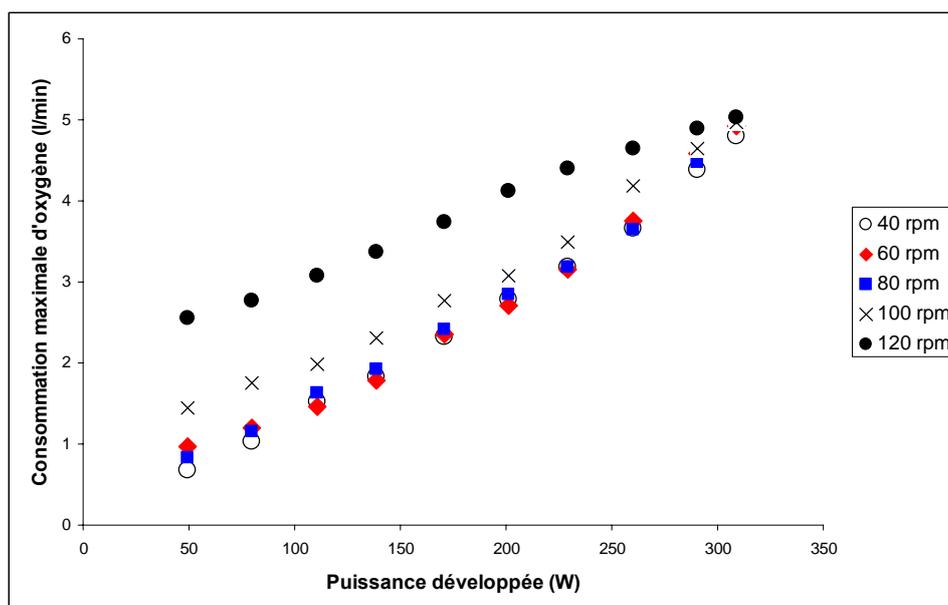


Note : Belluye et al. (2001) avaient exprimé la cadence de pédalage en fonction de la longueur de manivelle pour les différentes statures étudiées (162,6, 177,8, et 193 cm).

La cadence de pédalage semble ainsi intervenir dans la réalisation de la performance sportive car le cycliste, dans cette optique, recherche toujours à optimiser son pédalage (Grappe, (2005)). Ainsi, selon les contraintes spécifiques à chaque situation, cette optimisation peut revêtir diverses formes comme minimiser la dépense énergétique, la fatigue, l'effort ou maximiser la puissance développée, la distance parcourue ou encore la vitesse.

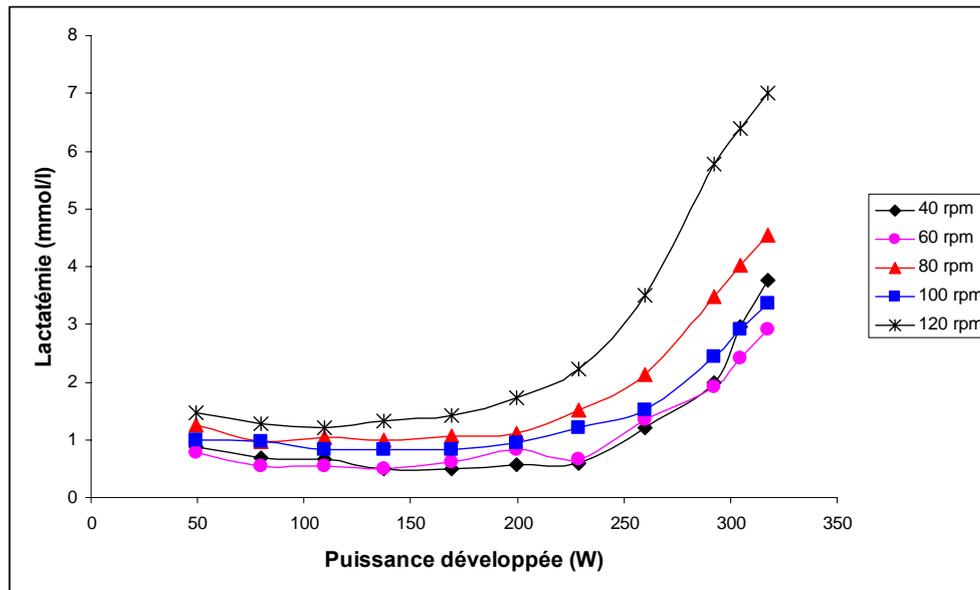
Le cycliste fait le choix de sa cadence de pédalage (ou fréquence de pédalage) lorsqu'il est dans une course mais on peut se demander si il existe une cadence optimale. D'ailleurs on pourrait même penser à l'influence sur le cycliste de l'utilisation d'une cadence trop élevée ou pas assez. Ceci a amené Zoladz et al. (2000) à étudier l'effet de différentes cadences de pédalage (40, 60, 80, 100 et 120 rotations/min) sur i) les capacités à générer une puissance, ii) la consommation d'oxygène iii) la concentration de lactate sanguin lors d'un test incrémental. Ainsi, sept sujets sains physiquement ont effectués sur ergocycle dans une première série de tests des sprints de 10 secondes (s) à six cadences de pédalages différentes (40, 60, 80, 100, 120 et 140 rotations/minute) avec un temps de récupération de 15 min entre chaque sprint puis dans une seconde série de tests, un test incrémental par paliers de 50 W toutes les 3 minutes pour chacune des cadences de pédalages excepté celle à 140 rotations/minute. Durant chaque sprint, les forces exercées sur les pédales ont été mesurées sans interruption et ont permis le calcul de la puissance en utilisant les travaux de Beelen et al. (1994) .Pour chaque sujet, ils observaient des évolutions de la consommation d'oxygène et de la lactatémie représentées dans les figures 2 et 3.

Figure 2 : Evolution de la consommation maximale d'oxygène à différentes cadences



Note : Evolution de la consommation maximale d'oxygène à chaque palier pour chacune des cadences de pédalages étudiés par Zoladz et al. (2000)

Figure 3 : Evolution de la lactatémie pour différentes cadences



Note : Evolution de la lactatémie aux différentes cadences explorées par Zoladz et al. (2000)

La puissance maximale issue des tests incrémentaux ne présente pas de différence significative entre les cadences de pédalage intermédiaires (entre 60 et 80 rotations/min (rpm) ; et entre 80 et 100 rpm). Par contre une diminution significative de cette puissance de l'ordre de 60 watts est observée entre les cadences de 40 et 120 rpm et entre 60 et 100 rpm. A 120 rpm, la relation entre la consommation d'oxygène et la puissance est moins prépondérante. Les puissances observées à des concentrations de lactate sanguin de 2 et de 4 mmol.l⁻¹ sont significativement différentes (de l'ordre de 50 watts) à 120 rpm alors que pour des cadences de 40, 60, 80 et 100 rpm, aucune différence significative ne fut observée. La puissance maximale relevée lors des sprints de 10 s augmente jusqu'à la cadence de 100 rpm. Ils ont montré alors que l'augmentation de la cadence de pédalage s'accompagnait d'une augmentation de la capacité de générer de la puissance c'est-à-dire d'une augmentation à pouvoir produire l'effort et ce jusqu'à 100 rpm. Ceci pouvant être avantageux pour les muscles en termes de fatigue et de résistance. Par contre, ils ont observé qu'au delà de cette cadence de 100 rpm, il y a une diminution de la puissance relevée pour une consommation d'oxygène associée à un début d'acidose métabolique, ce qui apparaissait comme désavantageux dans l'exécution de l'exercice de pédalage de forte intensité. Ce phénomène serait associé à l'augmentation de l'acide lactique dans l'organisme.

Plus récemment, Watson et al. (2006) ont étudié l'effet du changement de cadence de pédalage sur la performance lors d'une épreuve de 8,045 km (5 miles) sur 20 cyclistes amateurs bien entraînés. Chaque sujet a procédé à 3 épreuves dont l'ordre a été établi de

manière aléatoire : i) une épreuve à leur cadence (librement choisie ou préférée), ii) une épreuve à cadence élevée iii) et une épreuve à basse cadence. Les auteurs ont analysé, pour chaque épreuve i) la puissance, ii) la consommation d'oxygène, iii) l'économie (calculée selon le rapport de la puissance divisé par la consommation d'oxygène), iv) le lactate sanguin, v) la fréquence cardiaque, vi) la ventilation, vii) la puissance par tour de pédalage viii) la fréquence de respiration. La puissance était mesurée d'un appareil de type Tune Power-Tap (Cambridge, U.S.A). Leurs résultats montrent que l'épreuve à cadence basse présente un meilleur temps d'exécution et une puissance plus élevée par rapport à l'épreuve à cadence élevée (respectivement, 736 ± 63 secondes (s) contre 754 ± 59 s pour le temps d'exécution, $p < 0,05$ et 297 ± 30 W contre 278 ± 28 W pour le puissance, $p < 0,01$). Toujours à cadence faible, la fréquence cardiaque obtenue était significativement inférieure à celle de l'épreuve à cadence choisie ($175,8 \pm 11,4$ bpm contre $180,6 \pm 8,4$ bpm, $p < 0,05$). Au niveau de l'équivalent respiratoire en oxygène, il était significativement plus petit lors de l'épreuve à cadence basse par rapport aux autres épreuves ($p < 0,05$). Ils ont pu alors constater qu'à intensité modérée ($< 300-350$ W), l'utilisation de faibles cadences semblait plus économique que l'utilisation de cadences élevées cependant il est à noter que la consommation d'oxygène augmente avec la cadence selon des relations, soit linéaire (Marsh et al. (1997)), soit parabolique (Coast et al. (1985) ; Boning et al. (1992)) ou soit exponentielle (Hagberg et al. (1981) ; Coast et al (1985))

Etant donné que le cycliste choisit sa cadence de pédalage en tournant les membres inférieurs plus ou moins rapidement, Hintzy et al. (1998) ont comparé les caractéristiques mécaniques mesurées lors d'un sprint de 8 secondes sur un ergocyclomètre non isocinétique (Monark 818E Stockholm, Suède) avec deux types de pédales (automatiques ou sans maintien de la chaussure) pour deux groupes de cyclistes (internationaux-nationaux et régionaux). Les valeurs moyennes, par coup de pédale, de la force, de la vitesse et de la puissance maximale relevées avec les pédales automatiques étaient significativement supérieures à celles relevées avec pédales non automatiques et ce, aux deux charges de friction de 0,5 et 1,1 N.kg⁻¹ étudiées (les gains étaient respectivement de 16,5 et 15,5 % pour la force, de 6,5 et 17,4 % pour la vitesse et de 8 et 18 % pour la puissance maximale, $p < 0,001$ dans les trois cas). Ainsi d'après Hintzy et al. (1998), il semblerait que l'amélioration de la performance lors de l'utilisation de pédales automatiques, puisse être expliquée par l'augmentation de l'activation musculaire et/ou par une coordination intermusculaire améliorée.

L'économie de son énergie est primordiale pour le cycliste et Hausswirth et al. (1999) suggéraient l'existence, chez des coureurs de longue distance, de variations du pouvoir de

s'économiser en course, influençant l'ensemble des performances. Ajouté à ce facteur discriminant de la performance, un certain nombre de contraintes inhérentes à l'effort de longue durée était relevé. Parmi elles, les contraintes liées à la nature de l'environnement (dénivelé, vent, ambiance thermique, durée, ...) semblent exercer une influence non négligeable sur la valeur de la dépense en énergie. D'autres contraintes sont associées aux particularités propres à chaque individu (longueur de membres, expertise, entraînement, ...) et peuvent altérer le coût énergétique pendant l'effort, et venir ainsi modifier les performances. Ainsi, l'évaluation de l'efficacité de l'athlète à partir de la mesure du coût énergétique nécessite la connaissance préalable de l'ensemble des facteurs qui déterminent les variations de ce paramètre. Ces facteurs dépendent des caractéristiques de l'athlète ainsi que la spécificité de l'exercice pratiqué.

Outre ces facteurs, l'organisme répond à l'exercice de façon très variée et à tous les niveaux physiologiques. C'est à cause de cette variété que l'on trouve un bon nombre de travaux étudiant les caractéristiques physiologiques des cyclistes.

1.2. La performance et les caractéristiques physiologiques

Lors d'une activité physique, l'organisme se doit de répondre aux diverses contraintes qui sont très variées. L'effort musculaire provoqué par l'activité va entraîner notamment un réchauffement de la température corporelle ainsi qu'une augmentation de la consommation en oxygène. La physiologie de l'exercice va examiner les effets de l'activité physique sur les systèmes organiques (cardio-respiratoire, cardio-vasculaire, nerveux, etc...) afin d'apporter une meilleure compréhension des phénomènes bioénergétiques dans la recherche de la performance.

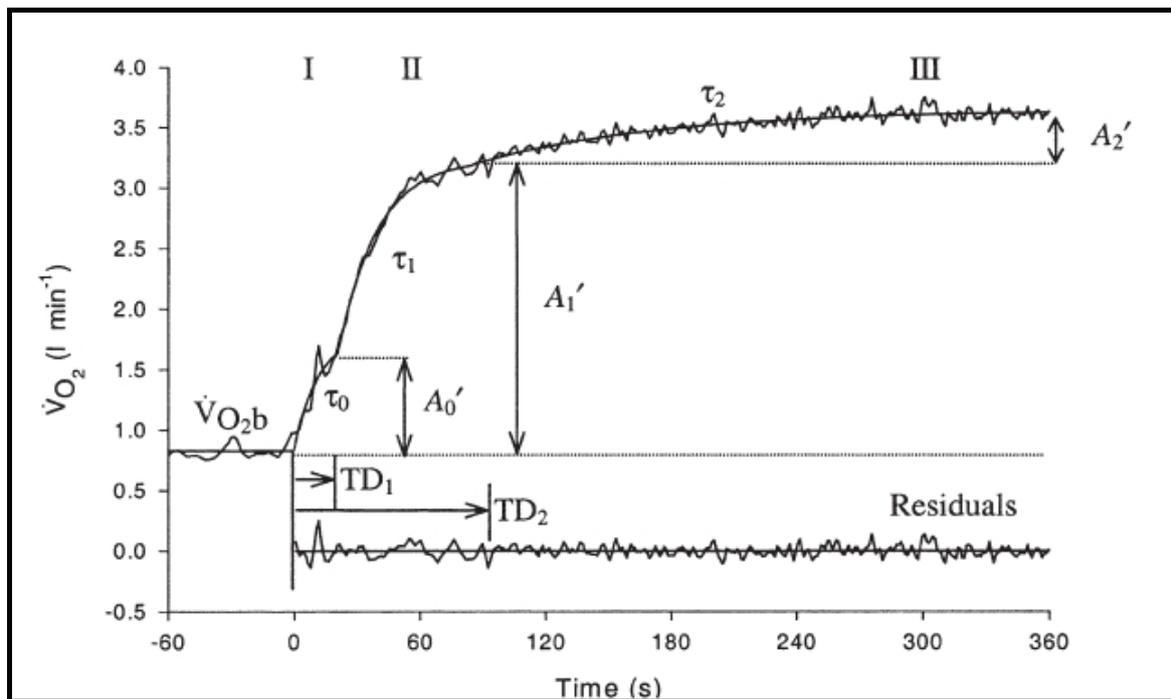
1.2.1. Facteurs énergétiques et facteurs limitants

Parmi ces paramètres, la consommation d'oxygène, la ventilation, la fréquence cardiaque et la lactatémie ont fait l'objet de nombreuses études. Fraisse et al. (1991) ont mesuré la consommation d'oxygène chez 679 adolescents des deux sexes âgés de 14 à 19 ans sur treize disciplines sportives pour les 228 filles et dix-huit disciplines sportives pour les 451 garçons. Les valeurs les plus élevées sont retrouvées dans les spécialités sportives qu'ils ont considéré comme étant à haute dépense énergétique aérobie où l'endurance cardiorespiratoire leur semble primordiale (cyclisme, aviron, course de demi-fond) et les plus basses dans les sports techniques comme l'escrime, le golf, le tennis de table ou dans les sports collectifs à petit

terrain (par exemple différence significative entre une moyenne de $\dot{V}O_2$ max de $54,8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour le joueur de tennis de table contre $69,9 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour les coureurs et entre une moyenne de $44,6 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour les escrimeurs contre $61,1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour les cyclistes)

Burnley et al. (2001) ont comparé l'effet d'un exercice préalable de cyclisme réalisé soit à faible intensité (*i.e.*, inférieure au seuil anaérobie, TD1), soit à intensité élevée (*i.e.*, supérieure au seuil anaérobie, TD2) sur l'adaptation physiologique au cours d'un exercice subséquent de cyclisme d'intensité élevée. Ils ont observé que la cinétique de la $\dot{V}O_2$, donc la performance, était significativement affectée par un exercice d'intensité élevée préalable ; tandis qu'aucun effet significatif n'a été mis en évidence à la suite d'un exercice de cyclisme de faible intensité.

Figure 4 : Modèle de la cinétique de $\dot{V}O_2$



Note : Modèle de la cinétique de la consommation d'oxygène de Barstow et al. (1996) repris par Burnley et al (2001). Il décrit l'équation :

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_2b + A_0(1 - \exp(-t/\tau_0)) + A_1(1 - \exp(-(t - TD_1)/\tau_1)) + A_2(1 - \exp(-(t - TD_2)/\tau_2))$$

où $\dot{V}O_2b$ est la consommation d'oxygène trois minutes avant le début de l'exercice ; A_0 , A_1 et A_2 sont les amplitudes des courbes exponentielles ; τ_0 , τ_1 et τ_2 sont les constants de temps ; et TD_1 et TD_2 représente les intensités d'exercice en fonction du temps.

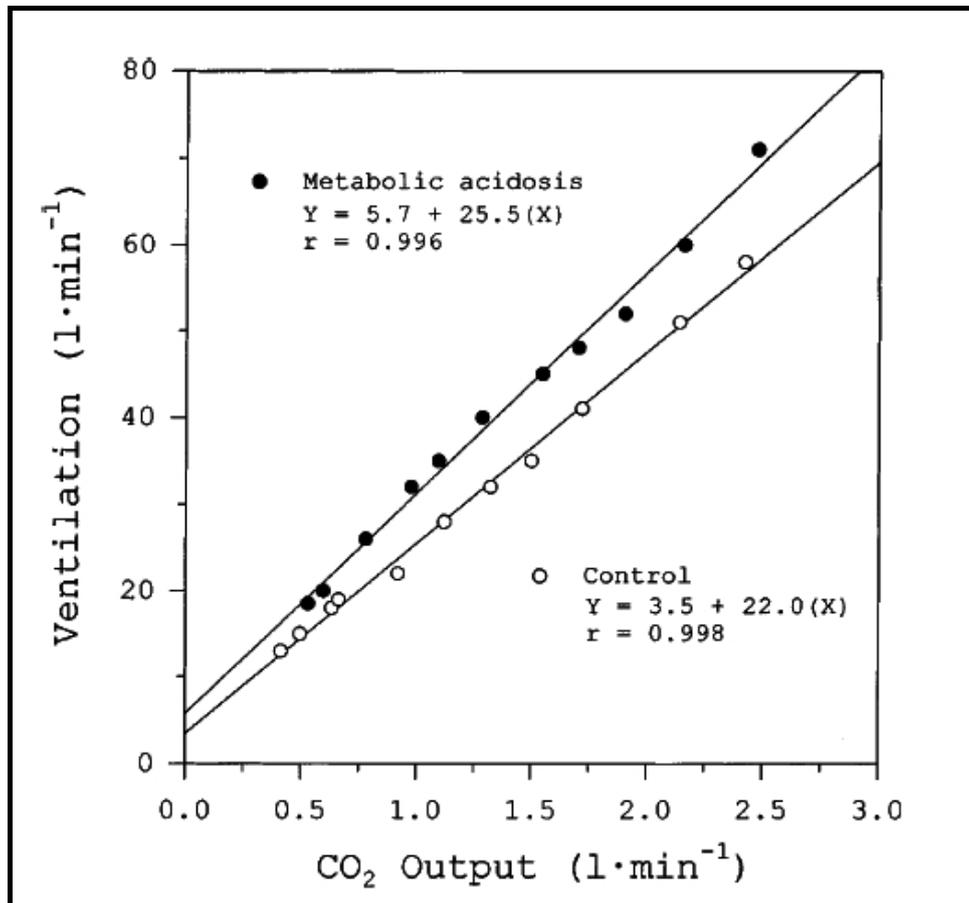
Schneider et al. (1997) ont cherché à déterminer comment la relation linéaire entre le débit de dioxyde de carbone et la ventilation pulmonaire était modifiée après un exercice préalable (plusieurs études avaient auparavant démontré une étroite liaison entre ces deux variables qui

était altérée durant la réalisation d'un test incrémental consécutif à un exercice induisant l'acidose métabolique (Casaburi et al. (1977, 1978) ; Oren et al. (1981) ; Powers et al. (1985) ; Caiozzo et al. (1987) ; Mc Lellan et al. (1989)). Pour cela, Schneider et al. (1997) ont fait passer à dix femmes non entraînées deux tests incrémentaux par paliers de 15 Watts/min et ce jusqu'à 165 Watts sur ergocycle sur deux jours distincts. Un des tests incrémentaux était effectué sans exercice préalable, il s'agissait du groupe contrôle, alors que l'autre était fait après un exercice intense sur ergocycle d'une minute et un repos de huit minutes. La répartition de la réalisation des tests a été faite de manière aléatoire. Par ailleurs, à 165 Watts la fréquence cardiaque correspondait, dans leurs conditions, à environ 90 % de celle maximum prévue en fonction de l'âge du sujet. Le but de ce protocole était d'éliminer les données au dessus du seuil respiratoire de compensation, où la ventilation pulmonaire et le débit de dioxyde de carbone ne sont plus linéairement corrélés. Leurs résultats montrent une différence significative entre le lactate sanguin obtenu 2 min avant le début du test incrémental entre le groupe contrôle et le groupe avec l'exercice préalable ($1,2 \pm 0,1 \text{ mmol.l}^{-1}$ contre $10,4 \pm 0,3 \text{ mmol.l}^{-1}$ respectivement ; $p < 0,05$). Ils ont noté également pour le lactate sanguin, une différence significative après l'exercice intense. Le débit d'oxygène augmentait de façon significative durant l'effort incrémental pour des puissances allant de 15 à 120 Watts dans le cas d'un exercice préalable intense mais aucune différence ne fut observée avec l'effort incrémental sans exercice préalable. Le débit de dioxyde de carbone ne présentait, lui, aucune différence significative entre les deux protocoles pour tous les paliers observés. Du reste, La ventilation présentait, elle, des valeurs significativement plus élevées entre 15 et 90 Watts. L'équivalent respiratoire en oxygène, qui représente le rapport entre le volume d'air ventilé et la consommation d'oxygène par les tissus, augmentait par rapport au groupe contrôle seulement à 15, 30, 45 et 60 Watts alors qu'au dessus de 60 Watts, il n'y avait aucune différence entre les deux protocoles. L'équivalent respiratoire en dioxyde de carbone (rapport entre la quantité d'air respirée et la quantité de dioxyde de carbone produite en 1 min) quant à lui était supérieur dans le cas d'un exercice préalable pour chaque palier (excepté 165 W). L'équivalent respiratoire en oxygène indique que le système respiratoire équilibre les besoins de l'organisme en oxygène (Costill, (1970)) et est un indicateur de l'économie respiratoire (Wilmore et al. (1994)).

De ce fait, Schneider et al (1997) de leur examen de la relation entre ventilation et débit de dioxyde de carbone ont obtenu une pente et une ordonnée à l'origine significativement plus élevées ($p < 0,05$) dans le cas où l'effort est précédé d'un exercice intense d'une minute (Figure 5). Ces résultats tendent à confirmer le fait que la ventilation et le débit de dioxyde de

carbone sont étroitement liés à la circulation centrale lors d'un exercice dynamique. Ainsi l'accroissement qui est constaté pour ces deux paramètres favorise la production d'énergie étant donné que la ventilation est destinée à éliminer le dioxyde de carbone produit en excès à l'exercice.

Figure 5 : Relation entre la ventilation et le débit de dioxyde de carbone



Note : Schneider et al. (1997) ont représenté la relation linéaire entre la ventilation et la consommation d'oxygène pour un test incrémental sans exercice préalable (○) et pour un test incrémental après un exercice intense d'une minute (●)

Cependant, d'autres études ont démontré une augmentation brutale de la ventilation par rapport au débit de dioxyde de carbone durant un l'exercice de pédalage dans certaines conditions comme, une déplétion des stocks de glycogène avant l'exercice (Green et al. (1978) ; Segal et al. (1979) ; Hughes et al. (1982) ; Heigenhauser et al. (1983)), une altération de la vitesse de pédalage durant l'exercice (Hughes et al. (1982)), ou encore après un exercice de pédalage préalable (Buono et al. (1982)). Ce qui signifie que d'autres facteurs que le dioxyde de carbone et le pH sont responsables de l'augmentation brutale de la ventilation qui est disproportionnée par rapport aux besoins de l'organisme en oxygène, ainsi et par exemple,

le contrôle de la ventilation est sous la dépendance de l'activité musculaire générale (Meyer. (1983)). D'ailleurs, Whipp et al. (1998) ont dans leur revue de littérature des déterminants du contrôle respiratoire lors de l'exercice musculaire conclu que les contributions et les interactions des mécanismes proposés auparavant étaient incertaines du fait que la ventilation durant l'exercice musculaire était fonction :

- de la transformation de certains substrats par oxydation
- des décalages de production métabolique et d'élimination de CO₂ dans les différents muscles
- des réductions de lactate sanguin résultant d'entraînement d'endurance.

Ils suggèrent alors (tout comme Wilmore et al. (1994) l'avaient fait auparavant) que même si le système respiratoire joue un rôle crucial dans l'ajustement rapide de l'état acido-basique de l'organisme durant et après l'exercice, le contrôle de cet équilibre dépasse le simple contrôle respiratoire, notamment il y a intervention des reins (Meyer. (1983)). L'exercice musculaire intense a pour résultat une production et une accumulation d'acide lactique et d'ions H⁺ et ce phénomène peut altérer le fonctionnement énergétique du muscle et diminuer sa force de contraction conduisant à limiter la performance (Whipp et al.(1998)). Notion toutefois discutable car ces deux molécules augmentent l'irrigation musculaire (Meyer. (1983)).

Koppo et al. (2001) avaient examiné les effets des composantes rapide et lente de la consommation d'oxygène séparément car les conclusions des précédentes études de l'effet d'un exercice préalable sur la cinétique de la consommation d'oxygène lors d'un exercice de forte intensité étaient généralement basées sur les changements observés sur la consommation d'oxygène globale sans prendre en compte les effets des composantes rapide et lente de la consommation d'oxygène (Gerbino et al. (1996), MacDonald et al. (1997), Bohnert et al. (1998)). La composante lente de la consommation d'oxygène étant défini comme un excès de consommation d'oxygène. Par conséquent, Koppo et al. (2001) ont étudié 10 sujets qui ont effectué sur ergocycle, 3 minutes de pédalage sans puissance puis deux exercices à une puissance constante correspondant à 90 % du pic de la consommation d'oxygène (Ex-1 et Ex-2). Pour déterminer le pic de la consommation d'oxygène et la puissance observé à 90 % de ce pic, chaque sujet à exécuté un test préliminaire incrémental par palier de 40 Watts toutes les 3 minutes à une cadence approximative de 65 rpm. Ainsi, à l'aide de ce protocole, ils ont obtenu des informations sur la cinétique de la consommation d'oxygène lors d'un exercice à puissance constante de forte intensité (6 min de pédalage à la puissance équivalent à 90 % du pic de la consommation d'oxygène) après 3 min de pédalage à puissance nulle (ils ont considéré ce cas comme étant « sans exercice préalable », du fait que ce soit pas un exercice sans aucune charge) dans un premier temps (Ex-1) et après un exercice de 3 minutes de

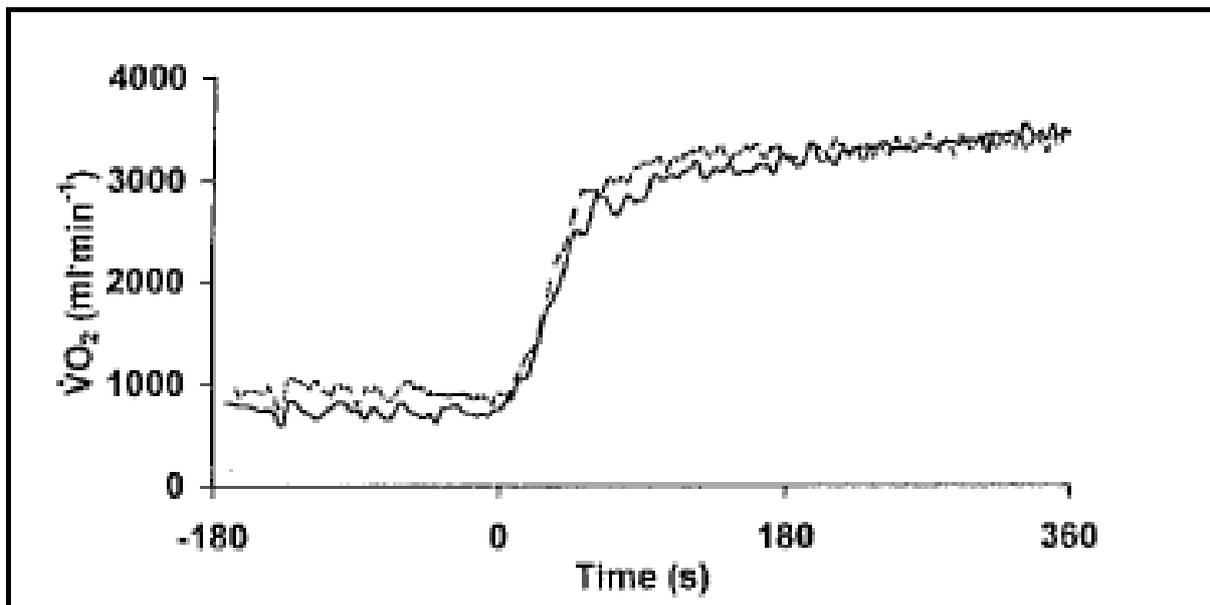
pédalage à puissance constante (90 % du pic de $\dot{V}O_2$) dans un deuxième (Ex-2). Chaque exercice était séparé par 3 min de repos et 3 min de pédalage à vide et chaque sujet a effectué 4 fois ce protocole avec une séparation d'au moins un jour entre les expérimentations. La consommation d'oxygène était mesurée par un analyseur de gaz (Medgraphics CPX/D system) et les courbes furent analysées par un modèle bi-exponentiel de la forme :

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_{2_{repos}} + A_1(1 - e^{-(t-Tr1)/\tau1}) + A_2(1 - e^{-(t-Tr2)/\tau2})$$

Ce modèle bi-exponentiel inclut deux amplitudes (A_1 et A_2), deux constants de temps (τ_1 et τ_2) et deux temps de retard (Tr_1 et Tr_2) déterminés en utilisant un algorithme des moindres carrés non linéaires. A_1 , τ_1 et Tr_1 sont caractéristiques de la composante rapide de la consommation d'oxygène et A_2 , τ_2 et Tr_2 de la composante lente.

Ils ont obtenu la représentation suivante de l'évolution de la consommation d'oxygène pour les deux exercices (Ex-1 et Ex-2).

Figure 6 : Evolution de la consommation d'oxygène entres deux exercices (Ex-1 et Ex-2)



Note : Koppo et al. (2001) ont représenté l'évolution de la consommation d'oxygène lors d'un exercice de six minutes à charge constante, soit après 3 minutes de pédalage à charge nulle (—), soit après 3 minutes de pédalage à 90 % de $\dot{V}O_2$ max (---).

Ces auteurs n'ont pas constaté de variations significatives au niveau des paramètres de la composante rapide de la consommation d'oxygène entre les deux protocoles (Ex-1 vs Ex-2). Par contre, malgré le fait que les consommations d'oxygènes des deux protocoles paraissent superposées, ils ont constaté, pour les paramètres de la composante lente de la consommation

d'oxygène, des différences significatives ($p < 0,05$ entre Ex-1 et Ex-2). En effet la constante de temps et l'amplitude de la composante lente de la consommation d'oxygène étaient réduits respectivement de 44 et 49% par rapport au protocole sans exercice préalable (Ex-1). Ils concluaient ainsi que l'effet, d'un exercice préalable, sur la cinétique de la consommation d'oxygène lors d'un exercice de forte intensité est probablement limité à un effet sur la composante lente uniquement.

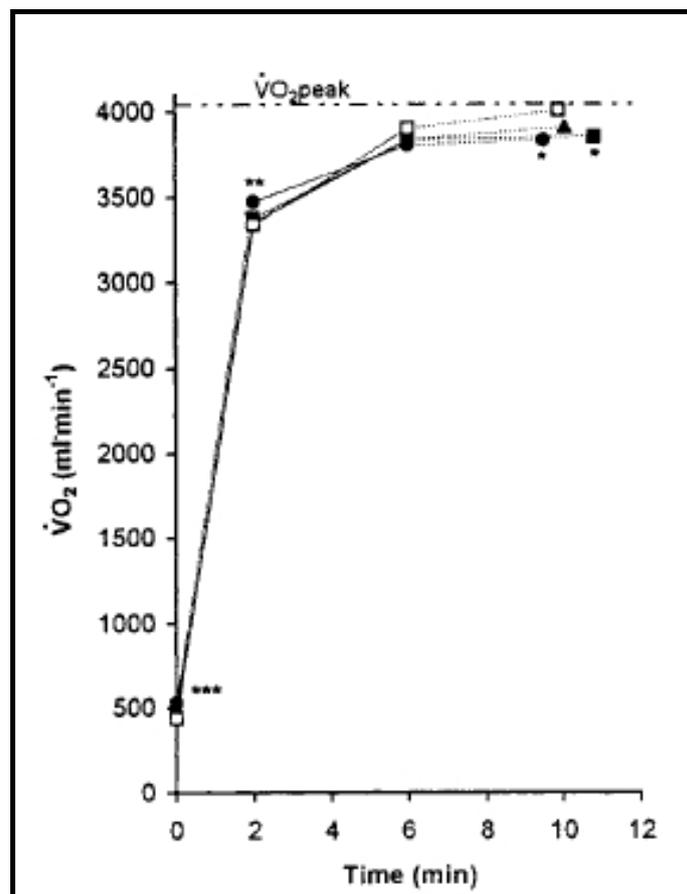
Dans une autre étude, Koppo et al. (2002) ont voulu montrer que la diminution de la composante lente induit par un exercice préalable n'affectait pas la durée du temps à pouvoir soutenir un effort et ce jusqu'à l'épuisement. Etant donné que des précédentes études relatant une diminution de la composante lente de la consommation d'oxygène avaient été observées après un exercice de forte intensité et que les effets observés après un exercice de faible intensité étaient sujets à controverse (Gerbino et al. (1996) ; MacDonald et al. (1997) ; Bohnert et al. (1998), Burnley et al. (2000) ; Koppo et al. (2000,2001)), Koppo et al. (2002) avaient cette fois examiné les effets d'un exercice à faible intensité sur la composante lente de la consommation d'oxygène chez 10 sujets. Chaque sujet effectuait 4 protocoles consistant en un exercice à puissance élevée (95 % du pic de la consommation d'oxygène) jusqu'à épuisement précédé :

- soit d'aucun exercice préalable,
- soit d'un exercice de 6 min à 95 % du pic de $\dot{V}O_2$,
- soit d'un exercice de 6 min à faible intensité (50 % du pic de $\dot{V}O_2$),
- où soit d'un exercice de 12 min à faible intensité.

Ils ont alors observé i) la consommation d'oxygène, ii) la lactatémie, iii) la fréquence cardiaque iv) et la durée d'exercice jusqu'à l'épuisement et ont remarqué des différences significatives entre le cas où l'exercice préalable était de forte intensité (95 % du pic de $\dot{V}O_2$) et les autres cas. Lorsque l'exercice est précédé d'un exercice de forte intensité, ils constatent une consommation d'oxygène après deux minutes d'exercice plus élevée que par rapport aux autres protocoles. Ils ont calculé la différence entre la consommation d'oxygène après 2 min d'exercice et la consommation d'oxygène après 6 min d'exercice, ainsi que la différence entre la consommation d'oxygène après 2 min d'exercice et celle en fin d'exercice (cette dernière représentant la composante lente de la consommation d'oxygène). Cette composante lente apparaissait comme moins élevée dans les conditions d'un exercice préalable de 6 min à 95 % de $\dot{V}O_2$ max que par rapport à un exercice préalable de faible intensité. La lactatémie du début

d'exercice était significativement supérieure après un exercice préalable de forte intensité mais pas la lactatémie de fin d'exercice. Le même phénomène se traduisait pour la fréquence cardiaque où la différence n'était constatée qu'en début d'exercice avec une valeur plus élevée dans le cas également d'un exercice préalable de forte intensité. Enfin ils n'ont constaté aucune différence significative de la durée d'exécution de l'exercice jusqu'à l'épuisement entre les différents protocoles.

Figure 7 : Evolution de la consommation d'oxygène pour quatre protocoles



Note : □ : sans exercice préalable, ■ : avec un exercice préalable de faible intensité (6 min), ▲ : avec un exercice préalable de faible intensité (12 min), ● : avec un exercice préalable de forte intensité (6 min)

Koppo et al. (2002) ont ainsi conclu que la composante lente de la consommation d'oxygène était réduite dans le cas d'un exercice préalable de faible intensité par rapport à un exercice préalable de forte intensité mais cette réduction ne permettait pas d'augmenter la durée d'exercice, ils rejetèrent alors l'hypothèse qu'une atténuation de la composante lente de la

cinétique de la consommation d'oxygène puisse augmenter la capacité de pouvoir soutenir un effort lors d'un exercice, facteur essentiel dans la réalisation de la performance.

Marles et al. (2005) ont comparé l'effet d'un exercice préliminaire de forte intensité sur la relation consommation d'oxygène-puissance lors d'un exercice incrémental et lors d'un exercice à puissance constante. Ils ont émis l'hypothèse que l'augmentation disproportionnée de la consommation d'oxygène rapportée à puissance élevée durant un test incrémental pouvait être la résultante du même mécanisme physiologique (c'est-à-dire lié à la l'augmentation de la ventilation favorisant la production énergétique) que celui de la composante lente de la cinétique de consommation d'oxygène observée lors d'un exercice à puissance constante. Dans cette étude, dix cyclistes sprinters entraînés ont effectué trois tests sur ergocycle :

- Tout d'abord un premier test incrémental par palier de 35 W toutes les deux minutes jusqu'à épuisement, puis après deux minutes de repos et trois minutes de pédalage à 35 W,
- un deuxième test consistant en un exercice de pédalage de six minutes à puissance constante (la puissance correspondant à 90 % de la consommation d'oxygène maximale $\dot{V}O_2$ max atteinte pendant le test incrémental, cette intensité étant nécessaire pour l'observation de la composante lente) suivi de 6 min de pédalage à 35 W.
- et enfin, un dernier test où après un repos de deux minutes et trois minutes de pédalage à 35 W, les sujets exécutaient deux exercices similaires à puissance constante (90 % de $\dot{V}O_2$ max) séparés par six minutes de pédalage à 35 W et suivis également de six minutes de pédalage à la cette même cadence.

Leurs résultats leur ont permis de mettre en évidence la présence d'une forte augmentation de la consommation d'oxygène lors de test incrémental chez des sprinters entraînés mais que ce phénomène n'était pas affecté par un exercice préliminaire alors que la composante lente de $\dot{V}O_2$ diminuait probablement lors d'un exercice rectangulaire. Ainsi l'exercice préliminaire n'a pas le même effet sur la composante lente de $\dot{V}O_2$ et sur la forte augmentation de $\dot{V}O_2$ durant le test incrémental, ils n'étaient donc pas en mesure d'établir une liaison entre les mécanismes responsables de la composante lente et ceux responsable de l'augmentation de $\dot{V}O_2$ durant un test incrémental.

Mattern et al. (2001) ont placé l'augmentation de la ventilation et de la consommation d'oxygène et leur impact sur la performance dans une dimension technico-tactique car dans la majorité des épreuves de cyclisme, elle prend une part importante dans l'établissement de la

performance de l'athlète (Wilmore et al. (1994)). Mattern et al. (2001) ont donc étudié en l'impact d'une stratégie de départ d'un exercice de pédalage de 20 km sur la performance réalisée. Ils se sont focalisés sur les quatre premières minutes d'une épreuve de 20 km sur ergocycle. Pour ce faire, trente cyclistes entraînés masculins ont fait une série de 3 tests.

Lors du premier, le sujet effectuait l'épreuve de 20 km à la cadence qu'il voulait. Ils ont calculé la moyenne de la puissance obtenue durant l'épreuve pour déterminer une puissance de référence pour chaque sujet.

Ainsi lors des deux tests suivants, les sujets commençaient les quatre premières minutes de l'épreuve soit à 15% en dessous de la puissance de référence, précédemment déterminée, soit à 15% au dessus de cette puissance de référence. L'ordre de passation était décidé de façon aléatoire.

Après ces 4 minutes, ils devaient finir l'épreuve le plus vite possible. L'épreuve se terminait significativement plus vite lors d'un départ à 15 % en dessous de la puissance de référence que lors d'un départ à une puissance de 15 % supérieur à la puissance de référence établie par rapport à la première épreuve où le sujet utilisait la cadence qu'il souhaitait (gains de temps respectifs de $-2,54 \pm 0,54 \%$ vs $-1,15 \pm 0,48 \%$, $p < 0,05$).

La lactatémie relevée à la quatrième minute de l'épreuve était inférieure dans le cas d'un départ à une puissance inférieure de 15 % à la puissance de référence que par rapport aux autres départs étudiés ($4,87 \pm 0,73 \text{ mM.l}^{-1}$ contre $9,78 \pm 1,05 \text{ mM.l}^{-1}$ pour un départ à cadence choisie par le sujet et contre $11,54 \pm 1,00 \text{ mM.l}^{-1}$ pour un départ à une puissance supérieure de 15 % à la puissance de référence. De la 4^{ème} minute d'exercice jusqu'à la fin de l'épreuve (c'est-à-dire au moment où l'athlète devait finir la course la plus rapidement possible), aucune différence n'était constatée pour la ventilation et la fréquence cardiaque par rapports aux différents protocoles étudiés. Cependant, pour la consommation d'oxygène, la consommation d'oxygène au seuil lactique et la puissance, les valeurs observées étaient plus élevées lorsque le départ avait été effectué à une puissance de 15 % inférieure à celle de référence que dans les autres protocoles ($3,90 \pm 0,43 \text{ l.min}^{-1}$ contre $4,37 \pm 0,44 \text{ l.min}^{-1}$ et $4,65 \pm 0,48 \text{ l.min}^{-1}$ dans les autres cas). Ils ont conclu ainsi que pour ces stratégies de départ, la valeur initiale de lactatémie constatée pouvait avoir réduit la capacité de travail du muscle actif, ceci réduisant ainsi la performance.

La réalisation d'une performance, induit un certains nombre d'adaptations cardiovasculaires qui concernent en autres les dimensions du cœur, le volume d'éjection systolique, la fréquence cardiaque, le débit cardiaque, ... La fréquence cardiaque, du fait de sa liaison avec la consommation d'oxygène et de sa facilité d'obtention, présente un intérêt considérable

surtout que c'est l'un des facteurs qui conditionnent le débit cardiaque et de ce fait, il représente un bon index de l'intensité de l'exercice.

Ainsi, Lucia et al. (1998) ont comparé les réponses physiologiques à un exercice lors d'un test incrémental sur ergocycle entre 25 cyclistes professionnels et 25 cyclistes espoirs. Ils ont mesuré i) la consommation d'oxygène, ii) la ventilation pulmonaire, iii) les équivalents respiratoires en oxygène et en dioxyde de carbone, iv) le quotient respiratoire (qui correspond au rapport entre la quantité de dioxyde de carbone rejetée et la quantité d'oxygène consommé), v) les seuils ventilatoires 1 et 2 correspondants au niveau à partir duquel la cinétique de la respiration change, vi) le lactate sanguin, vii) la fréquence cardiaque. Leurs résultats indiquent une différence significative entre le seuil ventilatoire 2 de chaque groupe aux intensités sous maximales ($80,4 \pm 6,6$ % de $\dot{V}O_2$ max pour le groupe « espoir » contre $87 \pm 5,9$ % de $\dot{V}O_2$ max pour le groupe « professionnel », $p < 0,001$). A intensité modérée (< 300 W), la concentration de lactate était similaire entre les deux groupes ($p > 0,05$) alors qu'à intensité maximale, elle était significativement plus forte chez les cyclistes espoirs que chez les cyclistes professionnels ($p < 0,05$). Lucia et al. ont pu conclure ainsi que comparé aux cyclistes espoirs, les cyclistes professionnels présentaient de remarquables caractéristiques physiologiques telle une plus forte valeur observée au deuxième seuil ventilatoire, permettant la lipolyse, même pour des puissances observées très élevées. Millet et al. (2004) ont eu rapporté les réponses physiologiques lors d'une course à pied après un effort de pédalage entre des triathlètes seniors (9 hommes et 9 femmes) et des triathlètes juniors espoirs (7 hommes et 6 femmes). Les triathlètes seniors masculins et féminins semblaient se distinguer principalement par une puissance observée plus élevée lors de l'épreuve de cyclisme ($384,7 \pm 50,2$ W vs $354,3 \pm 20,9$ W pour les hommes, $p < 0,05$ et $292,8 \pm 20,9$ W vs $268,3 \pm 19,4$ W chez les femmes, $p < 0,05$) et pour les seniors féminines par une dépense énergétique durant la course après l'épreuve de pédalage plus faible que sans épreuve de pédalage préliminaire par rapport aux juniors féminines ($-1,6 \pm 4,7$ %, $p < 0,05$). De plus, ils avaient constaté un seuil ventilatoire supérieur chez les seniors hommes et femmes ($83,9 \pm 4,5$ % $\dot{V}O_2$ max vs $74,4 \pm 10,1$ % $\dot{V}O_2$ max, $p < 0,01$ et $80,5 \pm 7,09$ % $\dot{V}O_2$ max, $p < 0,01$ respectivement) pouvant peut-être provenir des différences dues aux réponses hormonales fournies par l'organisme au cours de l'exercice entre les seniors et les juniors, identifiant l'âge des sujets en tant que facteur influençant la performance.

Par ailleurs, Laiche et al. (1995), partant du constat que la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max) est considérée comme l'un des meilleurs indicateurs du potentiel

d'endurance chez les coureurs de fond (Astrand et al. (1980) ; Costill et al. (1969,1973) ; Foster. (1983) ; Hagan et al. (1981)) ont étudié les dépenses énergétiques et ses limites en laboratoire (sur tapis roulant) et sur le terrain (sur piste d'athlétisme) sur dix huit sujets dont 13 coureurs de fond et 5 étudiants en éducation physique et sportive. Les variables analysées étaient la consommation d'oxygène, la vitesse maximale aérobie et la lactatémie. Les résultats indiquaient que la VMA et la $\dot{V}O_2$ max sont significativement plus basses sur le terrain (18,11 contre 19,78 km.h⁻¹, p < 0,001 et 56,25 contre 61,93 ml.min⁻¹.kg⁻¹, p < 0,001 respectivement). Mais la lactatémie n'est pas différente entre les deux situations. Ils ont remarqué, aussi bien en laboratoire que sur le terrain, que la VMA était obtenue à un voire deux paliers avant celui correspondant à la fin de l'épreuve chez certains athlètes. Cela suppose que la VMA ne correspond pas systématiquement au dernier palier que l'athlète est en mesure d'effectuer en entier, comme le suggèrent certains auteurs utilisant les épreuves de terrain dans leur expérimentations (Léger et al. (1980, 1983) ; Lacour et al. (1990)). Le calcul du coût énergétique proposait des valeurs significativement supérieures sur le terrain (162,5 ± 11,83 mL.kg⁻¹.km⁻¹ en laboratoire contre 170,25 ± 14,02 mL.kg⁻¹.km⁻¹ sur le terrain) apportant un argument en faveur de la diminution de la vitesse sur le terrain pour un même $\dot{V}O_2$ et donc en faveur de l'intervention plus précoce du métabolisme anaérobie au cours d'une épreuve de course à vitesse croissante. Les résultats de Laiche et al. (1995) induisent alors que l'évaluation de la $\dot{V}O_2$ max est plus indiquée en laboratoire car une plus grande masse musculaire y est sollicitée et de plus, étant donné que la $\dot{V}O_2$ max est inférieure sur le terrain. Le matériel utilisé pour déterminer $\dot{V}O_2$ max sur le terrain était le même que celui utilisé en laboratoire, il s'agit d'un système télémétrique miniaturisé portable de type K2. Leurs conclusions indiquaient alors que les résultats de laboratoire ne sont pas forcément le reflet de ceux obtenus dans des conditions de terrain mais que la consommation d'oxygène était mieux évaluée en laboratoire car plus appropriée pour une sollicitation optimale des masses musculaires requises. Parallèlement à cela, quelques recommandations sur la fréquence cardiaque furent données par Roecker et al. (2003) concernant le transfert de résultats issus de la course à pied vers le cyclisme car avec l'accroissement de l'utilisation des appareils de mesure portable dans les sports d'endurance, la fréquence cardiaque est de plus en plus employée comme marqueur de l'intensité d'exercice. Roecker et al. (2003) conseillent alors que pour assurer la fiabilité de la fréquence cardiaque, elle doit être mesurée lors d'un test spécifique à la discipline pratiquée.

Lorsque Hug et al. (2003) ont voulu caractériser les capacités physiques d'une population de huit cyclistes professionnels au moyen d'une approche multiparamétrique combinant des mesures anthropométriques, cardiovasculaires, respiratoires, ventilatoires et énergétiques. Ils ont obtenu que les cyclistes professionnels présentent une différence significative entre la PMA (puissance maximale aérobie) et la PMT (puissance maximale tolérée) ce qui confirme le fait que le degré d'entraînement des sujets leur permet de maintenir plus longtemps un effort à la VMA (correspondant à $\dot{V}O_2$ max). L'absence de variation significative des valeurs de temps limite lors de plusieurs épreuves suggèrerait la bonne faculté de récupération des cyclistes professionnels. Ils proposèrent de poursuivre ce travail par une étude en bioénergétique musculaire non invasive utilisant la spectro-RMN pour mesurer précisément la vitesse de récupération du pH et des composés phosphorylés (ATP, PC, Pi). Cette notion de pH est associée à l'équilibre acido-basique de l'organisme et en 1984, Buono et al. ont déterminé le schéma de l'accumulation du lactate sanguin et de l'ion ammonium durant un exercice de pédalage chez une population de six sujets. Le test se déroulait sur ergocycle et ils ont constaté que le lactate sanguin et l'ion ammonium augmentaient de façon exponentielle avec l'accroissement de l'exercice. L'examen des différentes courbes a indiqué que les deux métabolites sont restés au niveau basal durant l'exercice modéré ($< 40\% \dot{V}O_2$ max) ainsi que de brusques points d'arrêt ascendants aux charges de travail accrues ($> 50\% \dot{V}O_2$ max). Ils ont trouvé une relation linéaire entre la charge de travail correspondant au point d'inflexion de l'accumulation de lactate sanguin et celle correspondant au point d'inflexion de l'accumulation de l'ion ammonium pour chaque sujet ($r = 0,96$) ainsi qu'une relation également linéaire entre les concentrations sanguines de lactates et d'ions ammoniums ($r = 0,82$). Les résultats suggèrent une liaison entre la production d'ion ammonium et le métabolisme énergétique glycolytique pendant l'exercice mais, même si plusieurs explications sont possibles, un travail au niveau cellulaire est nécessaire pour mieux connaître cette relation. Dans cette optique, Stringer et al. (1992) ont étudié le métabolisme acido-basique durant le repos, l'exercice et la récupération chez des sujets non entraînés lors d'un exercice à puissance constante. Ils ont ainsi mesuré le pH artériel, la pression partielle de CO_2 , le bicarbonate, la lactatémie et la ventilation avant, pendant et après trois exercices à puissance constante de 6 minutes à différentes intensités (modérée, forte, et très forte) pour chaque sujet. Ils ont obtenu une petite acidose respiratoire lors de toute la durée de l'exercice à intensité modérée alors que pour les exercices à forte et très forte intensité, l'acidose respiratoire était rapidement suivie par l'acidose métabolique. Durant la période de

récupération, le pH artériel est rapidement revenu à la valeur de repos pour l'exercice à intensité modérée tandis que pour les exercices de forte et très forte intensité, le retour à la valeur de repos est beaucoup plus lent. Ils en sont alors arrivés à la conclusion que l'acidose métabolique était associée à la réaction du pH artériel pour des exercices à intensité modérée, forte, et très forte sur ergocycle et que cette acidose était atténuée mais pas éliminée par la réponse ventilatoire. Lors de la période de récupération, le retour à une valeur de repos du pH artériel et du bicarbonate semble être lié à l'élimination du lactate sanguin.

De part l'implication de la lactatémie dans la réalisation de la performance, Brooks (1986) a montré que la majeure partie du lactate formé pendant un effort soutenu (plus de 75 % de la quantité de lactate formé) est éliminée par oxydation pendant l'exercice et seulement une fraction mineure (environ 20% de la quantité totale) est transformée en glucose. Pendant la phase de récupération consécutive à un exercice soutenu, la majeure partie du lactate accumulé pendant l'exercice continuera à être enlevée par oxydation directe. Cependant, durant la récupération, le taux d'acide lactique dans les muscles diminue et le lactate devient le substrat préféré pour la gluconéogenèse hépatique alors que la même année, Astrand et al. (1986) étudiaient sept sujets bien entraînés et obtenaient qu'approximativement 50% du lactate formé pendant un exercice lourd était transformé en glycogène par l'intermédiaire de la glyconéogenèse dans le muscle pendant la phase de récupération et 10% était absorbé par le foie. Toutefois, les travaux de Bangsbo et al. (1991) ne fournissent pas les mêmes valeurs. Ils ont examiné, sur sept sujets âgés de 22 à 27 ans, la glyconéogenèse intramusculaire du lactate après un exercice intense sur un groupe de sept sujets et ont estimé que 13 à 27% du lactate avait été transformé en glycogène. Ils proposèrent que la consommation d'oxygène élevée remarquée pendant la récupération soit liée à l'utilisation métabolique du triacylglycérol intramusculaire. Toujours dans cette optique de recherche de performance, Plato et al (2008) ont déterminé un récent modèle prédictif du seuil lactique en utilisant le seuil ventilatoire, le seuil lactique étant un point de référence important dans la mise en place de l'entraînement d'endurance de l'athlète (Whipp et al. 1998). Pour Plato et al.(2008), le seuil ventilatoire était utilisé comme estimateur non invasif du seuil lactique mais il apparaissait comme sous estimant l'intensité d'entraînement chez un grand nombre d'athlètes. Ils ont obtenu un modèle avec un coefficient de détermination $r^2 = 0,70$. Ce modèle est basé sur la méthode de détermination du seuil lactique de Cheng et al. (1992). Elle part du constat que l'augmentation disproportionnée de la ventilation et de la consommation d'oxygène avait conduit à penser que le seuil ventilatoire pouvait être en relation avec le seuil

lactique 1 (c'est-à-dire avec l'intensité d'exercice pour laquelle la lactatémie s'élève au dessus des valeurs de repos, lors d'un effort progressivement croissant) (Costill, (1970)).

1.2.2. Facteurs hormonaux

Afin de mieux décrypter les relations entre métabolisme énergétique et réponse hormonale à l'exercice, de nombreux auteurs ont voulu caractériser les réponses fournies par l'organisme lors de l'effort. C'est ainsi que Wheeler et al. (1984) ont étudié si des spécialistes masculins de l'endurance disposaient des mêmes concentrations basales hormonales que celles rapportées pour la femme par rapport aux concentrations basales de sujets non entraînés. Ils ont ainsi obtenu les échantillons sanguins de 31 coureurs masculins effectuant au moins 64 Km par semaine et d'un groupe témoin de 18 sujets sédentaires. Ils ont donc mesuré les concentrations de testostérone totale, testostérone libre, hormone lutéïnisante (LH), hormone folliculostimulante (FSH), prolactine et cortisol et ont observé des valeurs moyennes de testostérone totale et de prolactine significativement plus petites pour le groupe de coureurs que pour le groupe témoin alors que les autres hormones étaient similaires entre les deux groupes ($p > 0,05$). Les deux hormones dont les valeurs étaient plus basses pour sujets entraînés masculins étaient les mêmes que celles obtenues chez des coureurs féminins. Vogel et al. (1985) ont eux aussi étudié ces mêmes hormones, mais plus exactement leur évolution. Ils ont en effet mesuré au repos et pendant une période de récupération de 30 minutes, les concentrations de testostérone totale, testostérone libre, prolactine, FSH et LH. La période de récupération est successive à un exercice de 45 minutes sur ergocycle à 50% de la puissance (déterminée au préalable) correspondant à la consommation maximale d'oxygène. Dix sujets masculins non entraînés avaient effectué ce protocole. Ils obtinrent une augmentation significative de la testostérone totale et de la testostérone libre pendant les 15 premières minutes d'exercice qui permettait d'obtenir des différences pour ces hormones, significatives à l'issue de l'effort par rapport aux concentrations de repos ($p < 0,05$) Par contre ils ne notèrent pas de différences pour les concentrations des autres hormones mesurées, ce qui ne s'accorde pas avec les résultats du tableau des principales réponses hormonales de Wilmore et al. (1994) qui, eux, obtiennent pour la prolactine une augmentation en réponse à l'exercice pour des sujets entraînés et des sujets non entraînés. Ce résultat était déjà en contradiction avec les résultats de Crielaard et al. (1985) qui avaient étudié les variations des concentrations de cette hormone lors de deux exercices physiques différents (modalité et intensité différentes). Dans cette étude, les auteurs n'ont pas trouvé de variations du taux plasmatique de la prolactine pendant l'effort. Par contre, ils ont noté une corrélation significative durant la

récupération entre l'intensité de l'effort et l'importance de la sécrétion de prolactine. Toutefois, Mougin et al. (1987) et Keizer et al. (1987) ont obtenu des augmentations significatives de la prolactine en réponse à l'effort. Alors que Urhausen et al. (1998) en étudiant les réponses hormonales de 17 athlètes surentraînés au repos et durant un exercice de courte durée sur ergocycle à 10 % au dessus de la puissance correspondant au seuil anaérobie, montrent une augmentation significative pour l'hormone adrénocorticotrope (ACTH) et pour l'hormone de croissance (GH) alors qu'ils observaient une diminution du cortisol et de l'insuline. Ceci contredit également le tableau des principales réponses hormonales à l'exercice et à l'entraînement de Wilmore et al. (1994). Urhausen et al. (1998) confirmèrent ainsi l'hypothèse d'un dérèglement de l'axe hypothalamo-hypophysaire dans le cas d'un surentraînement, exprimée par une réponse altérée des hormones hypophysaires lors d'un exercice à court terme. Par ailleurs, Brisson et al. (1989) ont montré que la concentration de prolactine après l'exercice était significativement corrélée à la température centrale et à la fréquence cardiaque, de même que Low et al. (2005) en était arrivé à la conclusion que la prolactine était liée à la fatigue centrale. Bouassida et al. (2004) ont eux constaté une augmentation de la concentration de cortisol après un exercice supra-maximal de 45 secondes sur 17 sujets. De plus, Paccotti et al. (2005) se sont également penché sur le cortisol et ont examiné les effets d'un exercice isocinétique sur la production de cortisol salivaire ainsi que sur la relation entre la concentration de cortisol et la concentration de lactates. Ils ont ainsi observé 11 sujets non entraînés et 20 sujets entraînés. Ils ont pu confirmer dans le cas de leur protocole l'existence d'une importante réponse adrénocorticale qui peut être évaluée par un prélèvement périodique salivaire et le fait que les réponses de cortisol et de lactate consécutives à un exercice de forte intensité soient indépendantes ($673,7 \pm 313,8$ nmol/l contre $522,5 \pm 361,5$ nmol/l pour le cortisol et $12,4 \pm 3,0$ mmol/l contre $12,2 \pm 2,6$ mmol/l pour le lactate) respectivement entre les groupes entraînés et non entraînés. Enfin, les changements observés pour le cortisol sont susceptibles d'être liés au statut d'entraînement et à la correspondance entre le sport pratiqué et le protocole d'évaluation.

Ces différentes études sur les réponses hormonales à l'exercice et plus particulièrement dans le cas de la prolactine sont assez contradictoires car suivant le type et l'intensité de l'exercice, l'organisme semble ne pas réagir de la même façon (tableau 1).

Tableau 1 : Plusieurs études sur les réponses hormonales à l'exercice

Auteurs	Sujets Etudiés	Augmentation	Stagnation	Diminution
Vodel et al. (1985)	10 sujets masculins non entraînés (exercice de 45 minutes à 50 % $\dot{V}O_2$ max)	Testostérone libre, Testostérone totale	Prolactine, FSH, LH	---
Urhausen et al. (1998)	17 athlètes surentraînés (exercice bref à 10 % au dessus de la puissance du seuil anaérobie)	ACTH, GH	---	Cortisol, Insuline
Wilmore et al. (1994)	Réponse à l'exercice, sujets non entraînés	GH, TSH, ACTH, Prolactine, Testostérone, Insuline, Cortisol	FSH, LH	---
Bouassida et al. (2004)	12 femmes et 5 hommes physiquement actifs (exercice supra-maximal de 45 secondes à 120 % de PMA)	Cortisol	Leptine, Insuline	---

Lors d'un exercice maximal de courte durée, le muscle a besoin d'une grande quantité d'énergie et la seule énergie provenant des aliments et utilisable directement par le muscle est stockée sous forme d'un composé hautement énergétique : l'adénosine triphosphate (ATP). Lippi et al (2008) ont évalué le contrôle glycémique chez une population composée de 47 cyclistes professionnels masculins, 72 cyclistes élites masculins, et de 58 hommes sédentaires ayant donné leur sang. Ils ont évalué le glucose sanguin et l'hémoglobine glycosylée. Leurs résultats démontraient une relation significative entre intensité et régime d'entraînement pour ces deux paramètres établissant ainsi des différences de mesures fonction de l'entraînement et de l'exercice pratiqué.

1.3. La performance et les autres caractéristiques

1.3.1. Facteurs psychologiques

La performance à haut niveau est étroitement liée à la force mentale de l'athlète surtout qu'en cyclisme, lorsque les « jambes ne vont pas », les coureurs parviennent certaines fois à compenser un déficit physique momentané en puisant dans leurs réserves à partir d'une force mentale surdéveloppée (Grappe (2005)). Au niveau de la réalisation d'une performance comportant plusieurs épreuves, c'est peut être entre les épreuves que l'athlète augmente sa force mentale. D'ailleurs, Hemmings (2001) dans sa revue de littérature sur les effets des massages thérapeutiques dans le sport montrait que ce domaine souffre d'un manque d'instrumentations comparables ce qui rend difficile l'interprétation et l'extrapolation des différents résultats de recherche. Cependant les résultats sur l'élimination du lactate semblent équivoques avec une élimination après l'exercice plus efficace avec des stratégies de récupération active que par des massages. Il semblerait également que les massages aient un effet positif sur la performance et que cette constatation n'ait pas reçue beaucoup d'attention car, Longworth (1982) ; Tyurin (1986) ; Cafarelli et al. (1992) constatent un effet positif sur l'état psychologique des athlètes, particulièrement dans l'augmentation de la perception de récupération après exercice. De plus, comme il existe toujours un noyau de coureurs qui ont des qualités physiques relativement proches, la différence sur l'adversaire est en partie dépendante du niveau de force mentale de l'athlète (Grappe (2005))

1.3.2. Facteurs liés à l'échauffement, l'entraînement et la récupération

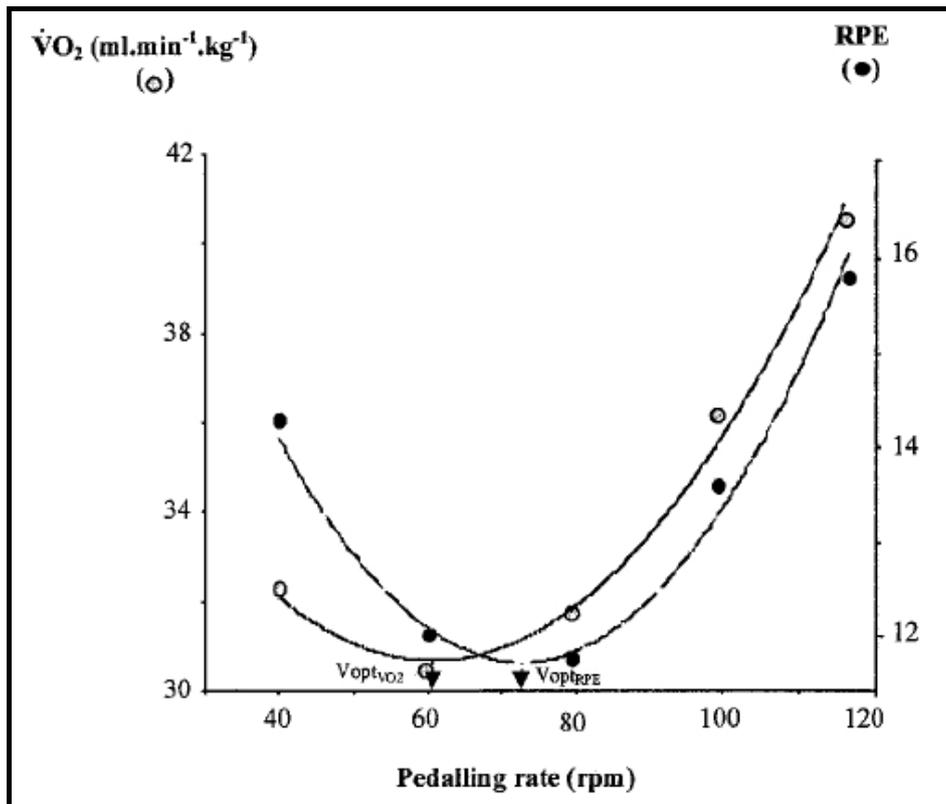
La question de l'échauffement revient souvent car les cyclistes ne savent pas comment gérer l'avant-course. Récemment, Mandengue et al. (2008) ont fait deux expérimentations dans deux pays avec 9 sujets dans la première et 20 dans la seconde. Il y avait un échauffement de référence et deux échauffements d'intensité augmentée de 10 % et diminuée de 10 % par rapport à la puissance observée lors de l'échauffement de référence. Leurs effets étaient ensuite évalués lors d'un exercice maximal sur ergocycle. Ils ont pu mettre au point un modèle mathématique prédictif des effets d'échauffements actifs sur la performance au travers de deux régressions linéaires définissant le temps d'exécution en fonction de l'intensité de l'échauffement.

$$\begin{cases} y(T_{\text{lim}}(S)) = 1,8x + 324,8 \Rightarrow x \leq 62 \pm 10\%P_{\text{max}} \\ y(T_{\text{lim}}(S)) = -14,9x + 1364 \Rightarrow x \geq 62 \pm 10\%P_{\text{max}} \end{cases}$$

avec $T_{\text{lim}}(S)$ le temps d'exécution de l'exercice en seconde.

Outre l'échauffement, pour amener le cycliste à son plus haut niveau, il faut une gestion rationnelle du processus d'entraînement (Grappe (2005)). Par rapport à la gestion de ce processus, Laiche et al. (1995), avaient conseillé, pour la programmation de l'entraînement, qu'il était plus indiqué de se référer à la vitesse maximale aérobie (VMA) de terrain qu'à celle de laboratoire à condition qu'elle soit mesurée en s'assurant qu'il s'agisse bien de la vitesse correspondant à la $\dot{V}O_2$ max car la différence constatée entre les VMA, pouvait avoir une incidence non négligeable sur cette programmation. Toutefois, Hintzy et al. (2001) s'étaient posé la question de savoir si un entraînement d'endurance ou de sprint pouvait influencer la perception d'une cadence de pédalage optimale lors d'un exercice sous maximal sur ergocycle. Douze sujets, six ayant suivi des entraînements d'endurance et les six autres des entraînements spécifiques au sprint, ont ainsi exécuté cinq exercices de 4 minutes à des cadences de pédalages allant de 40 à 120 rpm à une puissance constante de 150 W afin de rester dans le cadre de l'exercice sous maximal, c'est-à-dire le maintien de la condition aérobie. Ils ont déterminé des relations entre la consommation d'oxygène et la cadence de pédalage et entre le taux d'effort perçu et la cadence de pédalage par des polynômes de second degré ($0,78 < r^2 < 0,99$ ($p < 0,01$) et $0,65 < r^2 < 0,99$, ($p < 0,05$) respectivement). Ils ont observé une différence significative entre les deux types d'entraînement ($p < 0,001$). Dans chaque cas, les relations avec la cadence correspondaient à la Figure 8.

Figure 8 : Relations consommation d'oxygène-cadence et taux d'effort perçu-cadence



Note : Hintzy et al. (2001) ont représenté les relations entre la consommation d'oxygène et la cadence (○) et entre le taux d'effort perçu (RPE) et la cadence (●)

Ils concluent que les différents entraînements influençaient le taux d'effort perçu et que les sujets étaient sensibles à une cadence de pédalage correspondant à leur dépense énergétique minimale.

Puisque l'entraînement semble agir sur la gestion de la dépense énergétique des athlètes Messonnier et al. (2006) ont voulu savoir si l'entraînement agissait également sur la récupération et ont relaté l'effet de l'entraînement sur les paramètres de la cinétique du lactate sanguin lors d'un exercice à puissance constante correspondant à la consommation maximale d'oxygène. Ainsi, huit sujets ont effectué avant et après l'entraînement :

- un exercice incrémental jusqu'à épuisement afin de déterminer la puissance correspondant à la consommation maximale d'oxygène
- un exercice de 5 minutes à 90 % de cette puissance suivi d'une récupération passive de 90 minutes pour déterminer l'évolution de la récupération de la lactatémie ajustée par la fonction bi-exponentielle :

$$L_a(t) = L_a(0) + A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t})$$

- un exercice à la puissance correspondant à la consommation maximale d'oxygène jusqu'à épuisement afin de déterminer la durée d'exercice.

Les résultats suggèrent que l'entraînement préliminaire fournit une facilité à éliminer le lactate de l'organisme et à réduire l'accumulation du lactate dans les muscles durant un exercice à puissance constante de forte intensité allant jusqu'à épuisement. Ces résultats ont été confirmés par Fukuba et al. (2003) dans leur revue de littérature qui avaient conclu de leur investigation que la vitesse d'élimination du lactate pendant la récupération était augmentée par l'entraînement d'endurance.

Gmada et al. (2005) dans une autre approche ont étudié les effets de différentes méthodes de récupération active sur l'élimination de la lactatémie après exercice chez 14 sujets en bonne santé (7 entraînés et 7 non entraînés). Après 3 exercices intermittents, les sujets effectuaient :

- soit une récupération passive (RP),
- soit une récupération active à une intensité correspondant au premier seuil ventilatoire moins 20 % (RV1),
- soit une récupération active à une intensité correspondant au second seuil ventilatoire moins 20 % (RV2),
- ou soit à la combinaison de ces deux récupérations (CR), c'est-à-dire 7 min de RV1 suivi de 13 min de RV2.

Leurs résultats indiquaient que l'élimination du lactate sanguin était plus rapide chez les sujets entraînés durant la récupération combinée (CR) ($p < 0,05$). Ce résultat suggère que le niveau de condition physique joue un rôle important principalement dans la diminution de la lactatémie durant la récupération active combinée.

1.3.3. Facteurs liés au rythme nyctéméral

Dalton et al. (1997) ont étudié sept cyclistes afin de déterminer si le rythme nyctéméral avait un effet sur la performance lors d'un exercice de 15 min. Chaque sujet a fait une série de quatre tests :

- un test à $\dot{V}O_2$ max
- 3 tests de 15 min à intensité maximal aux horaires suivants : 8 - 10 h, 14 - 16 h et 20 - 22 h.

La fréquence cardiaque, la concentration de lactate sanguin, la consommation d'oxygène ont été mesurées et leurs résultats ont montré que le rythme nyctéméral n'avait aucun effet

sur la performance dans ce type d'exercice. Ainsi, bien que la performance puisse être compatible avec un programme d'entraînement compatible avec l'horloge interne de chaque individu, la capacité de pouvoir exécuter une performance et un entraînement à des heures diverses semble dépasser ces rythmes naturels. Forsyth et al. (2004) avaient également étudié l'effet du rythme nycthéméral sur 11 athlètes entraînés lors d'un exercice incrémental sur ergocycle à 2 h, 6 h, 10 h, 14 h, 18 h et 22 h et n'ont remarqué aucune différence entre les expérimentations concernant la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque au seuil lactique (fixé à 4,0 mmol/l).

1.4. Problématique

Nous constatons donc que beaucoup de variables interviennent dans la réalisation d'une performance en cyclisme permettant ainsi d'explorer et d'analyser l'axe principal de la réussite sportive. Dans les chapitres suivants, nous allons, sans proposer de recette miracle pour réaliser une performance en cyclisme, analyser des caractéristiques anthropométriques, physiologiques et techniques de cyclistes amateurs dans un premier temps afin de tenter de déterminer parmi cet ensemble de variables celles qui permettent de différencier les différents niveaux sportifs étudiés. Nous pourrons ainsi mettre en évidence par l'utilisation d'une analyse discriminante les variables qui, chez ces cyclistes amateurs caractérisent la performance.

Par la suite nous nous intéresserons plus particulièrement à une population de cyclistes professionnels pour laquelle nous étudierons l'influence du statut hormonal sur les paramètres observés puis nous tenterons à l'aide de l'ensemble des caractéristiques anthropométriques, physiologiques et techniques de déterminer celle qui expliquent la puissance. La puissance étant synonyme de performance, nous tenterons ainsi à l'aide de régressions multiples de montrer celles qui ont un effet significatif sur la performance.

Nous effectuerons les analyses statistiques (analyse discriminante, régressions multiples) avec le logiciel SAS (Cary, USA) dont les nombreuses procédures permettent une exploration complète de ces analyses afin de pouvoir valider les résultats.

Enfin nous utiliserons les concentrations de lactates prélevées chez les cyclistes professionnels pour modéliser l'évolution moyenne de ce facteur limitant par une fonction que l'on associera au modèle de Freund et al. (1981) afin de simuler le comportement de ce substrat lors de la récupération.

Chapitre II - Analyse discriminante appliquée aux sportifs, cas des cyclistes amateurs.

2.1. Protocole

Le protocole utilisé est un test incrémental, à cadence fixe et à charge progressivement croissante, par palier de trois minutes. Le sujet choisissait son braquet afin de s'adapter à la vitesse proposée. Le test se réalisait sur ergocycle depuis l'état de repos jusqu'à épuisement. Il s'agit d'un modèle de type Orion Pro Training 7016[®] (Toulouse, France) Celui-ci est composé d'un cadre de route réglable en hauteur au niveau de la selle et aussi du guidon. La distance entre le guidon et la selle est également réglable par le déplacement d'un ou des deux éléments. Tous ces réglages sont effectués par le cycliste avant le test selon sa convenance. Si besoin, ces réglages sont affinés au cours de la période d'échauffement. Les pédales utilisées appartiennent aux coureurs, afin de leur permettre de réaliser l'épreuve d'effort avec un mouvement de pédalage le plus proche possible des conditions de terrain au niveau des sensations. La puissance (P, exprimée en watt) est analysée directement par le logiciel intégré à l'ergocycle. Ainsi, à partir de la vitesse et de la cadence imposées, le sujet choisit son braquet. La cadence est constamment réajustée autour de 90 rotations par minutes (rpm). Ce type d'ergomètre présente des caractéristiques proches d'un vélo de route normal (largeur de selle, type de cadre, ...)

Les conditions environnementales étaient constantes au niveau de l'hygrométrie (60 % d'humidité relative) et de la température ambiante (20 à 21°C). Le local était régulièrement aéré et les observateurs présents dans la pièce étaient limités au nombre de trois (le médecin, l'infirmière et le technicien). Ces personnes avaient un rôle bien défini et encourageaient le sujet, surtout sur la fin de son effort.

La visite de contrôle qui précédait le test d'effort comprenait un examen anthropométrique (taille et poids), un examen clinique complet et un ECG de repos dont l'enregistrement était conservé sur papier selon les obligations faites aux équipes médicales. L'ensemble de ce protocole a été réalisé à Reims avec le matériel adapté aux cyclistes et à l'effort décrit précédemment.

Les tests étaient réalisés le matin ou l'après midi, au choix du sujet, en fonction des horaires d'ouverture du laboratoire (9h30-12h et 14h-18h). Ces tests ont été accomplis de septembre à juin, en fonction du calendrier scolaire. L'ensemble du recueil des données fut effectué sur trois années. Chaque sujet choisissait le moment de la journée qu'il considérait

être le plus optimal pour lui. Aucun test de type Hornes et Osberg n'a été réalisé afin de déterminer si les sujets sont du matin ou du soir, sachant de plus que cette variable est sous influence génétique (Vink et al., 2001). A partir de leur prise de rendez vous, les sujets étaient priés de s'abstenir de toute activité physique intensive pendant les 48 heures précédant le test. Un minimum de 2 heures était recommandé entre le dernier repas et le test. De même, les sujets furent priés de s'abstenir de toutes prises médicamenteuses ou de substances stimulantes (tabac, alcool, café, ...). Les tests étaient réalisés selon un protocole qui diffère en fonction de l'âge et du niveau de pratique des sujets.

Notre population était composée de 112 sujets. Tous pratiquaient le cyclisme au moins depuis quatre ans. Le niveau de hiérarchie sportive se situe entre la 250^{ème} et la 3000^{ème} place du classement français, classement établi à partir des résultats obtenus lors de la saison 2004. Cette population était répartie en trois groupes :

- Le groupe 1 correspondant au niveau national (avec un volume d'entraînement de 10 à 12 heures réparties sous forme de quatre séances hebdomadaires)
- Le groupe 2 correspondant au niveau régional (avec trois entraînements par semaine pour un volume total de dix heures)
- Le groupe 3 correspondant au niveau départemental (trois séances par semaine pour un volume de 5 à 6h30 d'entraînements).

Pour les sujets jeunes (15/17 ans), la vitesse initiale était plus basse que pour les sujets adultes (23 km.h⁻¹ vs 24 et 26). Pour les sujets adultes (plus de 18 ans) la vitesse était adaptée au niveau de pratique. L'épreuve d'effort était précédée d'un échauffement de 10 à 15 minutes. Trois protocoles furent utilisés en fonction des recommandations de la fédération française de cyclisme.

Le protocole 1 (P1) débutait à une vitesse de 26 km.h⁻¹, puis elle était augmentée, toutes les trois minutes, comme suit : 30 ; 34 ; 37 ; 39,5 ; 41,5 ; 43 ; 44,5 km.h⁻¹.

Le protocole 2 (P2) débutait à 24, puis 28, 32, 35, 38, 40, 41.5, 43 km.h⁻¹.

Le protocole 3 (P3) débutait à 23, puis, 27, 31, 34, 38, 39.5, 41 km.h⁻¹.

A partir du dernier palier de chaque protocole (*i.e.* pour P1 : 44,5 km.h⁻¹ ; pour P2 : 43 km.h⁻¹ ; pour P3 : 41 km.h⁻¹), la vitesse était augmentée de 1 km.h⁻¹ toutes les trois minutes. Le test était arrêté quand le sujet ne pouvait plus soutenir la cadence de pédalage pour une vitesse donnée. Son braquet étant stable, la puissance exprimée chutait. Le dernier palier complet était le palier conservé. Les données recueillies pour les paramètres physiologiques étaient celles enregistrées lors de la dernière minute de chaque palier, il s'agit tout d'abord de :

- la consommation d'oxygène en litre par minute ($\dot{V}O_2$, en $l \cdot \text{min}^{-1}$),
- le rejet de CO_2 en litre par minute ($\dot{V}CO_2$, en $l \cdot \text{min}^{-1}$),

analysés à l'aide du Cardiopulmonary Exercise CPX/D System (Medical Graphics Corporation, Minnesota, U.S.A) décrit en Annexe 2.

Nous avons ensuite la fréquence cardiaque en battement par minute (FC, en bpm), mesurée à l'aide d'un cardiofréquencemètre de type Polar® M31™ (Polar Electro Oy®, Kempele, Finlande). Enfin, la lactatémie en millimole par litre (La, en $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ ou mM), mesurée par l'intermédiaire d'un appareil de type Microzym-L (SGI, France) à partir d'un échantillon sanguin de 10 μl prélevé au lobule de l'oreille.

Pour les paramètres physiques, nous avons, par le logiciel intégré à l'ergocycle :

- la vitesse, en kilomètre par heure (V, en Km/h),
- la puissance, en watt (P, en W),
- le développement, en mètres (Dev, en m),
- la cadence, en rotation par minute (Cad, en rpm).

Nous obtenions au final ces données pour nos groupes de cyclistes au « seuil lactique » (correspondant à une lactatémie du sujet la plus proche de 4mmol) et au maximum de leur $\dot{V}O_2$ (c'est-à-dire à $\dot{V}O_{2\text{max}}$). Pour les valeurs au « seuil lactique », nous avons 6 sujets en plus, il s'agit de sujets pour lesquelles nous ne disposons pas de toutes les variables à la $\dot{V}O_{2\text{max}}$.

2.2. Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont présentées en fonction de la démarche de notre étude, à savoir, une description de nos variables, l'étude des distributions et l'analyse discriminante conduisant à la détermination des paramètres les plus discriminants. L'ensemble des calculs a été effectué avec le logiciel SAS[®] (SAS Institute Inc. Cary, NC, Etats-Unis.).

2.2.1. Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives correspondent à une synthétisation de l'information contenue dans les données au travers du calcul des moyennes et des écart-types, des médianes, des modes pour nos trois groupes de cyclistes afin de mettre en évidence des propriétés de l'échantillon et de suggérer des hypothèses. Prenons par exemple le cas de la moyenne et de la médiane ; si par exemple, la moyenne est beaucoup plus basse que la médiane, cela signifie que quelques individus ont des valeurs de caractère beaucoup plus basses que l'ensemble des autres et on dit alors que la moyenne est « tirée » vers les valeurs extrêmes.

2.2.2. Examen des distributions

Il existe de nombreux tests statistiques permettant de vérifier l'hypothèse de normalité pour les distributions parmi lesquels les plus connus sont, le test de Kolmogorov-Smirnov (1933), le test de Cramer-Von Mises (1928), le test de Durbin (1961), le test de Anderson Darling (1952), et le test de Shapiro-Wilk (1965) auquel nous allons porter un intérêt particulier.

En effet, bien que Shapiro et Wilk concluaient en 1965 que la statistique W présentait de bonnes dispositions pour un échantillon de taille n compris entre 3 et 50, l'extension proposée en 1982 par Royston a permis en fournissant une transformation correcte de la normalisation de la statistique W d'étendre ce test à un échantillon de taille n allant jusqu'à 2000. De plus, Shapiro, Wilk et Chen (1968) ont montré que la statistique W fournissait un meilleur indicateur de la non-normalité que les tests de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von

Mises, Durbin, et Anderson Darling quelles que soient les variantes de distributions (symétrique, asymétrique, etc...) et qu'en général la sensibilité de ceux-ci aux distributions continues était inférieure, en tout cas lorsque l'échantillon ne dépasse pas 2000 observations.

Le test de Shapiro-Wilk permet donc de vérifier l'hypothèse nulle selon laquelle une distribution x_1, \dots, x_n soit distribuée normalement.

Le test calcul la statistique W :

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

où

$x_{(i)}$ est le $i^{\text{ième}}$ plus petit nombre de la distribution, c'est-à-dire que $x_{(1)} < x_{(2)} < \dots < x_{(n)}$

$\bar{x} = (x_1 + \dots + x_n) / n$ est la moyenne de la distribution

Les constantes a_i sont données par :

$$(a_1, \dots, a_n) = \frac{m' V^{-1}}{(m' V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}}$$

$$\text{avec } m = (m_1, \dots, m_n)'$$

Sachant que (m_1, \dots, m_n) sont les valeurs d'une statistique d'ordre de loi normale standard, autrement dit de loi normale centrée réduite (distribution avec une moyenne égale à 0 et un écart-type égal à 1).

La statistique W du test de Shapiro-Wilk est comprise entre 0 et 1. Une population normalement distribué détient une valeur W dite haute ($\approx 0,9$) alors qu'une distribution non-normale à une valeur W basse ($\approx 0,1$) mais c'est la probabilité critique associée à la statistique que nous utilisons pour favoriser ou non l'hypothèse de normalité. SAS fournit la probabilité critique $\Pr > W$ du test de Shapiro-Wilk, qui, si elle est supérieur à 0,05, est indicatrice d'une population normalement distribuée.

2.2.3. Statistiques analytiques

La comparaison pour chaque variable des trois groupes a été effectuée soit en utilisant une analyse de variance (ANOVA), soit par l'utilisation d'un test de Kruskal-Wallis (Kruskal et al.1952).

2.2.3.1. L'analyse de variance

L'analyse de variance recouvre un ensemble de technique de tests et d'estimation destinés à apprécier l'effet de variables qualitatives sur une variable numérique et revient dans le cas simple qui est le notre à comparer plusieurs moyennes d'échantillons gaussiens.

Les données et le modèle

On dispose de k échantillons de tailles respectives n_1, n_2, \dots, n_k correspondant chacun à un niveau différent d'un facteur A. On pose $n = \sum_{i=1}^k n_i$ et on dresse le tableau suivant (Tableau 2).

Tableau 2 : Exemple de tableau de données

Facteur	A_1	A_2		A_i		A_k	Exemple	FC gr1	FC gr2	FC gr3
	x_1^1	x_2^1		x_i^1		x_k^1		196	195	178
	x_1^2	x_2^2		x_i^2				187	202	208
	$x_1^{n_1}$	$x_2^{n_2}$			$x_k^{n_k}$		190	199	194
Moyennes	\bar{x}_1	\bar{x}_2		\bar{x}_i		\bar{x}_k		191	198,6	193,3

Pour notre exemple, il s'agit de la fréquence cardiaque de 3 groupes de cyclistes. On dispose de trois échantillons ($k = 3$), de même taille, c'est-à-dire que $n_1=3, n_2=3$ et $n_3=3$ donc $n = 9$.

Si on considère chaque échantillon X_i comme issu d'un variable aléatoire suivant une loi gaussienne de paramètres (m, σ) , le problème consiste alors à tester :

$$\begin{cases} H_0 : m_1 = m_2 = \dots = m_k = m \\ H_1 : \exists i, j; m_i \neq m_j \end{cases}$$

C'est-à-dire H_0 : toutes les moyennes sont égales contre H_1 : au moins deux moyennes diffèrent.

Le test

Si \bar{X} est la moyenne totale, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_i^j$

et en remarquant que :

$$X_i^j - \bar{X} = X_i^j - \bar{X}_i + \bar{X}_i - \bar{X}$$

Il vient alors :

$$\frac{1}{n} \sum_i \sum_j (X_i^j - \bar{X})^2 = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j (X_i^j - \bar{X}_i)^2 + \frac{1}{n} \sum_i n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$$

Cette formule n'est autre que celle de la variance totale décomposée en moyenne des variances et variance des moyennes.

Si on pose :

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j (X_i^j - \bar{X})^2, \quad S_A^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$$

et :

$$S_R^2 = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j (X_i^j - \bar{X}_i)^2$$

On a donc $S^2 = S_A^2 + S_R^2$ qui est la formule « d'analyse de variance ».

S_A^2 représente la variance due au facteur, S_R^2 la variance résiduelle. C'est-à-dire :

Variance Totale = Variance Expliquée + Variance Résiduelle.

L'équation d'analyse de variance n'est autre que la formule du théorème de Cochran, ce qui entraîne que S_R^2 et S_A^2 sont des variables aléatoires indépendantes, si H_0 est vraie ; on a :

$$\frac{S_A^2/k - 1}{S_R^2/n - k} = F(k - 1; n - k)$$

D'où le test : on forme le rapport $\frac{S_A^2/k - 1}{S_R^2/n - k}$.

S'il est supérieur à la valeur critique d'une variable de Fisher-Snedecor (Table fournit en annexe 1), on conclut à une influence significative du facteur A. Le carré moyen résiduel est alors un estimateur sans biais de σ^2 . Par analogie avec notre exemple, nous avons $\bar{x} = 194,33$ et nous obtenons le tableau suivant:

Tableau 3 : Résultat d'une analyse de variance

Source de variation	Somme des carrés	Degré de liberté (ddl)	Carré moyen
Expliquée ou entre échantillons $\sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = ns_A^2$	92,67	$k - 1 = 2$	46,33 $\frac{ns_A^2}{k - 1}$
Résiduelle ns_R^2	517,33	$n - k = 6$	86,22 $\frac{ns_R^2}{n - k}$
Totale	610	$n - 1 = 8$	

La valeur $f = \frac{46,33}{86,22} = 0,54$ est inférieure au seuil 5% d'une variable $F(2 ; 6)$ qui est de 5,14.

On peut donc accepter l'hypothèse H_0 selon laquelle il n'y aurait pas de différences significatives entre les trois groupes de cyclistes. On peut également dire que le facteur « groupe » n'a pas d'influence significative pour la fréquence cardiaque.

2.2.3.2. Le test de Kruskal-Wallis

Le test de Kruskal-Wallis (Kruskal et al. 1952) ne fait aucune hypothèse sur la forme des distributions, c'est donc un test non-paramétrique et comme bon nombre d'entre eux, il ne travaillera pas sur les valeurs des observations mais sur leurs rangs.

Ce test présente des similitudes avec l'ANOVA univariée classique dans le sens où la statistique du test de Kruskal-Wallis est construite à partir des moyennes des rangs ou médianes des échantillons. Plus précisément, l'ANOVA compare les moyennes des échantillons tandis que Kruskal-Wallis abandonne l'hypothèse de normalité et compare les moyennes des rangs c'est-à-dire les médianes des observations dans les différents échantillons.

2.2.4. Analyse discriminante

Le but des méthodes de discrimination consiste à prédire une variable qualitative à k catégories à l'aide de p prédicteurs, généralement numériques.

On peut considérer l'analyse discriminante comme une extension du problème de la régression dans le cas où la variable à expliquer est qualitative.

Les données consistent en n observations réparties en k classes et décrites par p variables explicatives.

On distingue classiquement deux aspects en analyse discriminante :

- Un aspect dit descriptif qui réside dans la recherche des combinaisons linéaires de variables qui permettent de séparer le mieux possible les k catégories et donner une représentation graphique qui rende compte au mieux de cette séparation ;
- Un aspect décisionnel où un nouvel individu se présente et pour lequel on connaît les valeurs des prédicteurs. Il s'agit alors de décider dans quelle catégorie il faut l'affecter. C'est un problème de classement.

2.2.4.1. La règle « bayésienne » de classement

On suppose que les k groupes sont en proportion p_1, p_2, \dots, p_k dans la population totale et que la distribution de probabilité du vecteur d'observation $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_p)$ est donnée pour chaque groupe j par une densité (ou une loi discrète) $f_j(\mathbf{x})$.

Observant un point de coordonnées (x_1, x_2, \dots, x_p) la probabilité qu'il provienne du groupe j est donnée par la formule de bayes :

$$P(G_j / \mathbf{x}) = \frac{p_j f_j(\mathbf{x})}{\sum_{j=1}^k p_j f_j(\mathbf{x})}$$

La règle bayésienne consiste alors à affecter l'observation \mathbf{x} au groupe qui a la probabilité a posteriori maximale. Les dénominateurs étant les mêmes pour les k groupes on doit donc chercher le maximum de :

$$p_j f_j(\mathbf{x})$$

Il est donc nécessaire de connaître ou d'estimer $f_j(\mathbf{x})$.

Afin d'obtenir le vecteur d'observation \mathbf{x} le plus pertinent, c'est-à-dire celui avec les variables (x_1, \dots, x_p) les plus discriminantes dans la détermination du groupe auquel appartient le cycliste, nous avons utilisé plusieurs méthodes de sélection de variables.

2.2.4.2. La sélection des variables

Afin de ne conserver dans la fonction discriminante que les variables indépendantes qui permettront de différencier le mieux les groupes, nous avons utilisé la méthode pas-à-pas (dans cette méthode, chaque variable est ajoutée ou retirée du modèle suivant la significativité de son caractère discriminant et la pertinence du modèle), la méthode d'introduction progressive (cette fois ci, on ne procède qu'à l'ajout de variable a caractère discriminant pour le modèle) et la méthode d'élimination progressive (on part d'un modèle contenant toutes les variables indépendantes et les moins discriminantes sont soustraites du modèle à chaque étape).

2.2.4.3. Les conditions d'applications

De façon à pouvoir utiliser l'analyse discriminante, certaines conditions que nous avons pris soin de vérifier doivent être respectées. Il s'agit dans un premier temps du nombre de groupes qui doit être supérieur ou égal à deux et du nombre de données dans chaque groupe qui doit être supérieur à deux. Ensuite, il y a le fait que le nombre de variables indépendantes doit être supérieur à un et inférieur à $n-2$ (n étant la taille de l'échantillon) et bien sûr il doit y avoir indépendance entre les variables indépendantes. Enfin, il y a la

particularité des matrices des variances-covariances de chaque groupe. En effet, si elles sont égales, la fonction discriminante utilisée sera linéaire, dans le cas contraire, la fonction discriminante utilisée sera quadratique.

2.3. Résultats

2.3.1. Statistiques descriptives

Au « seuil lactique », nous avons 112 sujets répartis comme suit : 25 individus dans le groupe 1 (du niveau national), 58 cyclistes dans le groupe 2 (du niveau régional) et 29 cyclistes dans le groupe 3 (du niveau départemental). Le Tableau 4 présente les caractéristiques des données anthropométriques, physiologiques de cette population.

Tableau 4 : Statistiques descriptives de la population au « seuil lactique » et étude de la normalité pour chaque groupe.

Variable	Groupe	Moyenne	Médiane	Mode	Ecart-type	Pr>W
<i>Age (Années)</i>	1	23	22	NC	3	0,0314*
	2	20	19	NC	3	0,0098*
	3	17	16	19	2	0,0009*
<i>Masse Corporelle (Kg)</i>	1	70	69	69	7	0,4351
	2	67	66	62	7	0,0752
	3	65	63	57	9	0,0741
<i>Taille (cm)</i>	1	179	179	173	5	0,4939
	2	177	177	177	6	0,3136
	3	176	175	175	6	0,0389*
<i>Vitesse (km/h)</i>	1	39,54	39,5	39,5	1,79	0,0001*
	2	36,98	38	38	2,02	<0,0001*
	3	35,96	36	36	2,98	0,0322*
<i>Puissance (Watts)</i>	1	284,72	288	272	33,7	0,0493*
	2	240,27	250	256	37,34	0,0056*
	3	222,75	220	216	53,08	0,796
<i>Développement (m)</i>	1	7,37	7,4	7,4	0,47	0,0077*
	2	6,85	6,81	7,78	0,69	0,0271*
	3	6,62	6,9	5,78	0,77	0,0814
<i>Cadence (rpm)</i>	1	91,6	90	90	4,48	<0,0001*
	2	92,96	90,5	89	5,64	0,0025*
	3	93,41	92	90	6,65	0,1504
$\dot{V}CO_2$ (l/min)	1	3,77	3,78	4,31	0,54	0,5177
	2	3,35	3,41	3,53	0,48	0,198
	3	3,16	3,14	3,46	0,53	0,9555
$\dot{V}O_2$ (l/min)	1	3,72	3,77	4,06	0,51	0,6364
	2	3,34	3,36	3,66	0,42	0,7636
	3	3,15	3,11	3,03	0,54	0,7966

<i>Fréquence</i>	1	171,76	171	159	11,63	0,098
<i>Cardiaque</i>	2	170,06	171	170	12,02	0,0275*
<i>(bpm)</i>	3	174,24	175	170	13,08	0,5982
<i>Lactatémie</i>	1	4,06	4,1	4,5	0,44	0,1417
<i>(mmol/l)</i>	2	3,81	3,8	3,5	0,49	0,0465*
	3	4,06	4,1	3,6	0,4	0,0716

* : Rejet de l'hypothèse de normalité car la p -value de la statistique W du test de Shapiro-Wilk est inférieure au seuil $\alpha = 0,05$.

On peut voir qu'au « seuil lactique », seules les variables Masse Corporelle, $\dot{V}CO_2$ et $\dot{V}O_2$ possèdent trois groupes distribués normalement. Les variables Age et Vitesse (V) possèdent elles leurs trois groupes qui rejettent l'hypothèse de normalité au niveau des distributions.

Pour les données au maximum de la $\dot{V}O_2$, le nombre de cyclistes n'est pas le même car des problèmes techniques sont venu perturber les relevés à ce moment pour six de nos individus. C'est ainsi qu'à $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$, nous avons 106 sujets répartis de la façon suivante : 24 cyclistes du groupe 1, 57 cyclistes du groupe 2 et 25 cyclistes du groupe 3. Le Tableau 5 présente les statistiques descriptives pour la population à $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$. Les variables Masse Corporelle, Taille, Puissance (P, il s'agit de la puissance maximale puisqu'elle correspond à celle relevée à $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$), $\dot{V}CO_{2 \text{ Max}}$, $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$, Fréquence Cardiaque (FC) et Lactatémie (Lac) possèdent des groupes distribués tous suivant la loi normale. Les variables Age, Vitesse (V), et Développement (Dev) ne possèdent eux aucun groupe distribué normalement.

Tableau 5 : Statistiques descriptives de la population à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ » et étude de la normalité pour chaque groupe.

Variable	Groupe	Moyenne	Médiane	Mode	Ecart-type	Pr>W
<i>Age (Années)</i>	1	23,54	23,07	NC	3,04	0,0447*
	2	20,13	19,32	NC	3,18	0,0105*
	3	17,06	16,8	19,8	1,91	0,0062*
<i>Masse Corporelle (Kg)</i>	1	70,54	69	69	6,85	0,5785
	2	66,96	66	62	6,72	0,0636
	3	64	63	57	8,91	0,1329
<i>Taille (cm)</i>	1	178,87	179,5	173	5,28	0,3939
	2	177,59	177	177	5,62	0,3124
	3	176	175	175	6,15	0,111
<i>Vitesse (km/h)</i>	1	43,77	43,75	43	0,99	0,001*
	2	41,75	41,5	41,5	1,21	<0,0001*
	3	40,02	39,5	42	1,89	0,0041*
<i>Puissance max (Watts)</i>	1	376,58	376	348	29,49	0,6776
	2	332,49	324	324	31,1	0,4671
	3	295,88	288	276	39,76	0,1154
<i>Développement (m)</i>	1	8,2	8,29	8,54	0,46	0,0051*
	2	7,74	7,78	7,63	0,54	0,0081*
	3	7,41	7,32	7,93	0,72	0,0368*
<i>Cadence (rpm)</i>	1	92,16	91,5	89	4,64	0,1093
	2	93,19	92	92	4,92	0,0149*
	3	92,96	92	91	6,82	0,1364
<i>$\dot{V}CO_{2\text{Max}}$ (l/min)</i>	1	4,83	4,76	NC	0,63	0,6918
	2	4,39	4,42	3,88	0,55	0,4682
	3	4,18	4,12	4,04	0,53	0,9435
<i>$\dot{V}O_{2\text{Max}}$ (l/min)</i>	1	4,34	4,39	4,8	0,52	0,9919
	2	3,99	4	3,99	0,4	0,4232
	3	3,78	3,87	3,76	0,48	0,6033
<i>Fréquence Cardiaque (bpm)</i>	1	192,08	190,5	182	8,68	0,6321
	2	193,1	192	191	8,84	0,4226
	3	193,6	192	192	9,24	0,651
<i>Lactatémie (mmol/l)</i>	1	10,47	10,9	12,7	2,46	0,067
	2	11,1	10,6	10,1	2,39	0,4436
	3	9,39	9,4	9,5	3,33	0,215

* : Rejet de l'hypothèse de normalité car la p -value de la statistique W du test de Shapiro-Wilk est inférieure à 0,05.

Par la suite, nous avons étudié la présence de différences significatives des données physiques, physiologiques et anthropométriques mesurées durant l'épreuve entre nos trois différents groupes de niveau.

2.3.2. Statistiques analytiques

Les résultats de l'étude de la normalité de nos distributions permettent de connaître la nature du test à utiliser pour comparer les groupes. C'est-à-dire que les variables dont les trois groupes sont distribués normalement feront l'objet de l'ANOVA, si un groupe ne l'est pas, le test de Kruskal-Wallis sera utilisé.

Au « seuil lactique », la comparaison des groupes est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Comparaison des groupes au « seuil lactique ».

Variabiles	p-value	Caractéristiques
<i>Age</i>	<0,001	Différences significatives entre tous les groupes
<i>Masse Corporelle</i>	0,0269*	Différence significative entre le groupe 1 et le groupe 3
<i>Taille</i>	0,3895	Pas de différences significatives
<i>Vitesse</i>	<0,001	Différences entre le groupe 1 et le groupe 2 et entre le groupe 1 et le groupe 3
<i>Puissance</i>	<0,001	Différences significatives entre le groupe 1 et le groupe 2 et entre le groupe 1 et le groupe 3
<i>Développement</i>	<0,001	Différences significatives entre le groupe 1 et le groupe 2 et entre le groupe 1 et le groupe 3
<i>Cadence</i>	0,7096	Pas de différences significatives
$\dot{V}CO_2$	<0,001*	Différences significatives entre le groupe 1 et le groupe 2 et entre le groupe 1 et le groupe 3
$\dot{V}O_2$	<0,001*	Différences significatives entre le groupe 1 et le groupe 2 et entre le groupe 1 et le groupe 3
<i>Fréquence Cardiaque</i>	0,3849	Pas de différences significatives
<i>Lactatémie</i>	0,0192	Différences significatives entre le groupe 1 et le groupe 2 et entre le groupe 2 et le groupe 3

Note : * Utilisation de l'ANOVA puis tests de comparaison de Scheffe et de Tukey pour analyser les différences entre les moyennes des populations car, basés sur des méthodes différentes, ces tests permettent de conforter le résultat obtenu et d'en assurer l'exactitude.

Hormis l'âge, aucune autre variable ne présente de différences significatives entre tous les groupes. Cependant on peut constater que la masse corporelle est significativement différente entre les cyclistes du niveau national et ceux du niveau départemental. La vitesse de ces derniers est différente de celle des cyclistes du niveau régional mais aussi de celle des cyclistes du niveau national. La taille des cyclistes n'est pas significativement différente suivant leurs niveaux tout comme la fréquence cardiaque. Enfin la puissance, le

développement, les débits d'oxygène et de dioxygène présentent tous les quatre des différences significatives entre le niveau national et les deux autres niveaux tandis que pour la lactatémie c'est le niveau régional qui est significativement différent des deux autres.

Au maximum de leur $\dot{V}O_2$, la comparaison des groupes de notre population amputée donc de six sujets est présentée dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Comparaison des groupes à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ ».

Variabiles	p-value	Caractéristiques
<i>Age</i>	<0,001	Différences significatives entre tous les groupes
<i>Masse Corporelle</i>	0,0098*	Différence significative entre le groupe 1 et le groupe 3
<i>Taille</i>	0,2106*	Pas de différences significatives
<i>Vitesse</i>	<0,001	Différences significatives entre tous les groupes
<i>Puissance max</i>	<0,001*	Différences significatives entre tous les groupes
<i>Développement</i>	<0,001	Différences significatives entre tous les groupes
<i>Cadence</i>	0,5875	Pas de différences significatives
$\dot{V}CO_{2\text{Max}}$	<0,001*	Différences significatives entre le groupe 1 et le groupe 2 et entre le groupe 1 et le groupe 3
$\dot{V}O_{2\text{Max}}$	<0,001*	Différences significatives entre le groupe 1 et le groupe 2 et entre le groupe 1 et le groupe 3
<i>Fréquence Cardiaque</i>	0,8291*	Pas de différences significatives
<i>Lactatémie</i>	0,0306*	Différence significative entre le groupe 2 et le groupe 3

Note : * Utilisation de l'ANOVA puis tests de comparaison de Scheffé et de Tukey pour analyser les différences entre les moyennes des populations

On peut constater qu'à $\dot{V}O_{2\text{Max}}$, l'âge, la vitesse, la puissance maximale et le développement présentent des différences significatives entre tous les niveaux de pratique tandis que la taille, la cadence et la fréquence cardiaque ne proposent aucune différence significative entre les groupes. S'agissant de la masse corporelle, on observe une différence significative entre le niveau national et le niveau départemental. On remarque que les données anthropométriques dégagent la même tendance quant à la répartition et la différenciation des groupes à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ » et au « seuil lactique ». Pour les débits d'oxygène et de dioxygène, le niveau national est différent des deux autres, et pour la lactatémie, c'est entre le niveau

régional et le niveau départemental que l'on remarque la présence d'une différence significative.

2.3.3. L'Analyse discriminante

2.3.3.1. Les variables sélectionnées

Sur les variables physiques, physiologiques et anthropométriques mesurées au « seuil », nous avons utilisé les différentes procédures de sélection de variables disponibles sous SAS 9.1 avec la procédure « stepdisc » que sont, la méthode pas à pas, la méthode d'introduction progressive et la méthode d'élimination progressive (Klecka 1980). Sachant que cette procédure permet de faire rentrer ou sortir les variables dans le modèle selon un des deux critères suivants :

-Le niveau de significativité F d'un test d'analyse de covariance (Fisher-Snedecor), où les variables déjà choisies agissent en tant que covariables et la variable examinée est considérée comme variable dépendante.

-Le coefficient de corrélation partielle carré permettant de prédire la variable considérée comme variable de « catégorie », contrôlant les effets des variables déjà présentes dans le modèle.

La méthode d'introduction progressive débute sans aucune variable dans le modèle puis à chaque étape, elle fait entrer la variable qui contribue le plus au pouvoir discriminant du modèle en mesurant son niveau de significativité et une valeur appelée le « lambda de Wilk¹ » et son critère de rapport de probabilité sont calculés afin de proposer un degré d'efficacité de classement pour le choix final du modèle. Elle s'arrête lorsque aucune variable ne respecte le critère d'entrée. La méthode d'élimination progressive quant à elle démarre avec toutes les variables dans le modèle excepté celles qui sont linéairement dépendantes puis à chaque étape élimine la variable qui participe le moins au pouvoir discriminant du modèle en terme de significativité. Quand toutes les variables restantes respectent les critères ne permettant pas de les exclure du modèle, la procédure s'arrête. Enfin, la méthode pas-à-pas, comme la méthode d'introduction progressive débute sans aucune variable dans le modèle puis à chaque étape examine le modèle et si la variable dans le modèle qui contribue le moins

¹ Le lambda de Wilk est la proportion de la variance totale des scores de discrimination non-expliquée par les différences entre les groupes. Plus cette valeur est grande, plus grande est la variation entre les groupes en tant que proportion du total et donc plus faible est le degré d'efficacité de la fonction discriminante à séparer les groupes.

au pouvoir discriminant ne respecte pas le critère pour rester dans ce dernier, elle est retirée. De plus la variable hors du modèle qui contribue le plus au pouvoir discriminant est insérée dans le modèle.

Nous avons utilisé deux seuils pour l'introduction et le retrait des variables de la fonction discriminante pour ces méthodes (10 et 25%) car selon Beauvillier (1995), une étude montre que les seuils variant de 10% à 25% offrent souvent de meilleurs résultats que des seuils trop élevés ou trop faibles. Les résultats des méthodes de sélection sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Sélection des variables discriminantes au « seuil lactique »

Méthodes de sélection	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 25%	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 10%
Pas-à-pas	Age, Lac, V	Age, Lac, V
Introduction progressive	Age, Lac, V	Age, Lac, V
Elimination progressive	V, FC, Lac, Dev, Cad, Age	Age, Lac, V

Note: V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, Cad=Cadence, FC=Fréquence cardiaque.

Au « seuil », nous avons donc deux modèles qui sont mis en évidence. L'un contenant les variables Age (avec un niveau de significativité $p < 0,001$), Lac ($p = 0,005$) et V ($p = 0,009$) et l'autre contenant les variables V ($p = 0,0074$), FC ($p = 0,21$), Lac ($p = 0,01$), Dev ($p = 0,07$), Cad ($p = 0,14$) et Age ($p < 0,001$).

A « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ », les résultats des méthodes de sélection de variables sont fournis par le Tableau 9.

Tableau 9 : Sélection des variables discriminantes à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ »

Méthodes de sélection	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 25%	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 10%
Pas-à-pas	Age, Lac, V	Age, Lac, V
Introduction progressive	Age, Lac, V	Age, Lac, V
Elimination progressive	V, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$, Lac, Age, Dev	V, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$, Lac, Age

Note: V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, Cad=Cadence, FC=Fréquence cardiaque, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$ = débit maximal de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ = consommation maximale d'oxygène.

Nous avons cette fois trois modèles qui sont mis en évidence par les différentes méthodes de sélection et comme au « seuil lactique », nous obtenons dans un premier temps un modèle composé des trois variables Age ($p < 0,001$), V ($p < 0,001$) et Lac ($p = 0,047$). Puis, deux autres modèles qui ne diffèrent que d'une variable, l'un composé de : V ($p < 0,001$), $\dot{V}CO_2$ ($p = 0,0647$), $\dot{V}O_2$ ($p = 0,0439$), Lac ($p = 0,028$) et Age ($p = 0,001$), et l'autre composé de : V ($p < 0,001$), $\dot{V}CO_2$ ($p = 0,0355$), $\dot{V}O_2$ ($p = 0,0171$), Lac ($p = 0,0221$), Dev ($p = 0,1106$) et Age ($p = 0,005$) suivant les différentes valeurs affectées aux seuils de retrait et d'introduction dans les méthodes de sélection de variables.

2.3.3.2. Les fonctions discriminantes

Avant de pouvoir choisir parmi les deux modèles obtenus au « seuil lactique » celui qui est le plus efficace et le plus valide (pareil pour les trois modèles obtenues à « $\dot{V}O_{2\text{ Max}}$ »), nous avons vérifié si les matrices des variances-covariances de chaque groupe pour chaque modèle étaient égales. Si c'est le cas, nous allons utiliser une fonction discriminante linéaire et dans le cas contraire une fonction discriminante quadratique.

SAS nous permet de pouvoir effectuer cette vérification par l'utilisation d'un test du Chi-deux dont la probabilité fournie est comparée à un risque $\alpha = 10\%$. Si cette probabilité est inférieure à α , cela signifie alors que les matrices de variances-covariances ne sont pas égales (Morrison, 1976). Les résultats de ce test sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Test d'égalité des matrices variances-covariances

Données	Modèles	Khi ₂	P>Khi ₂
Au "seuil lactique"	V, Age, Lac	30,72	0,0022
	V, FC, Lac, Dev, Cad, Age	81,29	0,0003
A " $\dot{V}O_{2\text{ Max}}$ "	V, Age, Lac	30,47	0,0024
	V, $\dot{V}CO_{2\text{ Max}}$, $\dot{V}O_{2\text{ Max}}$, Lac, Age	49,99	0,0124*
	V, $\dot{V}CO_{2\text{ Max}}$, $\dot{V}O_{2\text{ Max}}$, Lac, Age, Dev	72,19	0,0026

Note : *Pour ce modèle, les matrices variances-covariances ne sont pas égales. V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, Cad=Cadence, FC=Fréquence cardiaque, $\dot{V}CO_{2\text{ Max}}$ = débit maximal de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_{2\text{ Max}}$ = consommation maximale d'oxygène.

a) Au « seuil lactique »

Nous avons donc deux fonctions discriminantes quadratiques à étudier afin de déterminer la plus efficace. SAS, à l'aide de sa procédure « **discrim** » permet de réaliser cette investigation.

Tout d'abord, en utilisant la fonction discriminante avec les variables V, Age et Lac, nous obtenons un taux d'erreur de 31,25% avec une autre répartition des 112 cyclistes : 26 cyclistes dans le niveau 1, 55 dans le niveau 2, et 31 dans le niveau 3 (Tableau 11).

Tableau 11 : Répartition des cyclistes « au seuil » pour fonction à 3 variables

Catégorie d'origine	Reclassé dans			Total
	1	2	3	
<i>1</i>	16	9	0	25
<i>2</i>	10	39	9	58
<i>3</i>	0	7	22	29
<i>Total</i>	26	55	31	112

Tandis que de son côté, la fonction discriminante quadratique utilisant les variables V, Age, Lac, FC, Dev et Cad fournit un taux d'erreur 21,43%. Le Tableau 12 donne la répartition de la population.

Tableau 12 : Répartition des cyclistes « au seuil » pour la fonction à 6 variables

Catégorie d'origine	Reclassé dans			Total
	1	2	3	
<i>1</i>	20	4	1	25
<i>2</i>	8	43	7	58
<i>3</i>	1	2	25	29
<i>Total</i>	29	50	33	112

Le taux d'erreur obtenu avec la fonction discriminante quadratique à 6 variables est inférieur à celui obtenu avec la fonction à 3 variables. Mais avant de choisir, il faut valider l'analyse discriminante et cette validation passe par une méthode appelée « jackknife ». Cette méthode fonctionne ainsi : la première observation est retirée de l'échantillon puis une analyse discriminante est effectuée en utilisant les autres observations et la première observation (celle retirée) est ensuite réinsérée dans l'échantillon et la deuxième observation est retirée. Une autre analyse discriminante est effectuée en utilisant les autres observations et la deuxième observation est alors classée en utilisant la nouvelle fonction discriminante. Et

ainsi de suite pour chaque observation. On obtient ainsi un autre taux d'erreur avec cette méthode et le modèle le plus valide sera celui qui présentera la plus petite différence entre son taux d'erreur et celui obtenu par cette méthode. Le Tableau 13 présente les taux d'erreur obtenus.

Tableau 13 : Taux d'erreur pour les modèles au « seuil lactique »

Variables de la fonction discriminante	Taux d'erreur	Taux d'erreur méthode "jackknife"	Différence entre les taux
V, Age, Lac	31,25%	40,18%	8,93%
V, FC, Lac, Dev, Cad, Age	21,43%	35,71%	14,28%

Note : V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, Cad=Cadence, FC=Fréquence cardiaque.

Le modèle à 3 variables (V, Age, Lac) est donc plus valide que celui à 6 variables. De plus, même si un bon classement est associé à un taux d'erreur faible, un autre aspect important, souvent oublié, concernant l'efficacité de l'analyse discriminante est la conséquence d'un mauvais classement. Par exemple, si un médecin désire classer ses patients selon le risque (faible, élevé) qu'ils ont de développer un cancer. Dans cette situation, classer un patient comme étant à faible risque, alors qu'en réalité il est à risque élevé, est beaucoup plus préjudiciable pour la santé du patient que l'inverse (classer un patient à risque élevé alors qu'il est à risque faible). Dans le cas du modèle à 6 variables, on observe qu'un individu du groupe 1 est reclassé dans le groupe 3 et inversement alors que pour le modèle à 3 variables, les reclassements sont dans la classe voisine ce qui paraît plus probable et plus efficace.

Dans le but de confondre les attentes de prévision et de classement de l'analyse discriminante et pour tenter d'affiner notre recherche des caractères discriminants, nous avons appliqué la fonction discriminante contenant les 3 variables : V, Age et Lac puis nous avons isolé les individus bien classés et pris cette population pour de nouveau effectuer une sélection des variables les plus discriminantes afin de pouvoir l'appliquer sur notre population entière. Nous avons donc 77 cyclistes et les procédures de sélection de variables ont fourni les résultats du Tableau 14.

Tableau 14 : Sélection des variables discriminantes au « seuil lactique » après élimination des mal classés avec le modèle à 3 variables.

Méthodes de sélection	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 25%	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 10%
Pas-à-pas	Age, Lac, Taille, P	Age, Lac, V
Introduction progressive	Age, Lac, V, Taille, P	Age, Lac, V
Elimination progressive	Age, Lac, V, P, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}O_2$, Masse Corporelle	Age, Lac, V, P, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}O_2$, Masse Corporelle

Note : V=Vitesse, Lac=Lactatémie, P = puissance, $\dot{V}CO_2$ = débit de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_2$ = consommation d'oxygène.

Nous obtenons cette fois 3 modèles à tester avec la totalité de notre population au « seuil » et pour lesquels nous avons vérifié les égalités des matrices de variances-covariances (Tableau 15).

Tableau 15 : Test d'égalité des matrices variances-covariances au « seuil lactique ».

Modèles	Khi ₂	P>Khi ₂
Age, Lac, V	30,72	0,0022
Age, Lac, V, Taille, P	44,26	0,0452*
Age, Lac, V, P, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}O_2$, Poids	94,95	0,0009
Age, Lac, Taille, P	35,30	0,0186*

Note : *Matrices des variances-covariances égales, fonction discriminante linéaire
V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, Cad=Cadence, FC=Fréquence cardiaque, $\dot{V}CO_2$ = débit de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_2$ = consommation d'oxygène, P = puissance

Nous avons alors deux modèles avec des fonctions discriminantes linéaires et deux modèles avec des fonctions discriminantes quadratiques. L'étude cette fois des taux d'erreur de l'ensemble des cyclistes de notre population afin de pouvoir déterminer le modèle le plus valide et le plus efficace est donnée par le Tableau 16.

Tableau 16 : Taux d'erreur pour les modèles au « seuil lactique », après filtration

Variables de la fonction discriminante	Taux d'erreur	Taux d'erreur méthode "jackknife"	Différence entre les taux
V, Age, Lac	31,25%	40,18%	8,93%
Age, Lac, V, Taille, P	31,25%	36,61%	5.36%
Age, Lac, V, P, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}O_2$, Masse Corporelle	20,54%	42,86	22.32%
Age, Lac, Taille, P	31,25%	36,61%	5.36%

Note : V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, Cad=Cadence, FC=Fréquence cardiaque, $\dot{V}CO_2$ = débit de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_2$ = consommation d'oxygène, P = puissance

Deux modèles semblent être tout aussi valide et efficace l'un que l'autre car ils présentent les mêmes taux d'erreur, il s'agit du modèle composé de 5 variables (Age, Lac, Taille, V et P) et du modèle à 4 variables (Age, Lac, Taille et P). Le reclassement de l'ensemble de notre population pour ces deux modèles est donné par les tableaux suivants (Tableau 17 et Tableau 18).

Tableau 17 : Répartition des cyclistes « au seuil lactique» pour la fonction à 5 variables

Catégorie d'origine	Reclassé dans			Total
	1	2	3	
1	14	11	0	25
2	8	44	6	58
3	0	10	19	29
Total	22	65	25	112

Tableau 18 : Répartition des cyclistes « au seuil lactique» pour la fonction à 4 variables

Catégorie d'origine	Reclassé dans			Total
	1	2	3	
1	13	12	0	25
2	6	45	7	58
3	0	10	19	29
Total	19	67	26	112

b) A la « $\dot{V}O_2 \text{ Max}$ ».

Le travail fait sur les données à $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ est le même que celui effectué au « seuil lactique ». Les modèles issus des différentes méthodes de sélection de variables sont au nombre de trois parmi lesquels deux fonctions discriminantes quadratiques composées des variables V, Age et Lac (similaire à celui obtenu au « seuil lactique ») pour l'une et des variables V, $\dot{V}CO_{2 \text{ Max}}$, $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$, Lac, Age et Dev pour l'autre. Le troisième modèle correspond à une fonction discriminante linéaire contenant les variables V, $\dot{V}CO_{2 \text{ Max}}$, $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$, Lac et Age. Les taux d'erreur pour ces modèles sont présentés dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Taux d'erreur pour les modèles à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ »

Variables de la fonction discriminante	Taux d'erreur	Taux d'erreur méthode "jackknife"	Différence entre les taux
V, Age, Lac	26,42 %	32,08 %	5,66 %
V, $\dot{V}CO_{2 \text{ Max}}$, $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$, Lac, Age	24,53 %	31,13 %	6,6 %
V, $\dot{V}CO_{2 \text{ Max}}$, $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$, Lac, Age, Dev	16,04 %	30,19 %	14,15 %

Note : V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, Cad=Cadence, FC=Fréquence cardiaque, $\dot{V}CO_{2 \text{ Max}}$ = débit maximal de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ = consommation maximale d'oxygène.

Parmi les trois modèles sélectionnés, le plus valide et efficace semble être celui contenant trois variables (V, Age et Lac). Ce résultat est similaire à celui obtenu au « seuil lactique » et tout comme au « seuil », nous allons isoler les individus mal classés par l'application de cette fonction discriminante et de nouveau procéder aux méthodes de sélection de variables sur les individus bien classés.

Le nombre de cyclistes bien classés à « $\dot{V}O_{2 \text{ max}}$ » par l'utilisation de la fonction discriminante quadratique contenant les variables V, Age et Lac est de 79 individus. Les résultats de méthodes de sélection de variables sur ces derniers sont fournis par le Tableau 20.

Tableau 20 : Sélection des variables discriminantes à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ » après élimination des mal classés avec le modèle à 3 variables.

Méthodes de sélection	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 25%	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 10%
Pas-à-pas	Age, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$, Lac, Dev	Age, Lac, V
Introduction progressive	Age, Lac, V	Age, Lac, V
Élimination progressive	V, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$, Lac, Age	Age, Lac, V

Note : V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, FC=Fréquence cardiaque, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$ = débit maximal de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ = consommation maximale d'oxygène.

Nous obtenons alors trois modèles et l'étude de l'homogénéité des matrices des variances-covariances pour les deux modèles à 4 variables nous est donné par le Tableau 21 car pour le modèle avec les variables Age, Lac et Dev, nous savons qu'il s'agit d'une fonction discriminante quadratique puisque $p > k\chi^2 = 0,0022$ ce qui est inférieure à $\alpha = 10\%$.

Tableau 21 : Test d'égalité des matrices variances-covariances au « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ ».

Modèles	$K\chi^2$	$P > K\chi^2$
Age, Lac, V	30,72	0,0022
Age, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$, Lac, Dev	37,96	0,0089
V, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$, Lac, Age	41,42	0,0033

Note : V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$ = débit maximal de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ = consommation maximale d'oxygène.

D'après les résultats du Tableau 21, toutes les fonctions discriminantes à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ » sont donc quadratiques.

L'étude des différents taux d'erreur à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ » après l'élimination des individus mal classés suite à la première analyse discriminante sur ces données nous est fourni par le tableau suivant (Tableau 22).

Tableau 22 : Taux d'erreur pour les modèles à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ », après filtration

Variables de la fonction discriminante	Taux d'erreur	Taux d'erreur méthode "jackknife"	Différence entre les taux
V, Age, Lac	26,42 %	32,08 %	5,66 %
Age, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$, Lac, Dev	31,13 %	32,25 %	1,12 %
V, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$, Lac, Age	23,58 %	30,19 %	6,61 %

Note : V=Vitesse, Lac=Lactatémie, Dev=Développement, $\dot{V}CO_{2\text{Max}}$ = débit maximal de dioxyde de carbone, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ = consommation maximale d'oxygène.

Il semble que même si le modèle avec les variables Age, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$, Lac et Dev n'a pas le plus petit taux d'erreur parmi les modèles sélectionnés, il présente une validité supérieure par rapport à la différence avec le taux d'erreur obtenu par la méthode « jackknife »

c) Les fonctions choisies

En résumé, on obtient donc au « seuil lactique » deux fonctions discriminantes linéaires valides ayant la même efficacité. L'une contient les variables Age, Lac, V, Taille et P et l'autre, les variables Age, Lac, Taille et P. Le meilleur d'entre ces deux modèles est celui ayant la plus petite valeur du « lambda de Wilk ». Cette valeur fournie par SAS est de 0,511 pour le premier (avec les variables Age, Lac, V, Taille et P) et de 0,483 pour le second (composé des variables Age, Lac, Taille et P). Ainsi au « seuil lactique » notre choix se portera sur la fonction discriminante linéaire composée des variables Age, Lac, Taille et P dont les coefficients sont rapportés dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Coefficients de la fonction discriminante linéaire au « seuil lactique »

Variables	Groupe		
	1	2	3
Constante	-684,043	-663,541	-653,009
Age	5,363	5,059	4,593
Lac	26,133	25,694	27,497
Taille	6,772	6,732	6,680
P	-0,274	-0,290	-0,292

Ce qui donne par exemple la fonction discriminante linéaire pour le groupe 1, (X étant l'ensemble des variables): $f(X|1) = 5,363 \text{ Age} + 26,133 \text{ Lac} + 6,772 \text{ Taille} - 0,274 \text{ P} - 684,043$. Les mêmes calculs sont faits pour chaque groupe.

A la « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ », la fonction discriminante choisie est celle contenant les variables Age, $\dot{V}O_{2\text{Max}}$, Lac et Dev. Il s'agit cette fois-ci d'une fonction discriminante quadratique et les coefficients de sa fonction sont présentés dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Coefficients de la fonction discriminante quadratique à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ ».

Groupe	Variables	Age	Lac	$\dot{V}O_2$	Dev
1	Age	-0,0583			
	Lac	-0,0172	-0,0899		
	$\dot{V}O_{2\text{Max}}$	-0,0249	-0,0380	-1,8796	
	Dev	-0,0387	0,0543	-0,2148	-2,3690
	Pente ^a	3,9618	2,1381	21,8474	41,4302
	Constante ^b				-277,3433
2	Age	-0,0670			
	Lac	0,0030	-0,0917		
	$\dot{V}O_{2\text{Max}}$	0,0826	-0,1016	-3,6116	
	Dev	0,1726	-0,0378	0,6049	-2,3194
	Pente ^a	-0,6996	3,3134	18,4148	24,9754
	Constante ^b				-145,7378
3	Age	-0,1685			
	Lac	-0,0430	-0,0596		
	$\dot{V}O_{2\text{Max}}$	0,0319	0,0725	-2,4599	
	Dev	0,0598	0,0490	0,4624	-1,0984
	Pente ^a	5,4316	1,3120	9,3209	9,8311
	Constante ^b				-108,6965

^a : pente de la fonction ; ^b : constante de la fonction.

Ce qui donne par exemple la fonction discriminante quadratique pour le groupe 1 (X étant l'ensemble des variables):

$f(X|1) = - 0,0583 \text{ Age}^2 - 0,0172 \text{ Lac*Age} - 0,0899 \text{ Lac}^2 + \dots + 21,8474 \dot{V}O_2 + 41,4302 \text{ Dev} - 277,3433$. Les mêmes calculs sont faits pour chaque groupe.

La règle de décision ensuite pour ces fonctions discriminantes est la suivante : la probabilité à posteriori d'appartenir au $j^{\text{ième}}$ groupe (dans notre cas gr1 à 3 ; avec π_1 , π_2 et π_3 les probabilités à priori d'être dans chacun de ces groupes) est donc :

$$\pi(j|X) = \pi_j f(X|j) / (\pi_1 f(X|1) + \pi_2 f(X|2) + \pi_3 f(X|3))$$

Au final pour chaque individu, nous obtenons 3 valeurs et la probabilité maximale donne le groupe d'appartenance.

d) Représentation graphique des répartitions

L'analyse discriminante est aussi appelée analyse factorielle discriminante et pour cause, elle permet à l'aide d'un petit ensemble de deux nouveaux facteurs de conserver la majorité de l'information contenue dans les variables du modèle et ceci permet une représentation sur un graphique à deux dimensions de l'ensemble de notre population en tenant compte de toutes les variables du modèle. On a donc un axe F1 et un axe F2 qui représentent à eux deux 100 % de la discrimination et on peut apprécier le reclassement effectué par la fonction discriminante.

Au « seuil lactique », la représentation graphique de la répartition des cyclistes par rapport aux axes F1 et F2 expliquant 100 % de la discrimination nous permet de visualiser le reclassement effectué par la fonction discriminante linéaire composé des variables Age, Lac, Taille et P au moyen des figures « à priori » (Figure 9) et « à posteriori » (Figure 10).

Figure 9 : Répartition des individus au « seuil lactique » avant utilisation de la fonction discriminante (à priori)

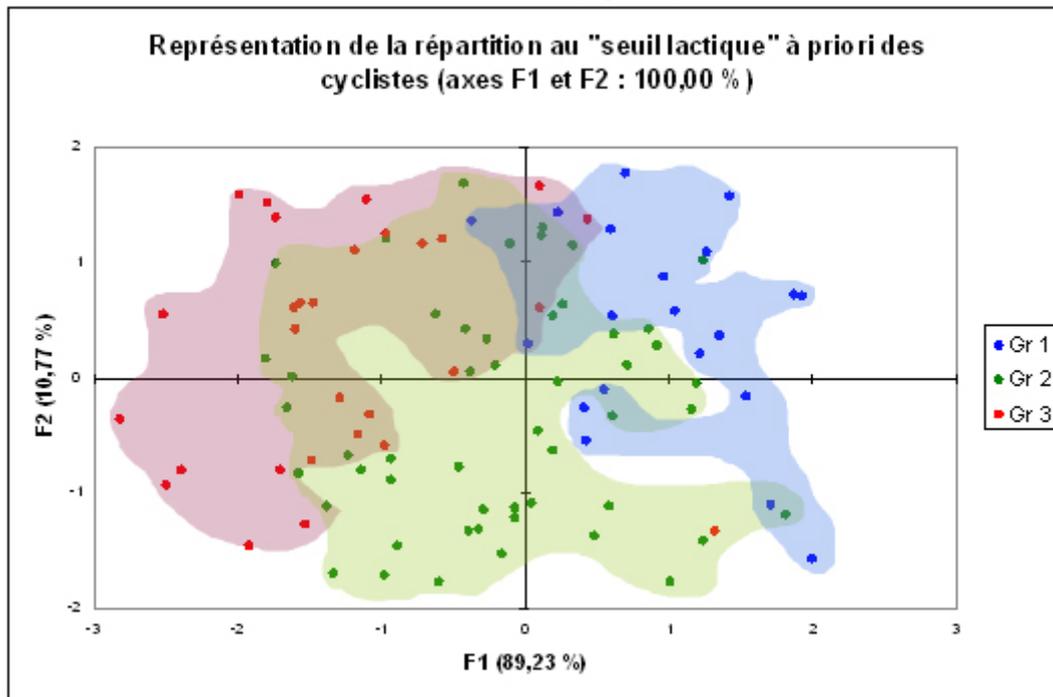
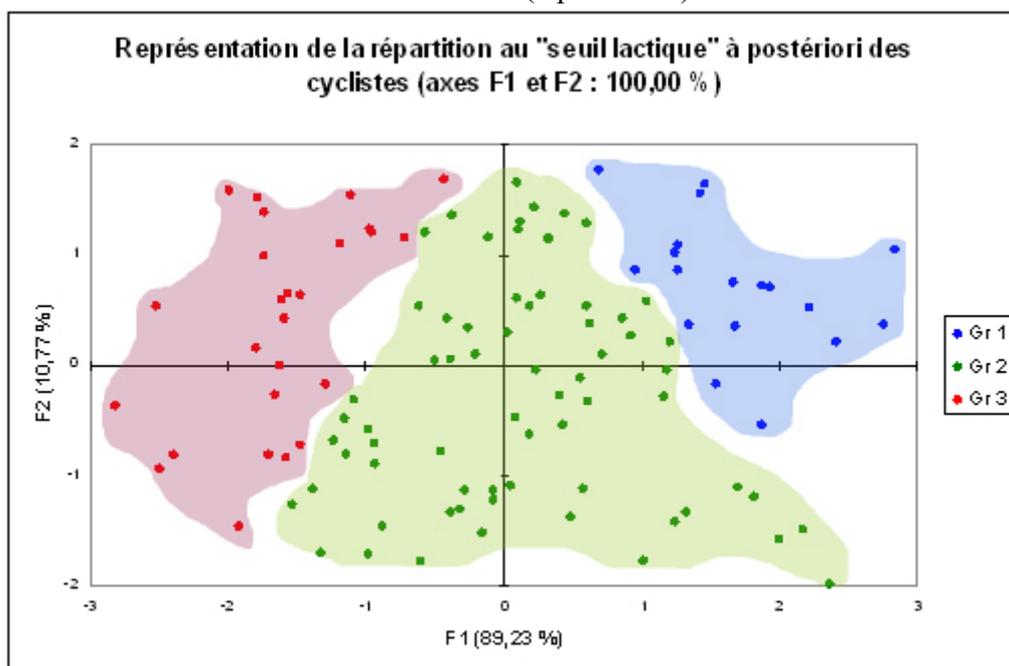


Figure 10 : Répartition des individus au « seuil lactique » après utilisation de la fonction discriminante (à posteriori)



A la « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ », la répartition des cyclistes sur les axes représentant 100% de la discrimination selon leur niveau est donnée par la Figure 11 avant l'utilisation de la fonction discriminante quadratique utilisant les variables Age, $\dot{V}O_2$, Lac et Dev (à priori) et après l'utilisation de cette fonction (à posteriori) par la Figure 12.

Figure 11 : Répartition des individus à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ » avant utilisation de la fonction discriminante (à priori)

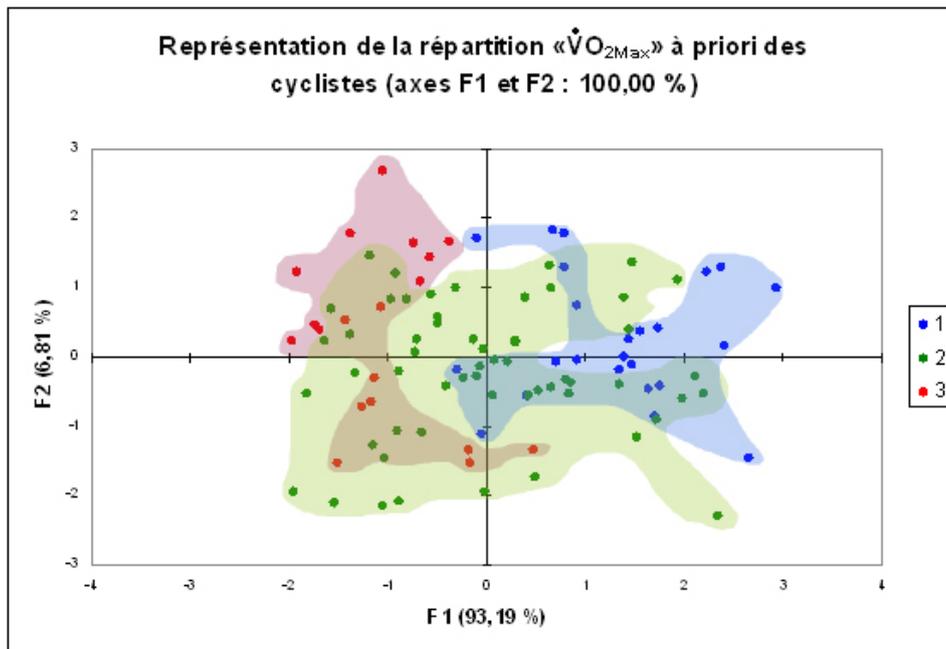
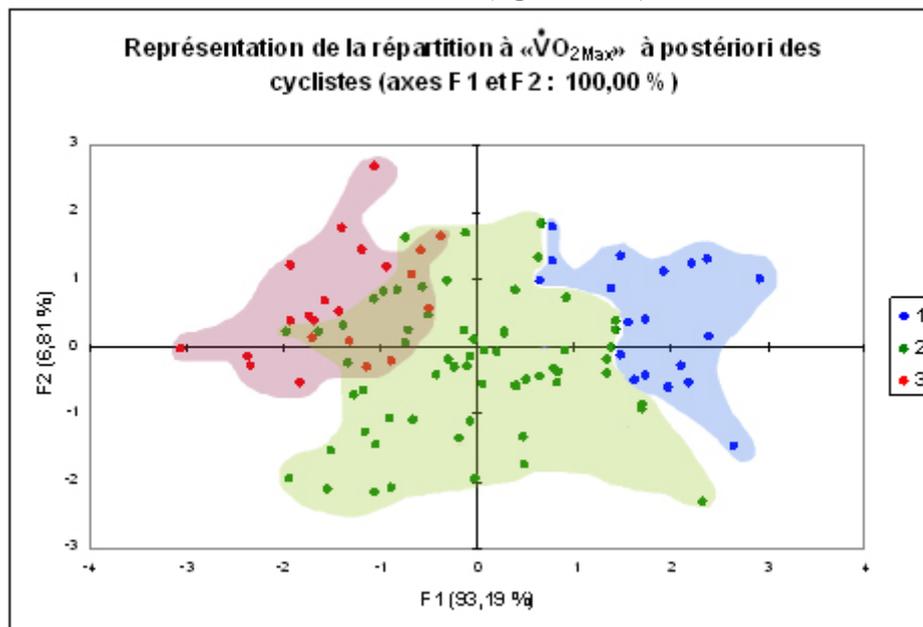


Figure 12 : Répartition des individus à « $\dot{V}O_{2\text{Max}}$ » après utilisation de la fonction discriminante (à posteriori)



2.4. Discussion

Au « seuil lactique », avec un taux d'erreur de 31%, nos résultats montrent qu'il est possible en laboratoire de prédire le niveau d'un athlète âgé de 16 à 25 ans en évaluant les marqueurs suivant (Age, Lac, Taille et P). Ce modèle confirme donc les travaux montrant que la puissance développée est un paramètre qui influence la performance (Faria et al, 2005) (Di Prampero & Feretti, 1999). Il est à remarquer que jusqu'au seuil, la lactatémie intervient alors comme une constante dans ce modèle.

A « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ », la performance semble être dépendante des variables Age, $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$, Lac et Dev. Par ailleurs, ce modèle ne prend en compte que des conditions rencontrées lors d'une épreuve « classique » en laboratoire. Ainsi, sur le terrain, la performance dépend aussi des caractéristiques aérodynamiques de l'athlète car les contributions relatives de la résistance de l'air sur celle-ci augmentent de façon curviligne avec le temps d'exécution (Olds, 1993) ; cependant, cette notion reste à moduler : en effet, la puissance (P) et les caractéristiques aérodynamiques (surface frontale notamment) sont des variables dépendantes et notre modèle les intègre au moins partiellement. De plus, même l'aérodynamisme du matériel du cycliste est un élément clé pour l'amélioration des performances du cyclisme moderne (Belluye & Cid, 2001), particulièrement pour les cyclistes du niveau le plus élevé (c'est-à-dire ceux du groupe 1, niveau national). Il est également à noter que pour les individus mal classés, le calcul de probabilité a posteriori a montré que la majorité des classements erronés se sont produits dans une zone d'incertitude, autrement dit ces athlètes se situent à la frontière de deux groupes.

Par ailleurs la variable puissance rend compte des capacités physique de l'athlètes ; la lactatémie des caractéristiques biochimiques ; la taille est un marqueur morphométrique. Quant à l'âge, elle pourrait intervenir, sous réserve, comme marqueur de l'expérience du sujet. D'ailleurs lors de la première analyse discriminante, que ce soit au « seuil lactique » ou à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ », nous retrouvions l'âge et la lactatémie comme caractères discriminants et c'est la variable vitesse qui venait compléter le ou les modèles en tant que variable rendant compte des capacités physiques de l'athlète. Sachant que la vitesse qui est à « $\dot{V}O_{2 \text{ Max}}$ », significativement différente entre tous les niveaux étudiés (départemental, régional et national), est aussi un élément à prendre en compte dans l'aérodynamisme du cyclisme car sur le terrain, le cycliste dépense de l'énergie à lutter contre la résistance de l'air proportionnellement à celle-ci. C'est d'ailleurs une des raisons qui nous a conduit à une investigation plus poussée des paramètres discriminants de notre modèle surtout que Belluye

& Cid (2001) ont montré que outre l'aspect matériel, le positionnement était primordial et qu'il nécessite d'aborder les aspects cinématique et dynamique de la gestuelle grâce à des outils vidéo et des capteurs d'efforts et ce malgré le fait qu'une optimisation fine de la position selon eux devrait faire appel à des outils d'analyse complexes.

Il peut être intéressant de noter que notre modèle ne fait pas intervenir certaines variables comme le type de fibre musculaire et le pourcentage de capillarisation du muscle, connues pour conditionner la performance (Bosquet et al, 2002). De même l'aspect psychologique (Brutsaert 2006)(Hautala 2006), le statut hormonal (Botcazout et al 2006) et enfin la masse grasseuse (Hautala 2006) ne sont pas pris en compte. Enfin, l'aspect génétique, sachant que notre modèle intègre la taille et la masse, n'est que très partiellement intégré (Brutsaert et al. 2006). Ceci pourrait expliquer que dans notre modèle, les « frontières » entre les groupes ne soient pas franches, notamment pour les données à « $\dot{V}O_2$ Max », (Figure 11 et Figure 12) de plus, en intégrant ces variables dans notre modèle nous devrions pouvoir diminuer le taux d'erreur.

En conclusion, notre modèle mathématique permet un classement des cyclistes satisfaisant mais perfectible, par ailleurs nous devons également le valider par un travail prédictif sur le terrain. L'utilisation d'autres méthodes d'analyses pourrait également permettre d'affiner notre résultat.

Ce travail a donné lieu à la publication d'une communication brève intitulé « *Analyse de variables permettant la détermination du niveau d'un cycliste* », dans le revue Science & Sports (Soudain-Pineau et al. (2007)).

Chapitre III – Analyses des variables hormonales et de
l'influence des variables physiques et physiologiques
sur la puissance, cas de cyclistes professionnels

3.1. Protocole

3.1.1. Matériel

Le matériel utilisé pour la réalisation des épreuves d'effort au laboratoire présente quelques similitudes avec celui utilisé dans la partie précédente. Il est constitué d'une chaîne de mesure de la consommation d'oxygène, d'un ergomètre, d'une chaîne électrocardiographique d'effort et d'un tensiomètre automatique. Dans ce travail, l'ergomètre utilisé est un ergocyclomètre. La configuration de cet ensemble est représentée sur la Figure 13:

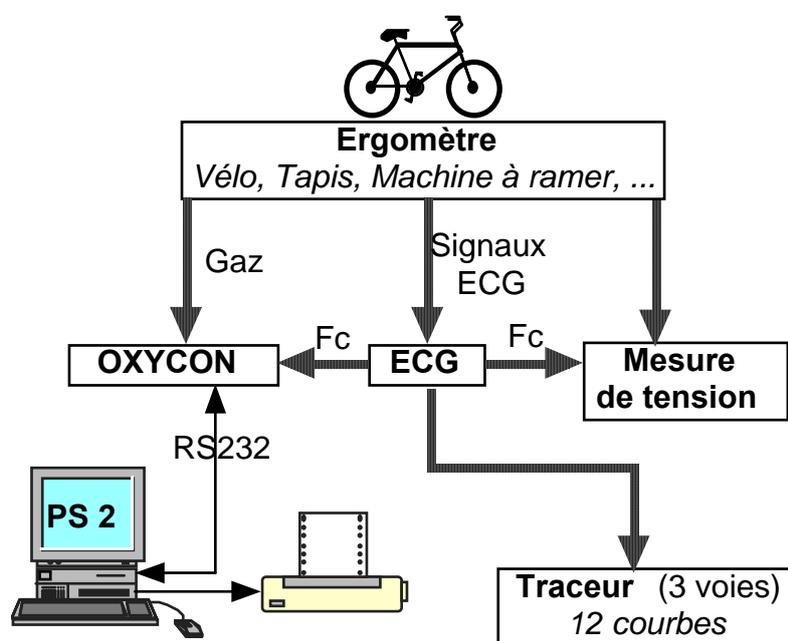


Figure 13 : Configuration du matériel utilisé pour la réalisation des épreuves d'effort.

3.1.1.1. La chaîne de mesure de la consommation d'oxygène

3.1.1.1.1. Descriptif du matériel

L'appareil utilisé pour la mesure de la consommation d'oxygène est de type Oxycon V fabriqué par Jaeger (Hoechberg, Allemagne). Ce dispositif comprend un gazomètre à sec, un analyseur d'oxygène de type paramagnétique, un analyseur de gaz carbonique de type

infrarouge, un calculateur avec affichage digital et une imprimante, l'ensemble étant monté sur un chariot mobile.

3.1.1.1.2. Principe de mesure

Le sujet testé inspire, par l'intermédiaire d'un embout buccal ou d'un masque, l'air ambiant. Les gaz expirés sont acheminés au gazomètre de l'Oxycon V, grâce à une valve unidirectionnelle de type Hans Rudolph 2700 (Kansas City, USA). Les gaz expirés sont collectés dans un sac-tampon de 3 litres avant de pénétrer dans le gazomètre. Lorsque le débit ventilatoire s'accroît de façon importante, une partie des gaz expirés est ainsi retenue dans le sac tampon et ne passe dans le gazomètre qu'au cours de l'inspiration suivante. De cette façon, l'erreur due à la rotation trop accélérée et à la résistance de retour trop élevée du débitmètre est exclue.

Le gazomètre est un débitmètre à turbine jaugé (volumètre à gaz de type EDF-GDF), dont la chambre sert de chambre de mélange des gaz. Un système de double sac à clapet permet de déterminer les volumes gazeux et la fréquence des cycles respiratoires. La vitesse de rotation du débitmètre qui correspond au volume expiré, est convertie en impulsions électriques.

Un échantillon de gaz est prélevé par l'intermédiaire d'une pompe à vide et acheminé à travers un système d'assèchement vers les chambres d'analyse.

L'analyseur d'oxygène est basé sur le principe paramagnétique : l'oxygène soumis à un champ magnétique voit ses molécules orientées dans le sens du champ. Le champ est alors modifié par la somme des dipôles que constituent ces molécules. Par référence à la valeur du champ initial et par différence avec le diamagnétisme de l'air, l'analyseur renvoie une valeur analogique proportionnelle au pourcentage de l'oxygène dans l'échantillon gazeux.

L'analyseur de gaz carbonique répond au principe du spectrophotomètre. La longueur d'onde utilisée se situe dans l'infrarouge. On mesure l'absorption d'un rayon lumineux de cette longueur d'onde par le CO₂. Par mesure différentielle avec une référence qui est l'air, une valeur analogique proportionnelle au pourcentage de CO₂ est envoyée. Le problème majeur de ce principe d'analyse étant la grande sensibilité à l'eau, on comprend l'importance du système complexe d'assèchement des gaz avant leur analyse.

Une fois la détermination effectuée, le volume prélevé est renvoyé à la chambre, de telle façon que le volume du gaz expiré reste entier. Le volume et la concentration des gaz expirés sont déterminés de façon continue et une fois qu'ils sont transformés en signaux

électroniques, ceux-ci sont numérisés.

Ces données numériques sont ensuite utilisées pour effectuer le calcul des autres paramètres qui sont : la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), le débit de gaz carbonique ($\dot{V}CO_2$), le quotient respiratoire (R) et les corrélations sur les valeurs en STPD. Les résultats sont affichés sur l'écran digital, et envoyés, toutes les 30 secondes ou à chaque minute, selon le réglage choisi au début des mesures, à travers un port série RS232.

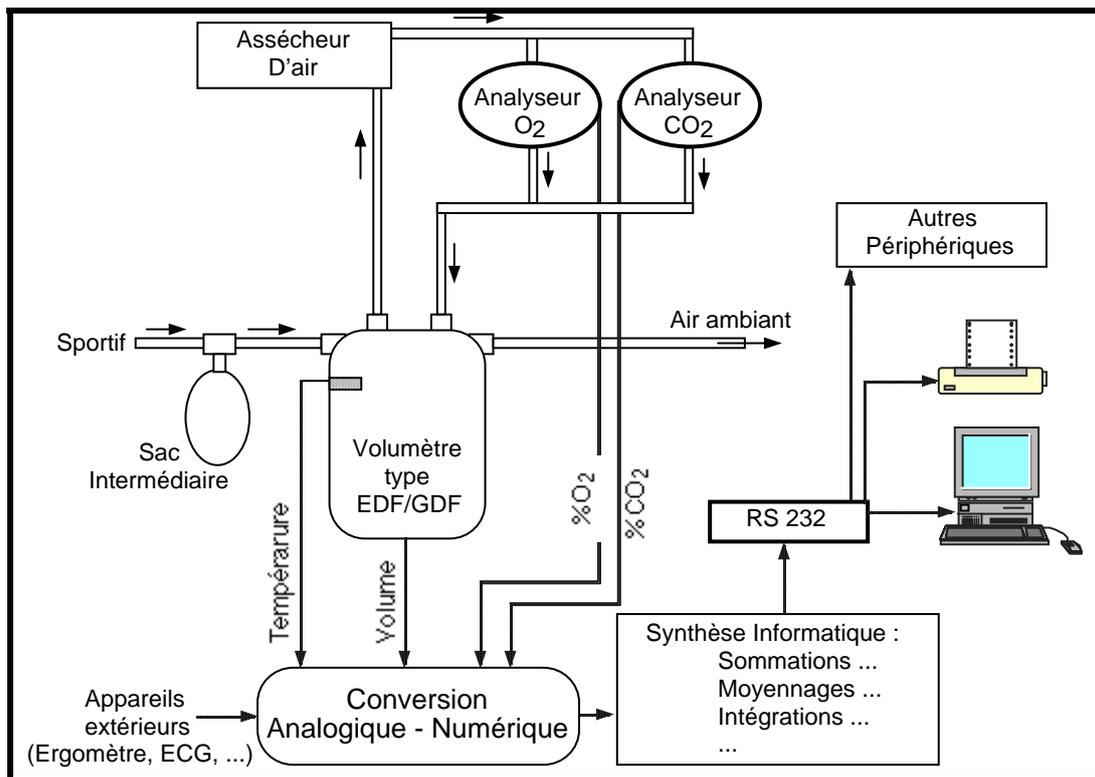


Figure 14 : Schéma descriptif de l'Oxycon V.

3.1.1.2. L'ergocycle

Il s'agit d'un ergocycle Excalibur Sport (Lode B.V., Groningen, Hollande) avec mesure des forces sur les pédales de la société Biométries (Orsay, France).

Le système de freinage est un principe électromagnétique permettant un contrôle précis de la charge continuellement ajustable jusqu'à 1000 watts (un système de feedback permet d'éliminer l'influence de la température ce qui garantit la montée effective des charges jusqu'à 1000 watts). Le mode de freinage est linéaire ou hyperbolique dépendant ou indépendant de la vitesse de pédalage.

L'ergomètre est contrôlé par un programmeur de charge autonome, permettant une programmation aisée des protocoles de travail (jusqu'à 50 protocoles) avec affichage digital

des paramètres (charge, vitesse de pédalage, temps écoulé et fréquence cardiaque si le système est équipé d'un émetteur de cardiofréquence). La précision de la charge est $\leq 2\%$ selon le constructeur. Le programmeur est muni d'une interface RS232 pour connexion à un micro-ordinateur type PC.

La lecture de la fréquence de pédalage s'effectue sur un compteur analogique disposé sur l'ergocyclomètre (jusqu'à 180 tours/mn avec une précision de $\pm 2\%$ selon le constructeur) ou sur le programmeur (jusqu'à 225 tours/mn avec une précision de ± 1 rpm).

Sur les manivelles, au niveau des pédales, sont fixées des jauges de contrainte reliées à un dispositif électro-optique pour mesurer les forces exercées sur les pédales. Les signaux sont amplifiés et transmis au moyen de IR-LEDs. Les récepteurs optiques enregistrent le début de la rotation, l'angle de la pédale, le couple au niveau de chaque pédale. La force maximale mesurable est de 150 kgf avec une résolution de 2° et une détection sur 360° . Le boîtier de connexion est muni d'une carte interface et est relié au programmeur de charge et à l'ordinateur de type PC. Un logiciel sous DOS permet le traitement des informations. Il permet d'enregistrer et de visualiser en chiffres et sur graphique les pics de force en fonction de l'angulation pour chaque côté.

L'ergomètre permet un réglage horizontal et vertical de la selle et du guidon pour un positionnement optimal du sujet. Dans un souci d'ergonomie, nous avons changé la selle et le guidon original pour les remplacer par du matériel utilisé par les coureurs cyclistes sur leur propre matériel (selle "Rolls" de San Marco et guidon de course muni de cocottes de frein). De même les sujets utilisent des pédales avec fixation automatique (Time, Look, Shimano) adaptées aux chaussures du coureur.

3.1.1.3. Chaîne électro-cardiographique

Nous disposons d'un système ECG adapté à l'effort. Il est du type Marquette Case 15 (Marquette, Milwaukee, USA). Il est constitué d'un module d'acquisition permettant la digitalisation de l'ensemble des signaux, d'un écran haute résolution, d'un traceur à peigne thermique, d'un clavier alphanumérique pour l'entrée des paramètres du patient, d'un clavier de commandes de séquences d'exercice avec bouton sélecteur, d'un disque dur Winchester (IBM, New York, USA) de 20 MO, et d'un lecteur de disquettes.

Le signal ECG est analysé sur 16 dérivations avec les mesures du segment ST et des

pentés des dérives. Une procédure de filtrage numérique corrige les dérives et élimine les artefacts respiratoires. Sur l'ECG, les points de mesure du segment ST peuvent être positionnés automatiquement ou manuellement. Il existe une mise en mémoire automatique des segments d'ECG anormaux pendant le test avec documentation automatique des événements d'arythmie et possibilité de revue instantanée de tous les événements à la fin du test.

Trois dérivations sélectionnables défilent en continu sur l'écran pendant le test. Un complexe médian sur toutes les dérivations (jusqu'à 16) est programmable avec mise en mémoire d'un complexe gelé de pré-exercice pour comparaison. La mesure du ST est visualisable en pré-exercice et réactualisée continuellement pendant l'exercice. Il existe un affichage digital de la fréquence cardiaque.

3.1.1.4. L'appareil de mesure du lactate

3.1.1.4.1. Principe de mesure

Il s'agit d'une mesure enzymatique directe du L-lactate en solution au niveau d'une sonde (la L-Lactate-oxydase enzymatique est contenue dans une membrane pour lactate). La réaction est la suivante :



3.1.1.4.2. Matériel

La lactatémie est déterminée avec un appareil de type YSI 2700 Select (Fisher Bioblock Scientific, Illkirch, France). Il est constitué d'une chambre d'échantillonnage comportant une électrode de référence munie d'une membrane enzymatique et d'un barreau d'agitation activé par un moteur situé sous la chambre d'échantillonnage. A l'arrière de la chambre d'échantillonnage est située une cellule destinée à recueillir une solution étalon.

L'appareillage dispose de 3 pompes : la première pour prélever une substance tampon, la seconde une substance étalon et la troisième est une sorte de seringue reliée par un tuyau à un bras mobile (Sipper) muni d'une pipette qui se déplace latéralement et verticalement. La chambre d'échantillonnage est reliée à un flacon destiné à recueillir les déchets et les trop-pleins de substance.

Pour l'étalonnage de l'appareil, la pompe "étalon" aspire la substance étalon de son flacon et la transfère dans la cellule située à l'arrière de la chambre d'échantillonnage. Le Sipper se déplace à la verticale de cette cellule et la pipette en aspire 25 microlitres. Le Sipper

se déplace ensuite vers la cellule de réception de la chambre d'échantillonnage et y déverse les 25 microlitres. La pompe "tampon" aspire alors la substance tampon et l'envoie directement à travers l'ensemble pompe/Sipper. Le barreau d'agitation mélange minutieusement le contenu de la chambre d'échantillonnage et la réaction enzymatique s'effectue très rapidement.

Pour la mesure de l'échantillon sanguin, la procédure est sensiblement voisine : le Sipper se déplace dans une seconde position destinée à recueillir le surnageant plasmatique, après centrifugation, d'un prélèvement sanguin recueilli dans un cône plastique de 1,5 ml. La pompe Sipper en aspire 25 microlitres et se déplace vers la cellule d'analyse de la chambre d'échantillonnage pour y déverser son contenu. La substance tampon est alors ajoutée selon la même procédure que pour l'étalonnage. Le mélange est activé par le barreau d'agitation. La réaction enzymatique s'effectue.

La chambre d'échantillonnage est rincée par un excès de substance tampon qui se déverse ensuite dans la bouteille de recueil des déchets.

Les résultats chiffrés s'affichent sur un écran à cristaux liquides. Une imprimante intégrée permet d'effectuer une copie d'écran.

3.1.1.5. Techniques de dosage des paramètres hormonaux

La testostérone, la LH et la prolactine sont dosées par méthode immunoradiométrique en utilisant un kit Immunotech (Beckman Coulter, Californie, USA).

La testostérone libre est dosée par radio-immunologie (kit DSL (Beckman Coulter, Californie, USA)) et la FSH par radio-immunologie en phase solide (Kit Coat-A-Count FSH IRMA (Dade Behring, Marbourg, Allemagne)).

Le dosage du cortisol est réalisé par technique d'immuno-chimie luminescence (Kit Bayer, Leverkusen, Allemagne)

Concernant le dosage de l'insuline, il s'agit d'une technique dite E.L.I.S.A (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay). Cette technique E.L.I.S.A. se fait sur microplaque MRX. Sur celle ci sont fixés des anticorps monoclonaux très spécifiques des épitopes de l'insuline. D'autre part l'utilisation d'anticorps monoclonaux sur lesquels sont fixés une peroxydase réalise ainsi une technique E.L.I.S.A. "sandwich", la peroxydase réagissant alors avec H₂O₂. La révélation se fait avec du tetraméthylbenzidine et la lecture avec un spectrophotomètre à une longueur d'onde de 450 nm.

Composition des réactifs :

- Microplaque 96 puits
- Anti-insuline HRP
- Chromogen triméthylbenzidine
- H₂O₂ dans buffer acetate/citrate
- H₂SO₄ (solution d'arrêt)

La linéarité va de $19,4 \pm 3,9$ mU/ml à 85μ 18 mU/ml.

3.1.2. Expérimentation

Tous les protocoles expérimentaux ont été effectués chez des sujets non à jeun, dans des conditions thermiques environnantes maintenues constantes autour de 20°C.

3.1.2.1 Séquence protocolaire

Il est réalisé un test d'effort triangulaire, amenant le sujet de l'état de repos à l'épuisement, afin de déterminer les paramètres maximaux (Puissance maximale, ventilation maximale, consommation maximale d'oxygène, fréquence cardiaque maximale) et la "*zone de transition aéro-anaérobie*" délimitée par les "*seuils aérobie et anaérobie*" que nous définirons plus loin.

3.1.2.2. Déroulement du protocole

3.1.2.2.1. Phase préparatoire

Les épreuves se déroulent le matin, après que le sujet ait absorbé environ 1 heure 1/2 auparavant, un petit déjeuner dont la quantité et la composition ne diffère pas de ses habitudes alimentaires les jours d'entraînement. A titre indicatif, l'enquête alimentaire menée sur un échantillon de 15 sujets, montre que le repas du matin correspond à un apport moyen de 638 Kcal (9,2 Kcal/kg de masse corporelle) dont 69,7% de glucides, 10,5% de protides et 19,8% de lipides.

Le sujet arrive au laboratoire vers 9 heures et est immédiatement pris en charge par l'infirmière.

Le sujet règle alors les hauteur et recul de selle et de guidon, en fonction de ses données morphologiques et de son matériel habituel. Les pédales adaptées aux chaussures du sportif sont fixées aux manivelles de l'ergocyclomètre.

Après avoir mesuré et pesé le sujet, l'infirmière met en place un accès veineux au niveau de l'avant-bras du sujet. Un cathéter stérile est relié par un nécessaire pour perfusion (Perfupack) à un flacon de 500 ml de chlorure de sodium à 0,9%. Un robinet à 3 voies, avec valve d'injection et prolongateur de 25 cm, permet d'effectuer les prélèvements sanguins, de manière stérile et sans aucune gêne douloureuse ni entrave pour les gestes du sujet. La solution saline isotonique permet de rincer et maintenir la voie d'accès sanguine.

Dès lors un bilan sanguin complet de repos est effectué, car tous ces examens sont effectués dans le cadre du suivi médical des sportifs de haut niveau qui sont tenus légalement

à un suivi médico-sportif (Code de la santé publique, décret n° 87-473 du 1er juillet 1987, Titre II, article 5, relatif à la surveillance médicale des activités physiques et sportives). Bien entendu tous ces examens sont effectués avec le consentement éclairé du sujet.

Un délai de 20 minutes environ, en position assise ou allongée selon les préférences du sujet, est nécessaire pour la préparation et l'expédition de tous les tubes aux différents laboratoires d'analyse (Hormonologie, Médecine Nucléaire).

Le sujet s'installe alors en position assise sur l'ergocyclomètre. Les électrodes pour l'électrocardiogramme sont fixées sur le thorax après dégraissage préalable de la peau. Une ceinture munie de l'émetteur d'un cardiofréquencemètre est également placée sur le thorax. Ce double système de contrôle de la fréquence cardiaque permet de compléter ou de suppléer l'électrocardiogramme en cas de parasites ou d'hypersudation décollant les électrodes.

Pendant que l'infirmière met en place le casque et l'embout buccal avec la valve unidirectionnelle, reliant par l'intermédiaire d'un tuyau de 1,5 m et 4 cm de diamètre, le sujet au volumètre de l'Oxycon, le médecin définit sur le programmeur de l'ergocyclomètre la durée et l'intensité des paliers du protocole (50 watts toutes les 3 minutes). Il effectue une prise de tension artérielle et l'infirmière effectue ses prélèvements (lactate et catécholamines) immédiatement avant le début de l'effort.

3.1.2.2.2. Description des tests d'effort

Après une période de 5 minutes d'adaptation à l'embout buccal, l'épreuve se déroule par paliers incrémentaux de 50 watts toutes les 3 minutes jusqu'à l'épuisement. Pendant toute la durée de l'effort, le sujet est constamment refroidi au moyen d'un ventilateur. L'épuisement détermine l'arrêt de l'épreuve et celui-ci peut survenir aussi bien en cours qu'à la fin d'un palier. La charge est alors supprimée mais le sujet continue de pédaler à charge nulle pendant 5 minutes, afin d'éviter un malaise de type vagal. La récupération est surveillée pendant un total de 10 minutes (clinique, cardio-vasculaire et poursuite de la mesure des paramètres ventilatoires et de la lactatémie).

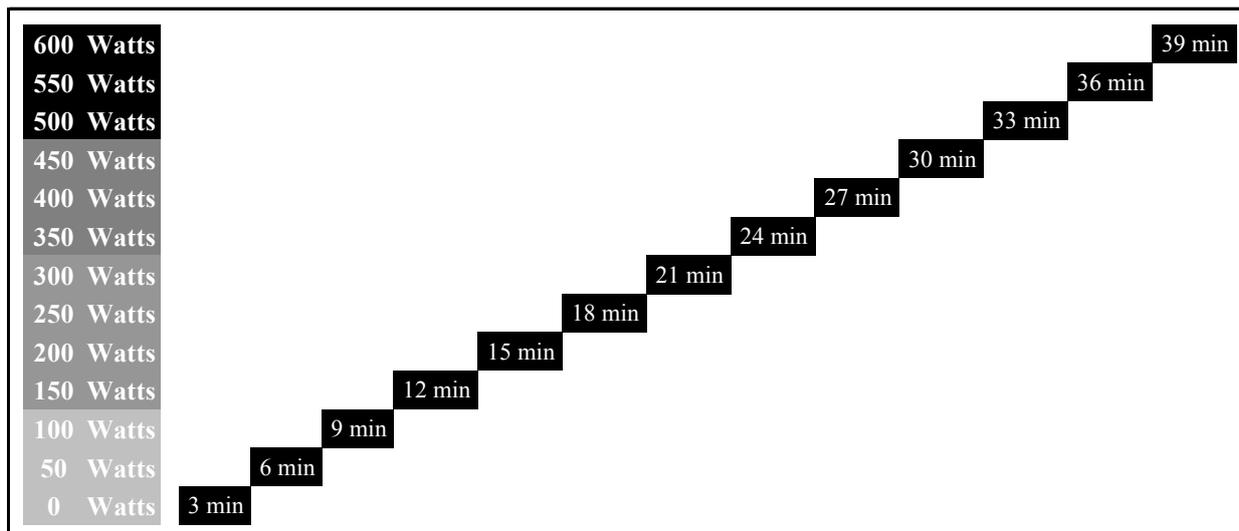


Figure 15 : Protocole de l'épreuve triangulaire.

Pendant la totalité de l'effort et de la récupération, sont mesurées et enregistrées toutes les 30 secondes, la fréquence cardiaque, la ventilation (l/mn), la consommation d'oxygène (l/mn) et la production de gaz carbonique (l/mn).

A la 2^{ème} minute de chaque palier d'effort et à la fin de l'effort sont effectués les prélèvements sanguins pour le dosage du lactate. Les lactates sont également mesurés aux 1^{ère}, 3^{ème}, 5^{ème} et 10^{ème} minute de récupération conformément aux recommandations de Stegmann pour le calcul du "seuil anaérobie" basé sur la courbe des lactates (Individual anaerobic threshold).

L'ultime palier d'effort correspond à la puissance maximale atteinte. La plus haute valeur de la consommation d'oxygène représente la $\dot{V}O_2$ Max. Il peut s'agir d'une valeur isolée (Pic de $\dot{V}O_2$ Max) ou de plusieurs valeurs voisines (plateau de $\dot{V}O_2$ Max). Cette nuance est importante à considérer lorsque l'on veut comparer plusieurs tests d'effort.

Ces deux paramètres permettent d'apprécier la "cylindrée" du sujet. La fréquence cardiaque maximale et le taux maximal de lactates sont 2 paramètres supplémentaires appréciant la réponse cardiaque à la stimulation sympathique et l'appréciation indirecte des réserves glycolytiques ou de leur utilisation.

Immédiatement à l'arrêt de l'effort, un prélèvement sanguin est effectué pour le dosage de la testostérone, la testostérone libre, la prolactine, la FSH, la LH, le cortisol et l'insuline.

Le « seuil anaérobie » est fixé lorsqu'il existe une bonne corrélation entre :

- le second emballement de la ventilation (correspondant au "threshold of

decompensated metabolic acidosis" de Wassermann),

- l'inflexion de la fréquence cardiaque quand elle existe (signe de Conconi),
- l'inflexion du pouls d'oxygène,
- l'élévation des Equivalents,
- la brutale ascension des lactates (onset blood lactate accumulation),
- le point tangentiel sur la courbe des lactates selon la méthode de Stegmann.

(Figure 16)

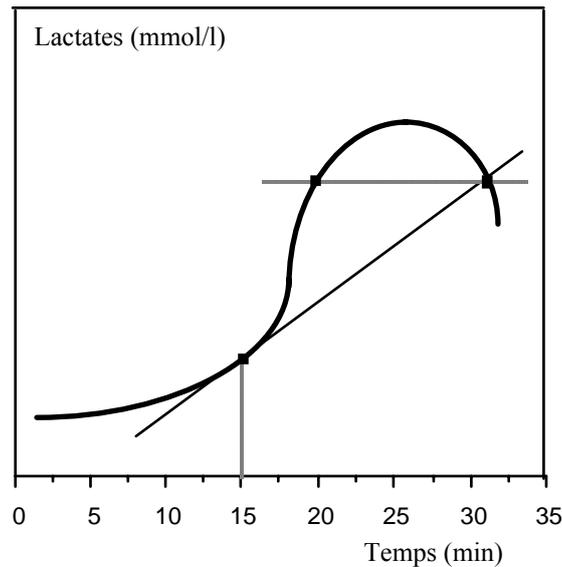


Figure 16 : Seuil Anaérobie : méthode de Stegmann

Quoiqu'il en soit, il nous paraît que c'est le "*seuil anaérobie*", qui marque la rupture d'équilibre des mécanismes physiologiques de l'organisme face à l'intensité de l'exercice. C'est celui-ci qui est intéressant à considérer pour la conduite de l'entraînement. Nous définissons comme "charge de rupture" l'intensité de l'exercice où les mécanismes d'adaptation physiologique à l'effort sont dépassés, et comme "limite maximale de stabilité", la charge de travail immédiatement inférieure à la "charge de rupture". Cette dernière permet de poursuivre l'exercice musculaire en équilibre cardio-respiratoire ou métabolique.

3.2. Etude des variables hormonales

3.2.1. Répartition des différentes hormones

Cette démarche vise à voir si la pratique d'un exercice physique, en l'occurrence le test d'effort à puissance constante, influence les concentrations en testostérone totale, en testostérone libre, en LH (hormone lutéinisante), en FSH (hormone folliculostimulante), en prolactine, en insuline et en cortisol pour notre population de 213 cyclistes professionnels âgés de 23 ± 4 ans. Ils pèsent en moyenne 70 ± 5 kg et mesurent 178 ± 6 cm.

Nous disposons donc pour ces hormones des valeurs obtenues avant et après l'effort. Le Tableau 25 présente les statistiques descriptives de ces valeurs ainsi que la valeur de p du test de Shapiro-wilk qui permet de vérifier l'hypothèse de normalité des distributions.

Tableau 25 : Statistiques descriptives des variables « hormonales »

	Testostérone totale (mg/ml)		Testostérone Libre (ng/ml)		LH (UI/l)		FSH (UI/l)	
	<i>N=213</i>		<i>N=213</i>		<i>N=213</i>		<i>N=213</i>	
	<i>Avant</i>	<i>Après</i>	<i>Avant</i>	<i>Après</i>	<i>Avant</i>	<i>Après</i>	<i>Avant</i>	<i>Après</i>
<i>Moyenne</i>	4,42	6,11	16,57	24,36	2,67	3,31	4,61	5,9
<i>Ecart-type</i>	1,48	1,92	6,11	8,2	1,15	2,08	2,07	2,78
<i>Test de Shapiro wilk (p-value)</i>	0,5965	0,6113	0,5936	0,6541	0,0233*	<0,001*	<0,001*	<0,001*
	Prolactine (mg/l)		Insuline (mU/l)		Cortisol (nmol/l)			
	<i>N=213</i>		<i>N=213</i>		<i>N=213</i>			
	<i>Avant</i>	<i>Après</i>	<i>Avant</i>	<i>Après</i>	<i>Avant</i>	<i>Après</i>		
<i>Moyenne</i>	6,97	9,41	<u>23,44</u>	<u>14,20</u>	379,64	441,51		
<i>Ecart-type</i>	3,24	5,89	13,76	9,33	115,87	142,99		
<i>Test de Shapiro wilk (p-value)</i>	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,3518	0,0937		

Note : *Ces distributions ne suivent pas la loi normale car les valeurs de p obtenues sont inférieures au seuil $\alpha = 5\%$ ($p < 0,05$). Les valeurs soulignées correspondent à l'hormone qui diminue après l'effort

D'après les résultats du Tableau 25, nous pourrions comparer les variables Testostérone totale, Testostérone libre et Cortisol avant et après effort au moyen d'un test-t de

Student pour échantillons appariés. Par contre pour la comparaison des variables LH, FSH, Prolactine et Insuline, nous ferons plutôt appel au test de Wilcoxon qui est l'équivalent non-paramétrique du test-t de Student pour échantillons appariés.

Ces comparaisons nous permettront de savoir si, entre les valeurs obtenues au repos et les valeurs obtenues après effort, nous avons une différence significative pour chacune des variables mesurées. Les résultats sont présentés dans le Tableau 26.

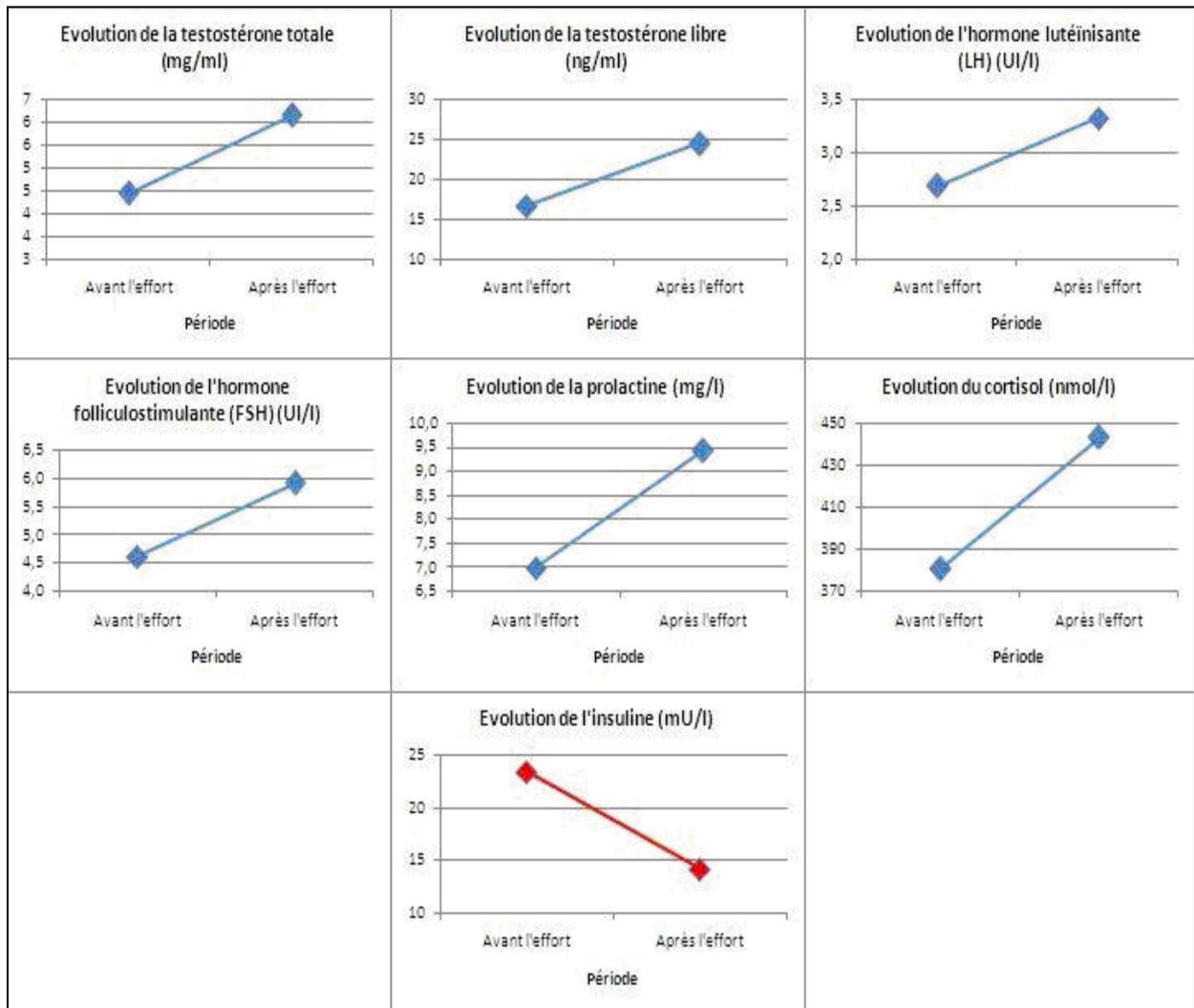
Tableau 26 : Comparaison des hormones avant et après l'effort.

	<i>t de Student</i>	<i>p-value</i>
Testostérone Totale	-23,76	<0,001
Testostérone Libre	-23,21	<0,001
Cortisol	-7,57	<0,001
	<i>Z de Wilcoxon</i>	<i>p-value</i>
LH	4,36	<0,001
FSH	11,96	<0,001
Prolactine	7,76	<0,001
Insuline	7,47	<0,001

Note : si la p-value est inférieure au seuil $\alpha = 0,05$, alors la différence est significative.

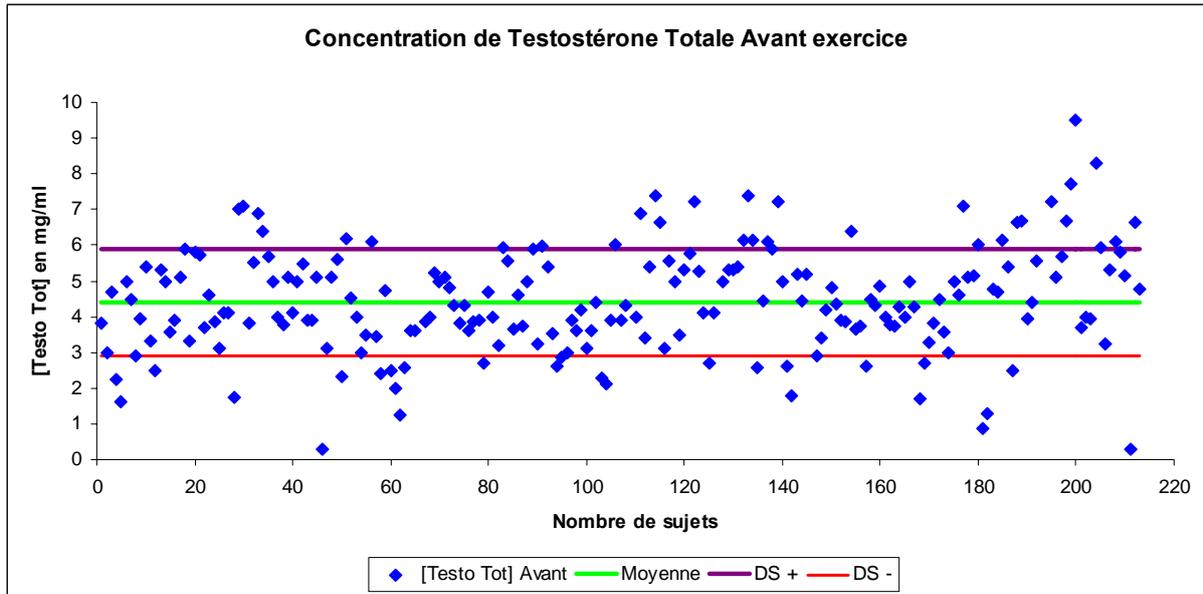
On constate que toutes les variables présentent une différence significative entre la concentration obtenue avant le test d'effort et celle obtenue après. Ainsi la testostérone totale, la testostérone libre, la LH, la FSH, la prolactine et le cortisol augmentent de façon significative après l'effort. Seule l'insuline diminue significativement après le test d'effort. La Figure 17 nous donne un aperçu de l'évolution de ces hormones entre avant et après l'effort.

Figure 17 : Evolution des hormones lors du test d'effort



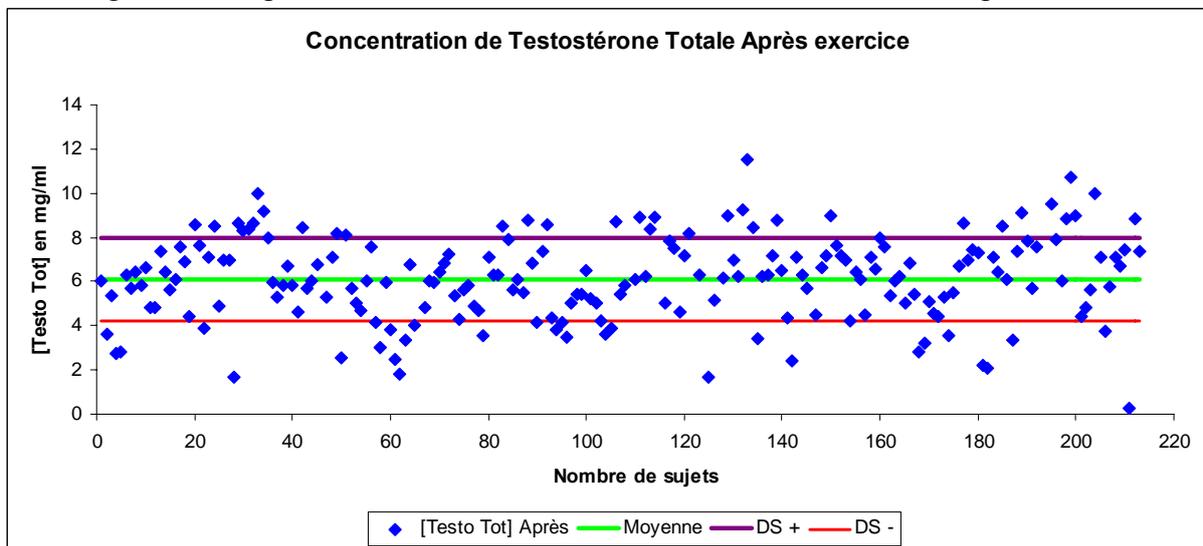
Nous avons par la suite décidé de représenter les individus sur un graphique sous forme de nuage de points en traçant une droite correspondant à la moyenne ainsi qu'une droite dont la valeur est égale à la moyenne plus l'écart-type que nous appellerons DS+ et une autre dont la valeur est égale à la moyenne moins l'écart-type (DS-). Nous avons de la sorte défini une norme pour chaque hormone par rapport à l'intervalle [DS-; DS+] et ainsi isoler les individus en dehors de cette norme. De cette façon, nous pourrions par la suite vérifier si les autres paramètres (physiques et physiologiques) influencent les répartitions entre avant et après le test d'effort. Les figures (Figure 18 à Figure 31) nous donnent une représentation de ces répartitions pour chaque hormone.

Figure 18 : Représentation des concentrations de Testostérone totale avant l'effort



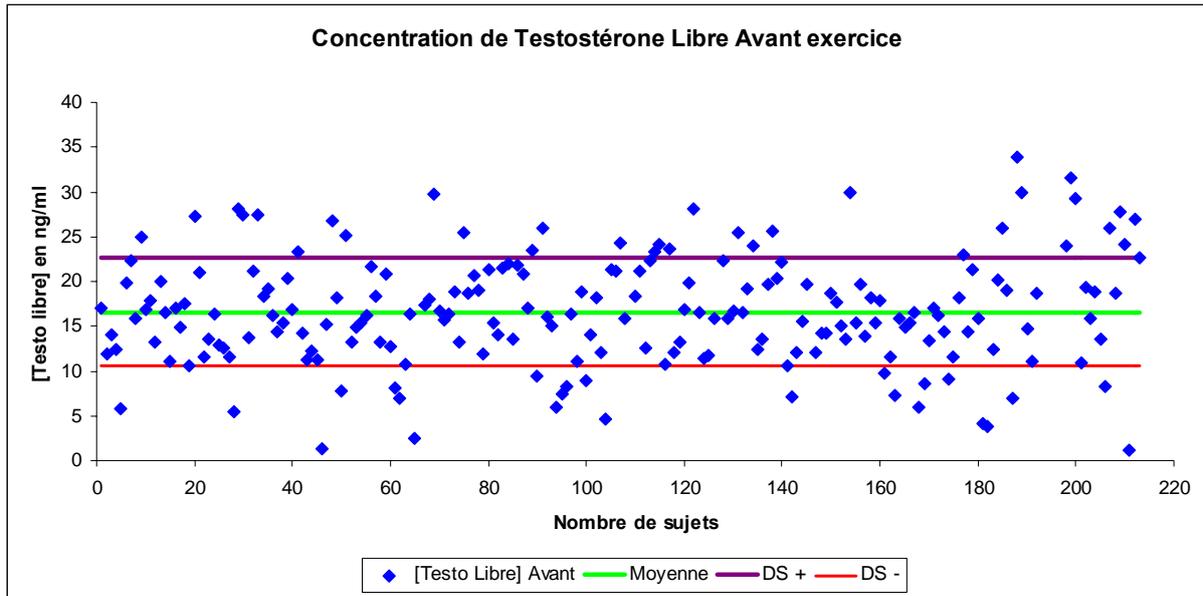
Avant l'effort, pour la concentration de testostérone totale, nous avons 33 cyclistes ayant une concentration supérieure à DS+, 29 cyclistes en dessous de DS- et 151 cyclistes entre DS+ et DS-.

Figure 19 : Représentation des concentrations de Testostérone totale après l'effort



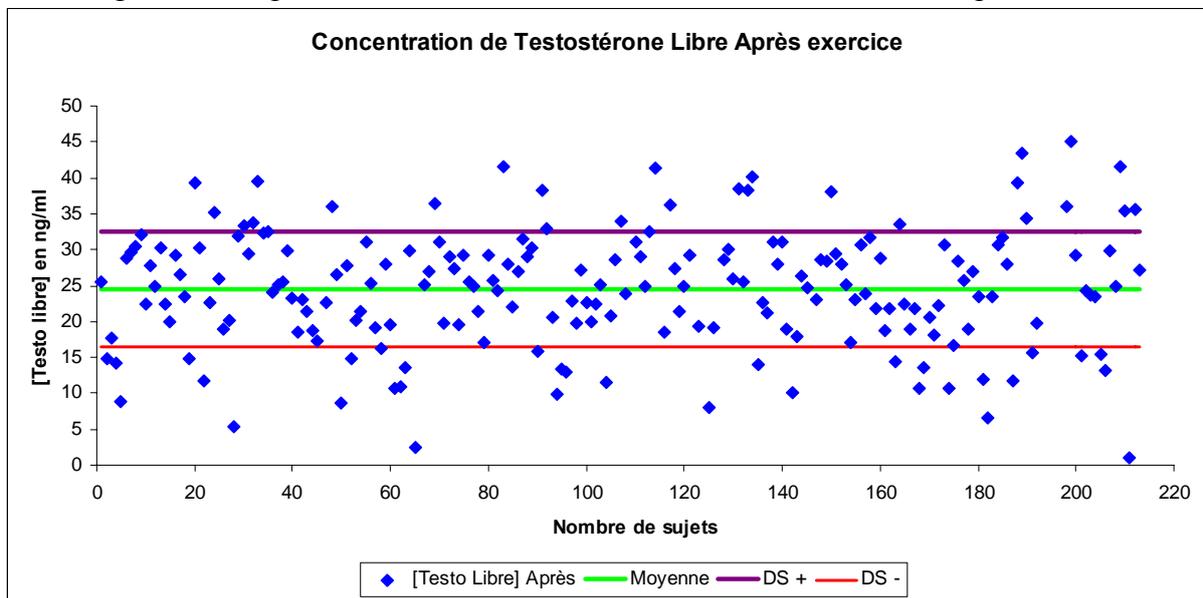
Après l'effort, les cyclistes sont répartis pour la testostérone totale de la façon suivante : 34 au dessus de DS+, 31 en dessous de DS- et 148 ont une concentration comprise entre DS+ et DS-. Donc, après l'effort il y a variation de la répartition des athlètes dans les 3 groupes choisis, et, ce phénomène est observé pour toutes les hormones étudiées.

Figure 20 : Représentation des concentrations de Testostérone libre avant l'effort



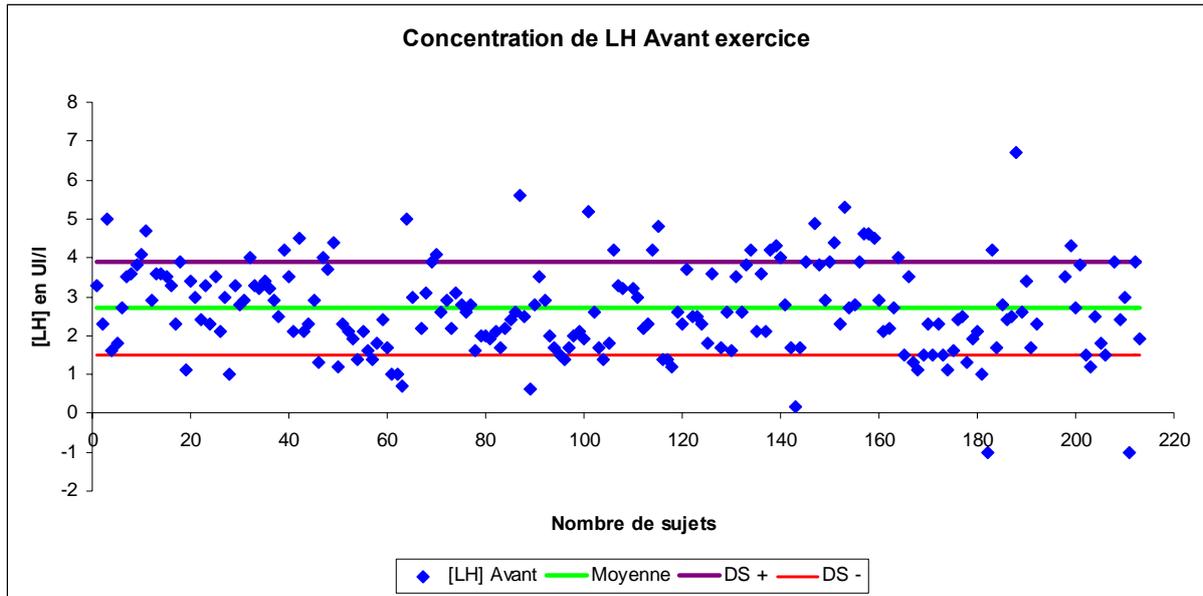
Au niveau de la testostérone libre avant le test d'effort, nous avons 32 cyclistes au dessus de DS+, 24 cyclistes en dessous de DS- et 157 cyclistes entre les deux.

Figure 21 : Représentation des concentrations de Testostérone libre après l'effort



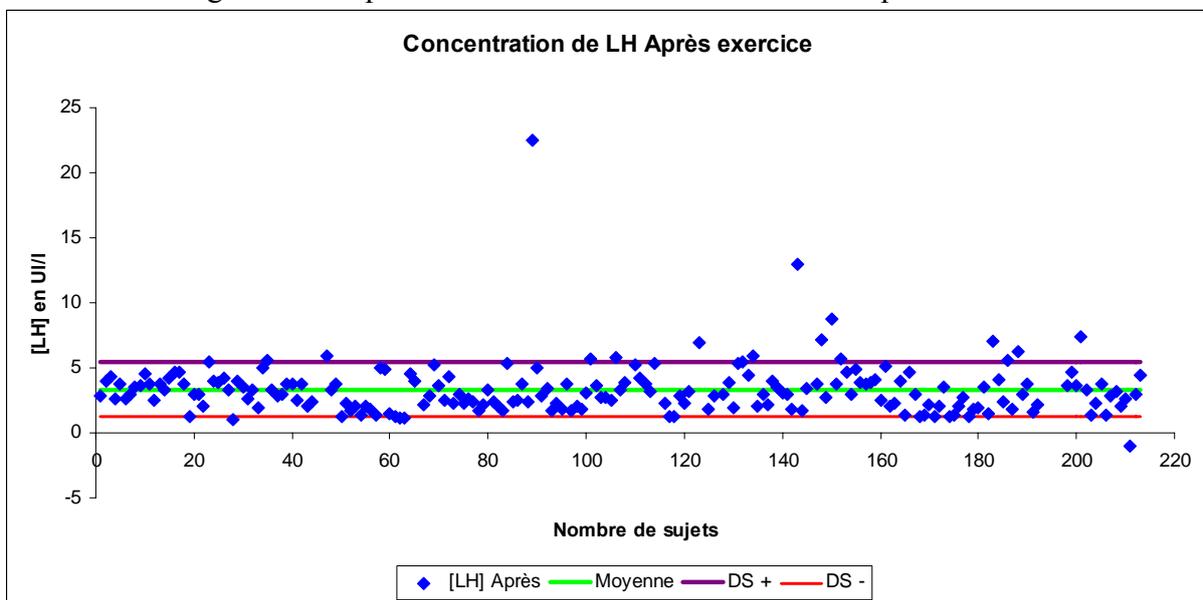
Après le test d'effort, ils sont 26 à être au dessus de DS+, 33 en dessous de DS- et 154 entre les deux pour la concentration de testostérone libre.

Figure 22 : Représentation des concentrations de LH avant l'effort



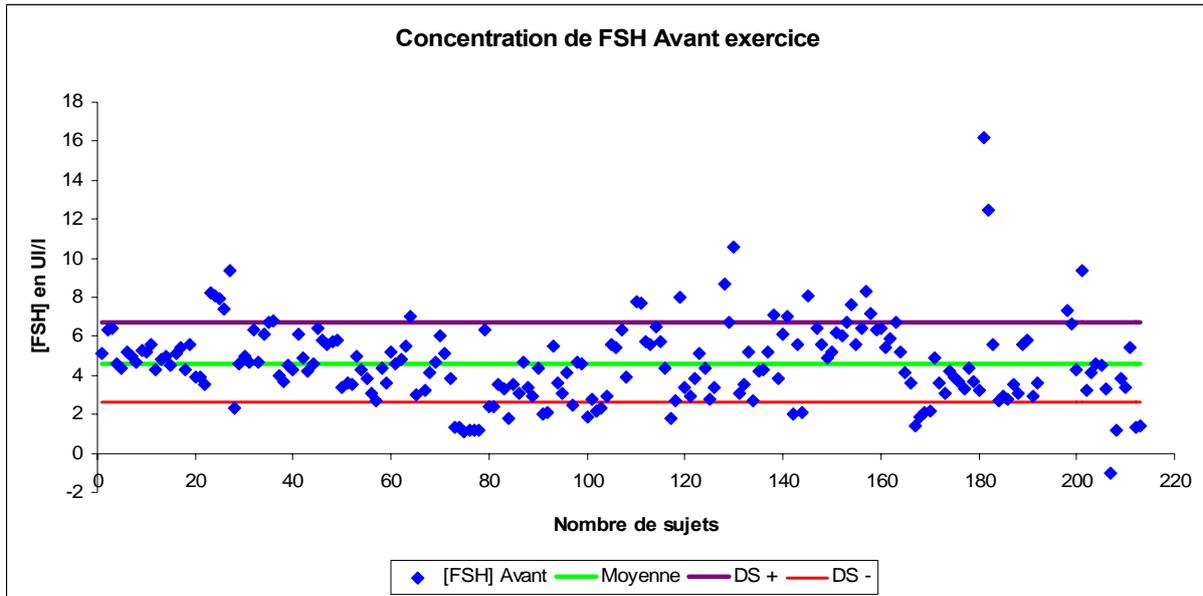
Pour la LH, avant l'effort nous avons une concentration supérieur à DS+ pour 36 cyclistes. Elle est inférieure à DS- pour 24 autres et comprise entre les deux pour les 153 cyclistes restants.

Figure 23 : Représentation des concentrations de LH après l'effort



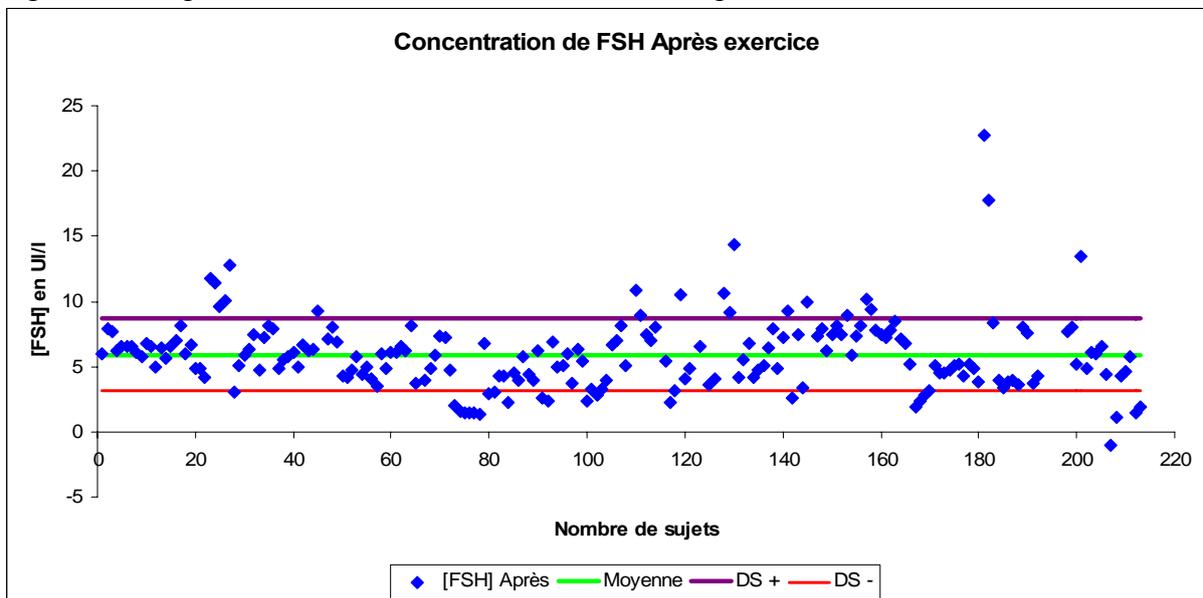
Après le test d'effort, pour la concentration de LH, nous avons cette fois ci seulement 17 individus au dessus de DS+, 4 cyclistes en dessous de DS- et ainsi 192 cyclistes réparties entre ces deux valeurs.

Figure 24 : Représentation des concentrations de FSH avant l'effort



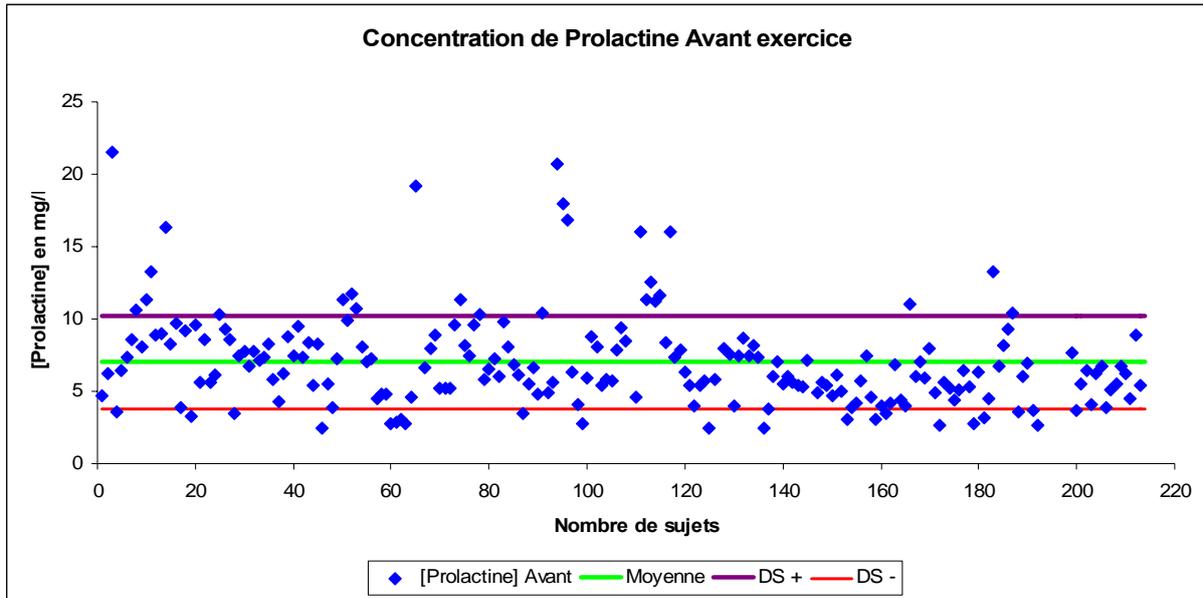
Pour les concentrations de FSH, les individus sont répartis comme suit : 22 au dessus de DS+, 27 en dessous de DS- et 164 cyclistes entre les valeurs de DS+ et DS-.

Figure 25 : Représentation des concentrations de FSH après l'effort



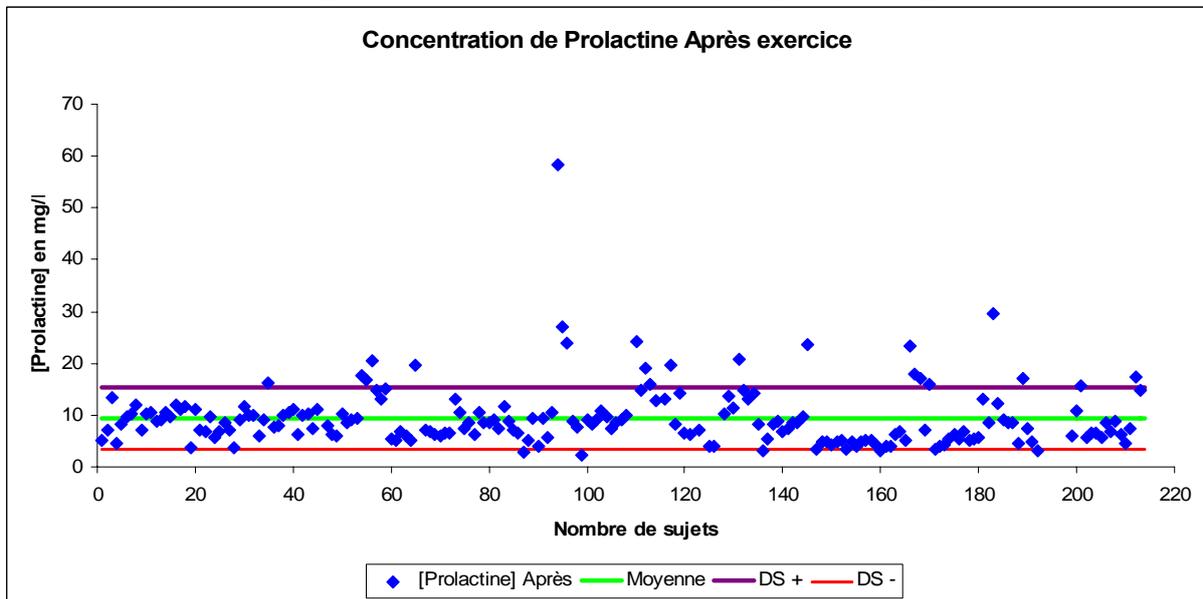
Après l'effort, nous avons 20 cyclistes au dessus de DS+, 23 en dessous de DS- et 170 entre les deux en ce qui concerne la concentration de FSH.

Figure 26 : Représentation des concentrations de prolactine avant l'effort



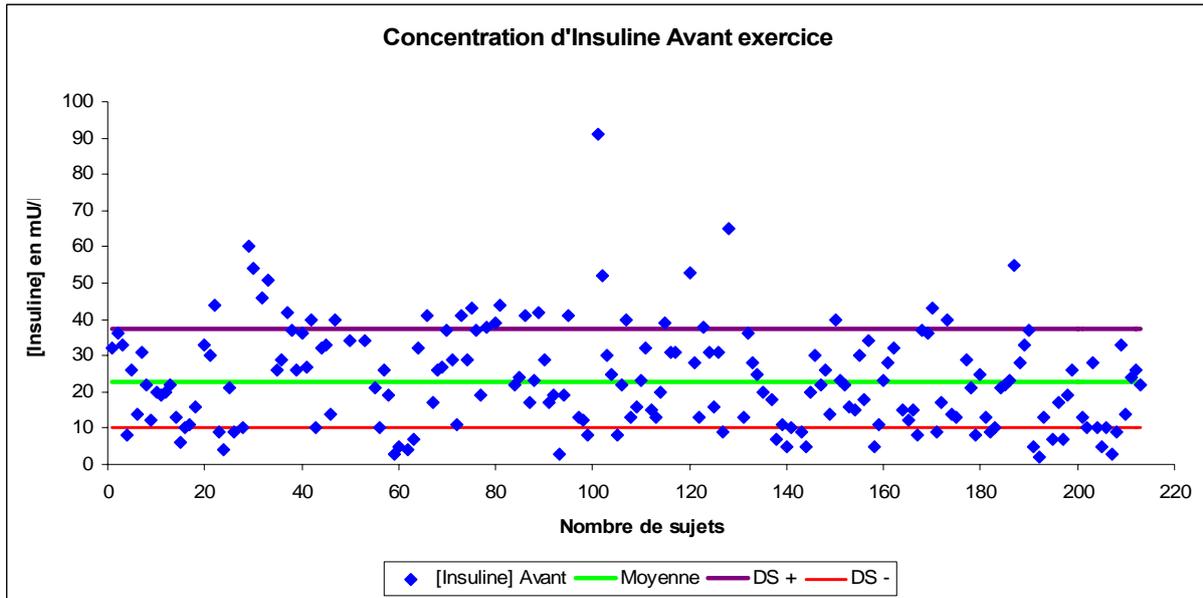
Pour la prolactine avant le test d'effort, 25 cyclistes se trouvaient au dessus de DS+, 22 en dessous de DS- et 166 cyclistes entre DS- et DS+. Somme = 213.

Figure 27 : Représentation des concentrations de prolactine après l'effort



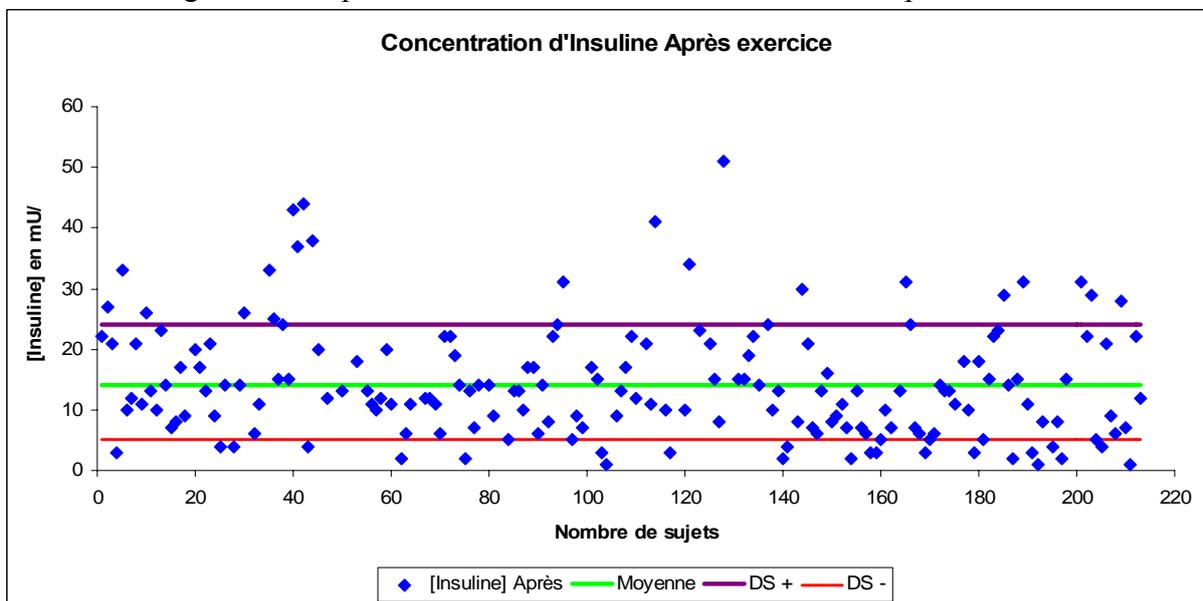
Après l'effort il y a pour la concentration de la prolactine 22 cyclistes au dessus de DS+, 7 en dessous de DS- et 184 sujets dans l'intervalle.

Figure 28 : Représentation des concentrations d'insuline avant l'effort



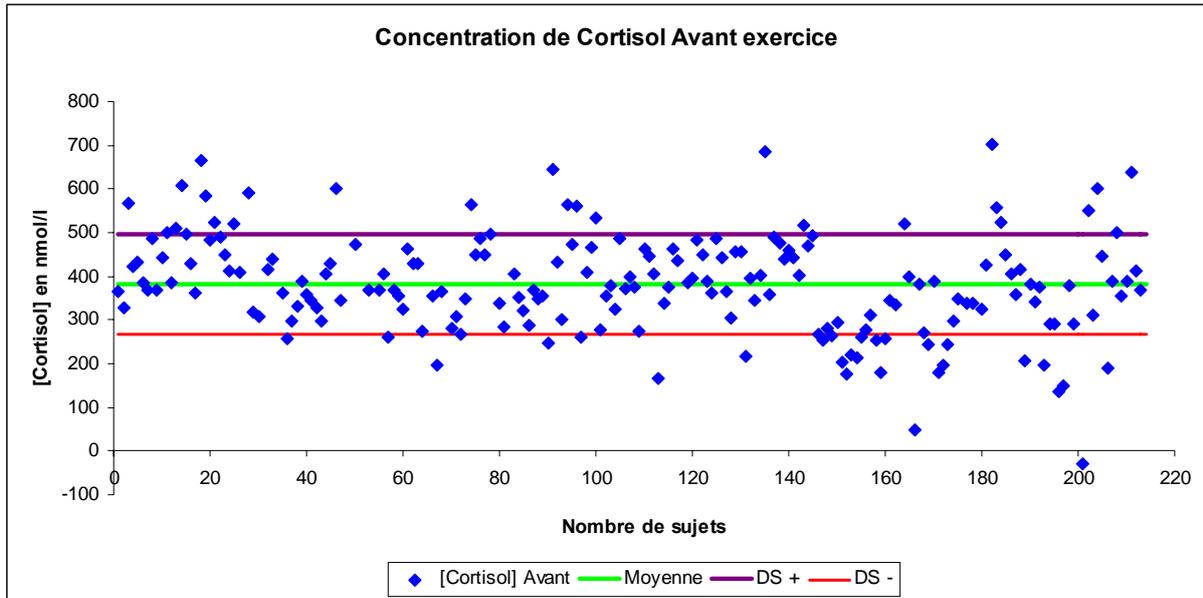
La concentration d'insuline avant l'effort nous fournit 28 cyclistes au dessus de DS+, 29 en dessous de DS- et 156 cyclistes entre ces deux valeurs.

Figure 29 : Représentation des concentrations d'insuline après l'effort



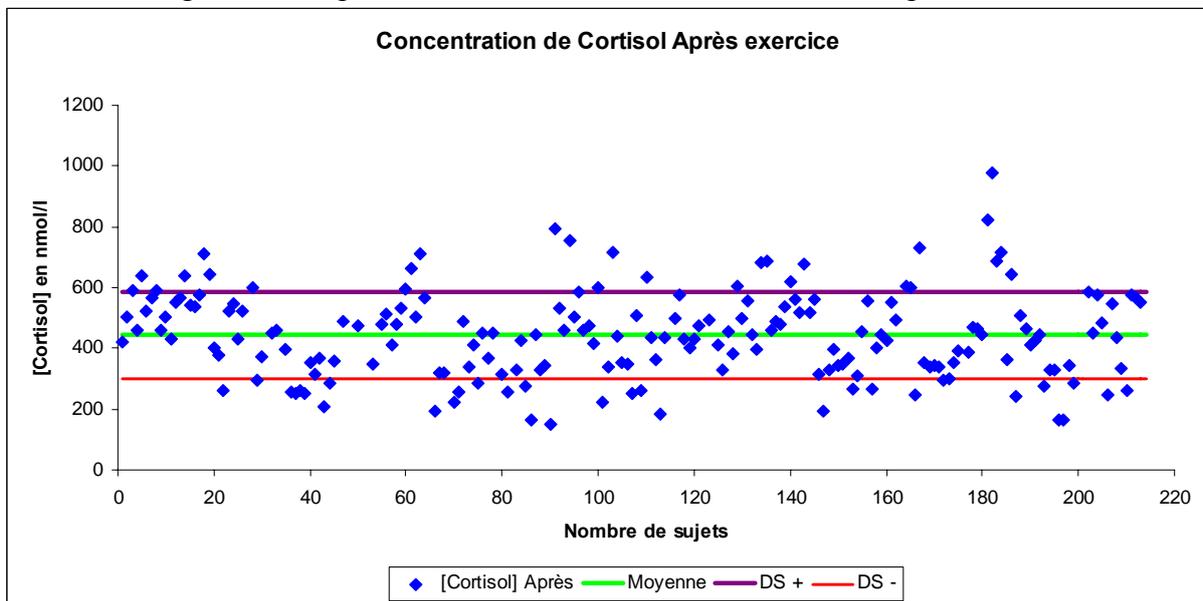
Après l'effort, au niveau des concentrations d'insuline, cette fois c'est 21 cyclistes qui sont au dessus de DS+, 23 en dessous de DS- et 169 compris dans l'intervalle.

Figure 30 : Représentation des concentrations de cortisol avant l'effort



Ainsi le dénombrement des individus indique que 26 cyclistes sont au dessus de DS+, 28 en dessous de DS- et 159 entre les deux.

Figure 31 : Représentation des concentrations de cortisol après l'effort



Après l'effort, il y a augmentation des individus situés à l'extérieur de l'intervalle [DS-, DS+], en effet, 29 cyclistes sont au dessus de DS+ et 32 en dessous de DS-. 152 cyclistes sont répartis entre ces deux valeurs.

Parallèlement aux hormones relevées, nous disposons donc de paramètres physiques et physiologiques. Ces paramètres vont être comparés par le biais de groupes que nous allons appeler « situations » dont les déclinaisons sont les suivantes :

Situation 1 : Population dont la concentration pour l'hormone est au dessus de DS+ (moyenne + déviation standard) avant l'effort

Situation 2 : Population dont la concentration pour l'hormone est entre les DS avant l'effort

Situation 3 : Population dont la concentration pour l'hormone est en dessous de DS- avant l'effort

Situation 4 : Population dont la concentration pour l'hormone est au dessus de DS+ après l'effort

Situation 5 : Population dont la concentration pour l'hormone est entre les DS après l'effort

Situation 6 : Population dont la concentration pour l'hormone est en dessous de DS- après l'effort.

En résumé, les trois premières situations (1 à 3) représentent les valeurs obtenues au repos et les trois autres (4 à 6) celles obtenues post exercice.

Les paramètres physiques dont nous disposons sont l'âge (en années), la masse corporelle (en Kg) et la taille (en cm). Au niveau des paramètres physiologiques, nous avons la puissance maximale aérobie (PMA) exprimée en watts qui est atteinte à la $\dot{V}O_2$ max. Nous avons ensuite la ventilation maximale (Vmax) exprimée en L/min et qui correspond au volume d'air maximum que le sujet est capable de déplacer. Après vient la $\dot{V}O_2$ max exprimée en ml/min/kg et la fréquence cardiaque maximale (FC max) atteinte par le sujet lors de l'effort exprimée en battement/min. Enfin nous avons ces paramètres au seuil anaérobie qui correspond à la limite théorique au-delà de laquelle l'organisme accumule de l'acide lactique, il s'agit donc de la puissance maximale au seuil anaérobie (W anaérobie), la ventilation au seuil anaérobie, $\dot{V}O_2$ au seuil anaérobie et la fréquence cardiaque au seuil anaérobie.

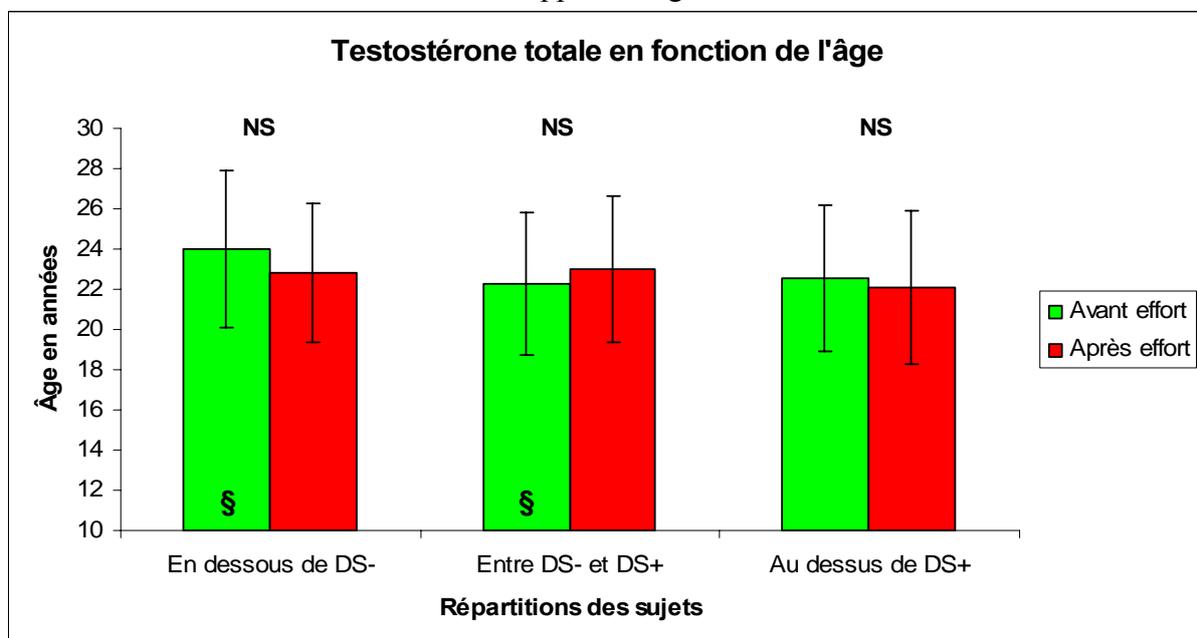
3.2.2. Comparaison des situations de chaque hormone en fonction des critères physiques et physiologiques.

3.2.2.1. La Testostérone totale

3.2.2.1.1. Données physiques

Nous constatons que les groupes d'individus qui sont au dessus de DS+ et en dessous de DS- avant le test d'effort sont en moyenne un peu plus âgés que ceux qui s'y trouvent après le test d'effort. Toutefois, ces différences ne sont pas significatives selon le test U de Mann-Whitney car pour les groupes en dessous de DS-, $p = 0,3$ et pour ceux au dessus de DS+, $p = 0,45$, ce qui est supérieur au seuil critique $\alpha = 5\%$. Pour les groupes d'individus dont les concentrations sont comprises entre ces deux valeurs (DS- et DS+), le groupe au repos possède une moyenne d'âge plus petite que le groupe après le test d'effort mais ces moyennes restent toutefois identiques puisque $p = 0,1$. (Figure 32)

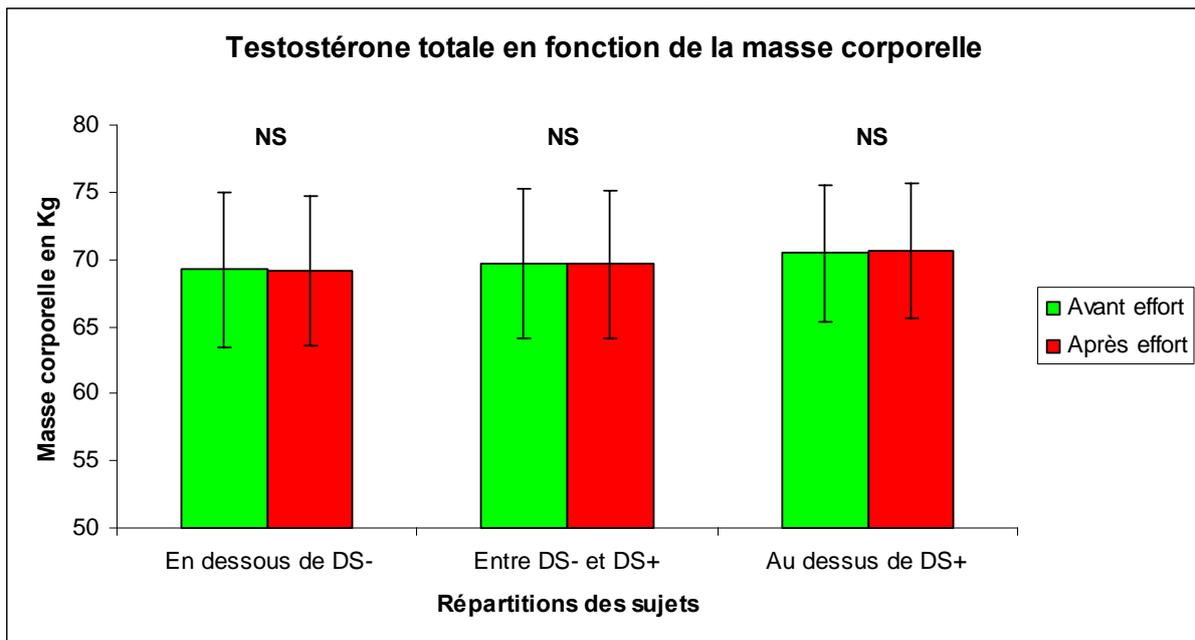
Figure 32 : Répartition de la testostérone totale des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. **§** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ pour les concentrations avant l'effort ($p = 0,034$)

On constate une certaine homogénéité de la masse corporelle des différents groupes de cyclistes suivant leur situation par rapport aux concentrations de testostérone totale avant et après exercice (pour les groupes en dessous de DS-, entre les DS et au dessus de DS+, on a respectivement pour le test de Mann-Whitney, des valeurs de probabilité p égales à 0,96, 0,91 et 0,90, supérieures au seuil de 5% donc les moyennes sont égales) (Figure 33).

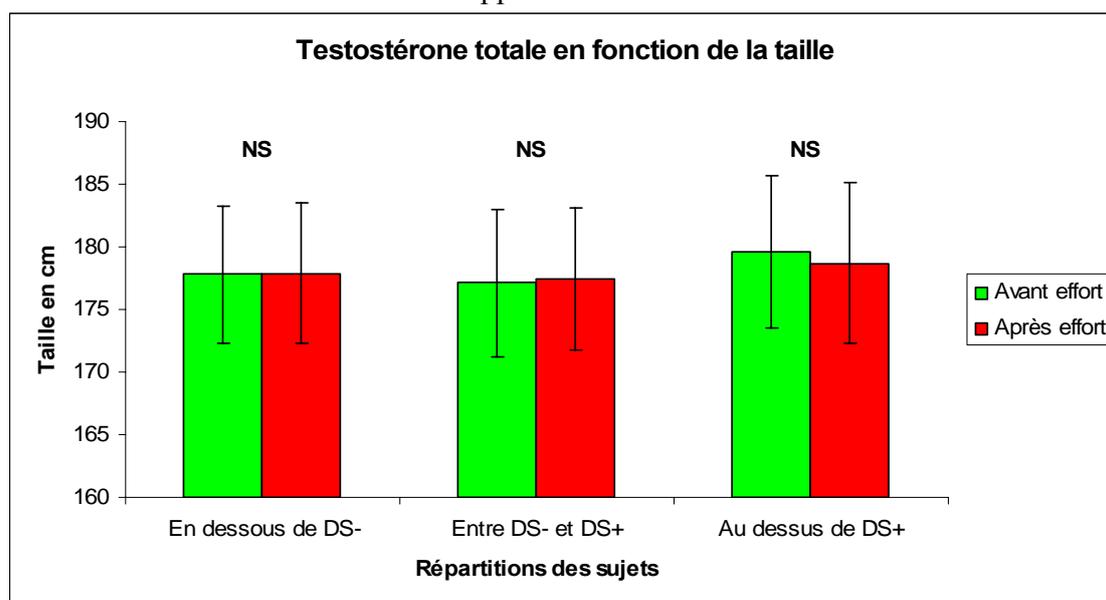
Figure 33 : Répartition de la testostérone totale des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. De plus il n'y a pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

Au niveau de la taille des individus, que ce soit avant ou après l'effort, les groupes d'individus ayant une concentration de testostérone totale supérieur à DS+ ont des valeurs de tailles moyennes plus élevées que celles des autres groupes, sachant qu'entre les groupes avec des concentrations prises au repos et ceux après effort, les moyennes sont identiques puisque dans chaque cas, nous avons $p > 0,1$ (Figure 34).

Figure 34 : Répartition de la testostérone totale des sujets en fonction des situations par rapport à la taille



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

3.2.2.1.2. Données physiologiques

La mise en relation des différentes situations (au dessus de DS+, entre DS- et DS+, en dessous de DS-) pour les concentrations de testostérone totale obtenues avant et après exercice avec les paramètres physiologiques relevés lors de ce protocole est présentée dans le Tableau 27

Tableau 27 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de testostérone totale (moyenne \pm écart-type)

	Avant l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 29	n = 151	n = 33
PMA (watts)	458 \pm 53 \ominus	434 \pm 45	439 \pm 48
Vent Max (l/min)	157,1 \pm 17,6 \yen \ominus	170,8 \pm 19,4	175 \pm 21,4
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71,5 \pm 5,4	71,7 \pm 5,3	71,3 \pm 7,1
FC Max (bpm)	181 \pm 10 \yen \ominus	186 \pm 10	189 \pm 9
W Anaérobie (watts)	356 \pm 43	344 \pm 36	351 \pm 38
Vent Anaérobie (l/min)	103 \pm 14,6	105,3 \pm 13,5	106,6 \pm 12,2
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60,6 \pm 4,4	60,6 \pm 5	59,8 \pm 6,3
FC Anaérobie (bpm)	162 \pm 11 \yen \ominus	169 \pm 11	173 \pm 10

	Après l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 28	n = 151	n = 34
PMA (watts)	448 ± 46 \ominus	437 ± 46	437 ± 48
Vent Max (l/min)	160,3 ± 20,6 ¥	169,7 ± 19,5	177,5 ± 18,4
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71 ± 4,5	71,8 ± 5,6	71,5 ± 6,2
FC Max (bpm)	183 ± 8 ¥	186 ± 10	191 ± 9
W Anaérobie (watts)	350 ± 38	346 ± 37	351 ± 40
Vent Anaérobie (l/min)	102,7 ± 15,3	105,3 ± 13,4	107,1 ± 11,6
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60,3 ± 4	60,4 ± 4,9	60,7 ± 6,5
FC Anaérobie (bpm)	164 ± 11 ¥	168 ± 11	175 ± 10

Note : ¥ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ ($p < 0,01$). \ominus indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$).

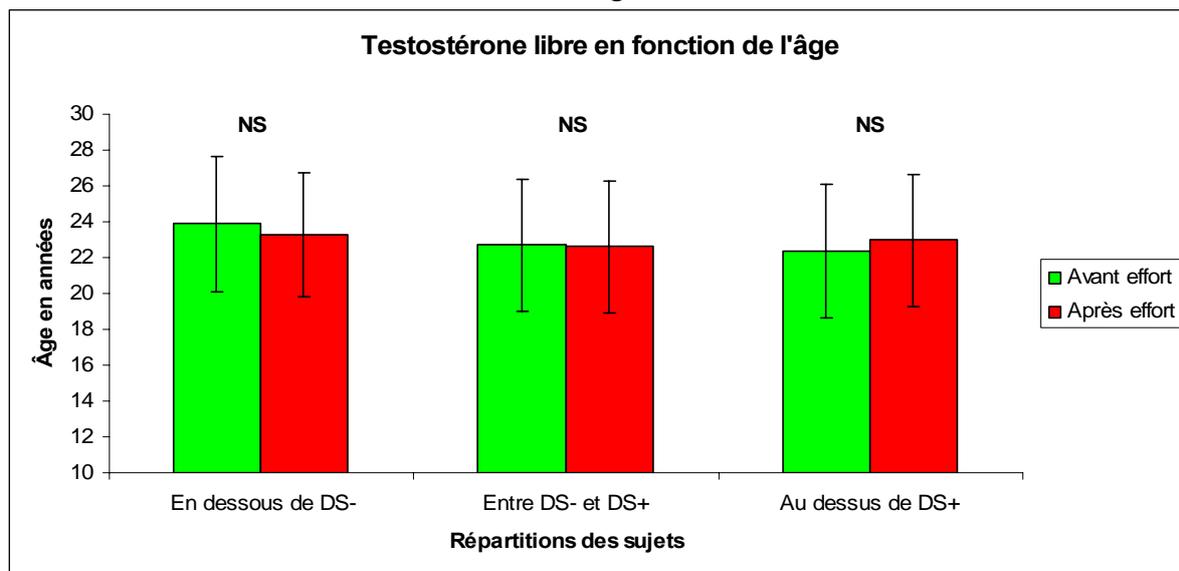
Nous pouvons constater que le nombre d'individus ayant une concentration de testostérone totale comprise entre DS- et DS+ est le même avant et après l'effort (151 cyclistes) et ce, en notant que les individus à l'intérieur de ces deux groupes ne sont pas les mêmes. Nous pouvons également noter que les groupes de cyclistes qui ont des concentrations de testostérone totale inférieure à DS- que ce soit avant ou après l'effort ont des moyennes de PMA significativement plus élevées ($p < 0,05$) que celles des autres groupes. Il en est de même pour la ventilation maximale, la fréquence cardiaque maximale, et pour la fréquence cardiaque au seuil anaérobie dans le cas des concentrations relevées avant l'effort. Après l'effort, c'est entre le groupe avec des concentrations en dessous de DS- et celui avec des concentrations au dessus de DS+ que nous observons des différences significatives pour la ventilation maximale, la fréquence cardiaque maximale, et pour la fréquence cardiaque au seuil anaérobie ($p < 0,05$).

3.2.2.2. La Testostérone libre.

3.2.2.2.1. Données physiques

Nous avons une moyenne d'âge plus élevée pour les individus situés dans le groupe ayant une concentration de testostérone libre au dessus de DS+ après l'effort (cette différence est toutefois non significative car $p = 0,54$) alors que la moyenne d'âge est identique entre le prélèvement avant le test d'effort et celui après le test d'effort pour les groupes d'individus dont les concentrations pour cette hormone sont comprises entre DS- et DS+ ($p = 0,79$). Pour les groupes avec des concentrations de testostérone libre en dessous de DS-, il semble y avoir une moyenne d'âge plus petite pour le groupe des concentrations après le test d'effort mais il n'y a aucune significativité selon le résultat du test de différenciation U de Mann-Whitney ($p = 0,64$) (Figure 35).

Figure 35 : Répartition de la testostérone libre des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge

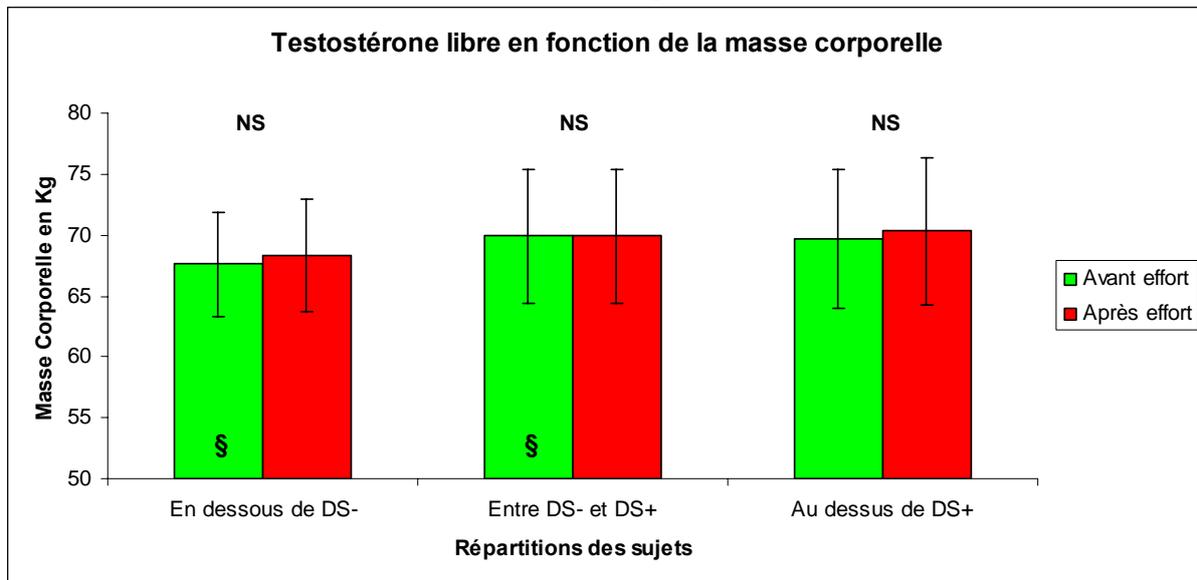


Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

Au niveau de la masse corporelle, les populations avec des concentrations de testostérone libre comprises entre DS- et DS+ avant et après l'effort semblent avoir les mêmes valeurs. Dans les autres cas, c'est-à-dire pour des concentrations de testostérone libre au dessus de DS+ et en dessous de DS-, les moyennes de masse corporelle, même si elles semblent légèrement supérieures pour les groupes après le test d'effort n'en restent pas moins

identiques aux moyennes des groupes dont les concentrations ont été prises au repos car $p = 0,47$ et $p = 0,52$ respectivement. Cependant, avant l'effort, le groupe en dessous de DS- présente une masse corporelle moyenne significativement supérieure au groupe entre DS- et DS+ ($p = 0,037$) (Figure 36).

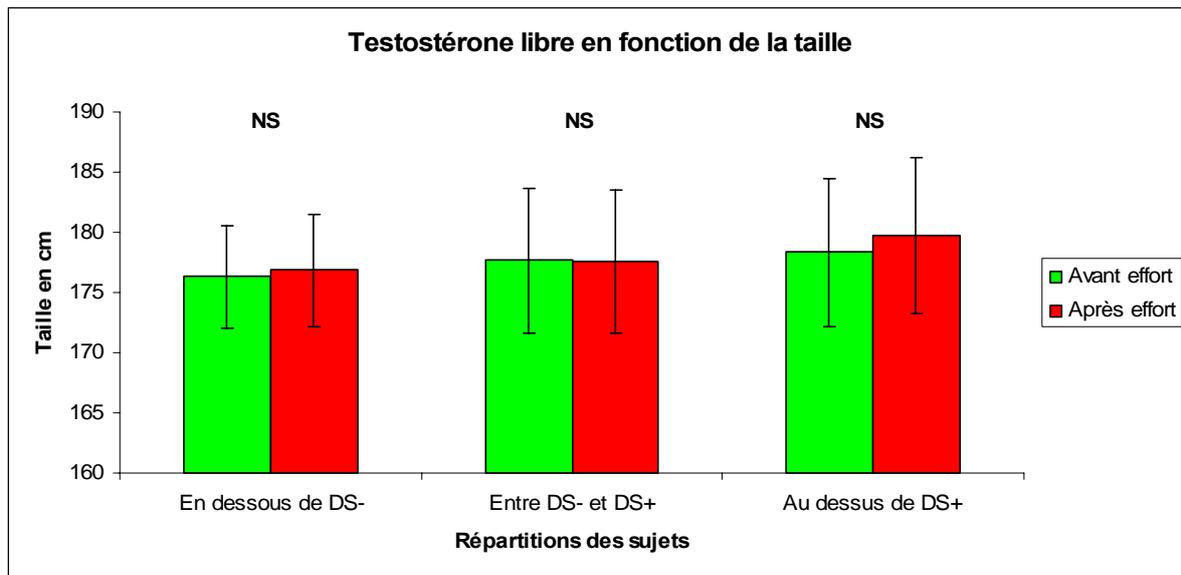
Figure 36 : Répartition de la testostérone libre des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. **§** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ avant l'effort ($p = 0,037$).

Concernant la taille des cyclistes en fonction de la répartition de la concentration de testostérone libre, pour les groupes avec des concentrations au dessus de DS+ et en dessous de DS-, on constate une valeur moyenne pour la taille qui semble plus élevée pour les groupes avec les concentrations relevées après l'effort que pour les groupes avec les concentrations au repos mais qui en réalité est identique car $p = 0,51$ et $p = 0,82$ respectivement. Pour les groupes avec des concentrations comprises entre DS- et DS+, le groupe avec les valeurs de concentrations après le test d'effort possède une taille moyenne égale à celle du groupe avant le test d'effort ($p = 0,95$). Aucune différence significative n'est constatée pour la taille par rapport aux différentes répartitions des concentrations de testostérone libre que ce soit avant ou après l'effort (Figure 37).

Figure 37 : Répartition de la testostérone libre des sujets en fonction des situations par rapport à la taille



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

3.2.2.2.2. Données physiologiques

Le Tableau 28 nous fait le lien entre les différents paramètres physiologiques et les concentrations de testostérone libre relevées avant et après le test d'effort.

Tableau 28 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de testostérone libre (moyenne \pm écart-type)

	Avant l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 24	n = 157	n = 32
PMA (watts)	449 \pm 45 ¥	439 \pm 47	424 \pm 46
Vent Max (l/min)	163,6 \pm 21	170 \pm 18,8	172,1 \pm 25,6
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71 \pm 5,5	72 \pm 5,5	70,5 \pm 6,4
FC Max (bpm)	180 \pm 10 Ⓣ ¥	187 \pm 9	189 \pm 10
W Anaérobie (watts)	351 \pm 36	348 \pm 38	342 \pm 36
Vent Anaérobie (l/min)	104,6 \pm 15,5	105,5 \pm 13	103,8 \pm 14,2
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60,3 \pm 4	60,7 \pm 5	59,7 \pm 6,7
FC Anaérobie (bpm)	161 \pm 11 *	169 \pm 11	174 \pm 11

	Après l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 33	n = 154	n = 26
PMA (watts)	447 ± 47	436 ± 46	441 ± 53
Vent Max (l/min)	162,3 ± 20,1 Θ Ψ	170,3 ± 18,7	175,7 ± 24,9
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71 ± 4,8	71,8 ± 5,6	71,3 ± 6,2
FC Max (bpm)	182 ± 8 Θ Ψ	187 ± 9	190 ± 9
W Anaérobie (watts)	345 ± 36	347 ± 37	354 ± 42
Vent Anaérobie (l/min)	103,6 ± 14,3	105,5 ± 13,3	106,2 ± 13,9
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60,2 ± 4	60,6 ± 5,1	60 ± 6,3
FC Anaérobie (bpm)	163 ± 10 Θ Ψ	169 ± 11	174 ± 11

Note : Ψ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ ($p < 0,05$). Θ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$). * indique une différence significative entre les trois groupes ($p < 0,05$)

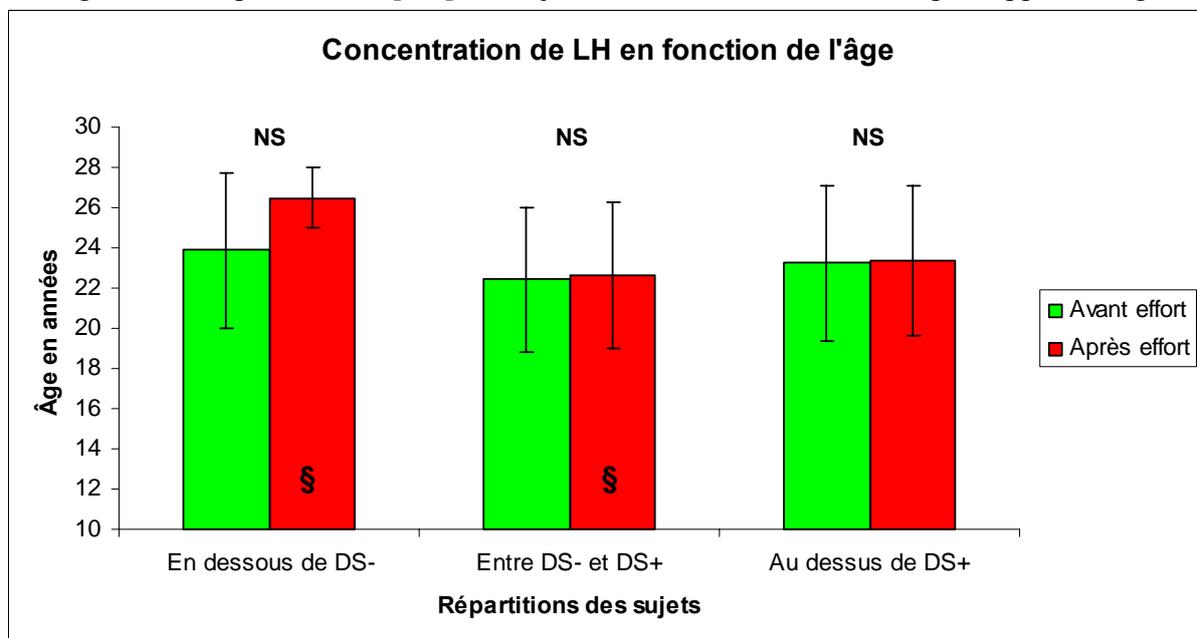
Le groupe de sujets avec des concentrations de testostérone libre en dessous de DS- avant l'effort présente les valeurs de PMA significativement les plus élevées ($p < 0,05$). Pour chaque répartition obtenue avant l'effort, on constate des différences significatives entre chacune d'elles ($p < 0,05$) pour la FC Anaérobie. Il semble que moins la concentration au repos est élevée et moins la fréquence cardiaque anaérobie l'est également. De plus les sujets qui ont les concentrations les plus basses semblent avoir significativement les fréquences cardiaques maximales les plus basses également ($p < 0,001$). Après l'effort, les sujets avec des concentrations en dessous de DS- possèdent pour la ventilation maximale, la fréquence cardiaque maximale, et la fréquence cardiaque au seuil anaérobie des valeurs significativement plus petites que pour les groupes avec des concentrations de testostérone libre entre DS- et DS+ et au dessus de DS+ (nous avons respectivement $p = 0,03$; $p = 0,002$; $p = 0,001$ et $p = 0,01$; $p < 0,001$; $p < 0,001$ pour ces trois variables entre le groupe en dessous de DS- et les deux autres).

3.2.2.3. L'hormone lutéïnisante (LH).

3.2.2.3.1. Données Physiques.

Au niveau de la concentration en LH, nous pouvons voir (Figure 38) que les groupes d'individus avec des concentrations de LH au dessus de DS+ présentent une moyenne d'âge identique avant et après l'effort. La moyenne d'âge du groupe avec des concentrations de LH comprises entre DS- et DS+ après l'effort est aussi identique à celle du groupe avant le test d'effort même si graphiquement on a l'impression d'une très légère supériorité pour le groupe après l'effort ($p = 0,69$). Par contre, pour le groupe ayant des concentrations de LH inférieures à DS-, l'âge moyen paraît plus élevé dans le groupe relatant ces concentrations après le test d'effort que dans le groupe où les concentrations ont été relevées au repos mais le test U de Mann-Whitney nous fournit un résultat qui montre qu'il n'y a pas de différence significative au seuil de 5% car $p = 0,1$. Après l'effort, cependant, on constate une différence significative de l'âge entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ ($p = 0,035$). Il semble alors que les sujets qui présentent les concentrations de LH les moins élevées après l'effort sont les plus âgés.

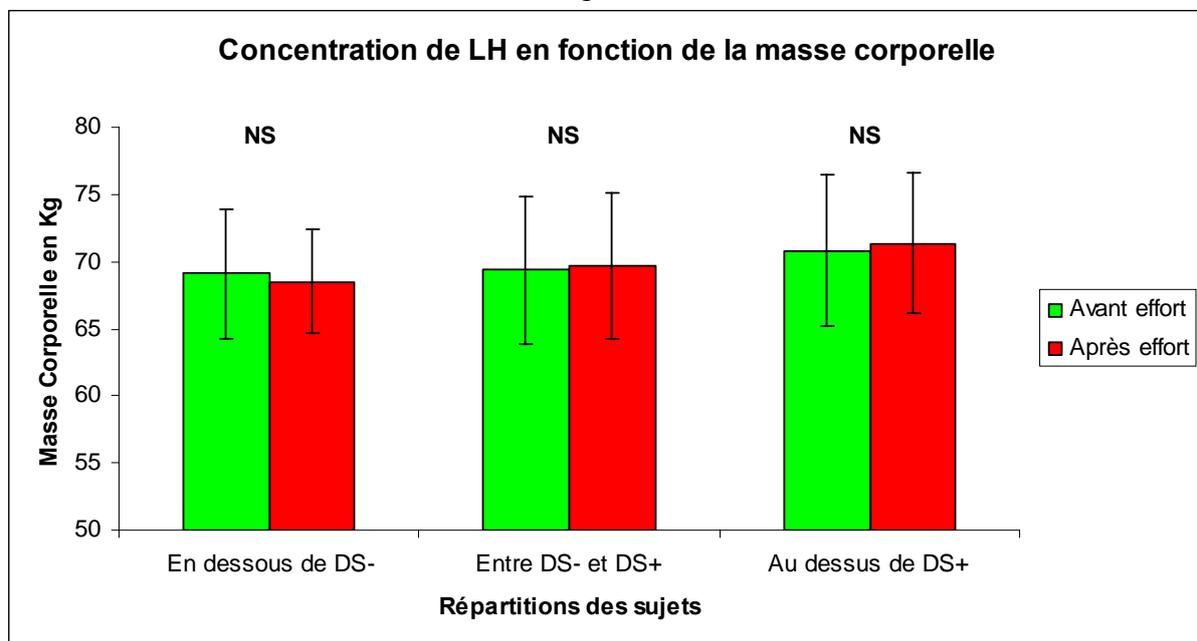
Figure 38 : Répartition de [LH] des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. **§** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ après l'effort ($p = 0,035$).

La tendance générale pour la masse corporelle nous indique que les groupes ayant une concentration de LH au dessus de DS+ avant et après l'effort ont une masse corporelle moyenne légèrement plus élevée que celle des groupes ayant concentrations de LH entre DS- et DS+. Ces derniers groupes présentent des valeurs de masse corporelle tout aussi légèrement plus élevées que pour les groupes avec des concentrations de LH inférieures à DS-. Cependant, aucune différence significative n'est constatée entre ces groupes ($p > 0,05$). Nous avons noté également que la moyenne est identique entre le groupe au repos et le groupe après l'effort dans chaque cas ($p = 0,97$, $p = 0,65$ et $p = 0,81$ respectivement) (Figure 39).

Figure 39 : Répartition de [LH] des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle

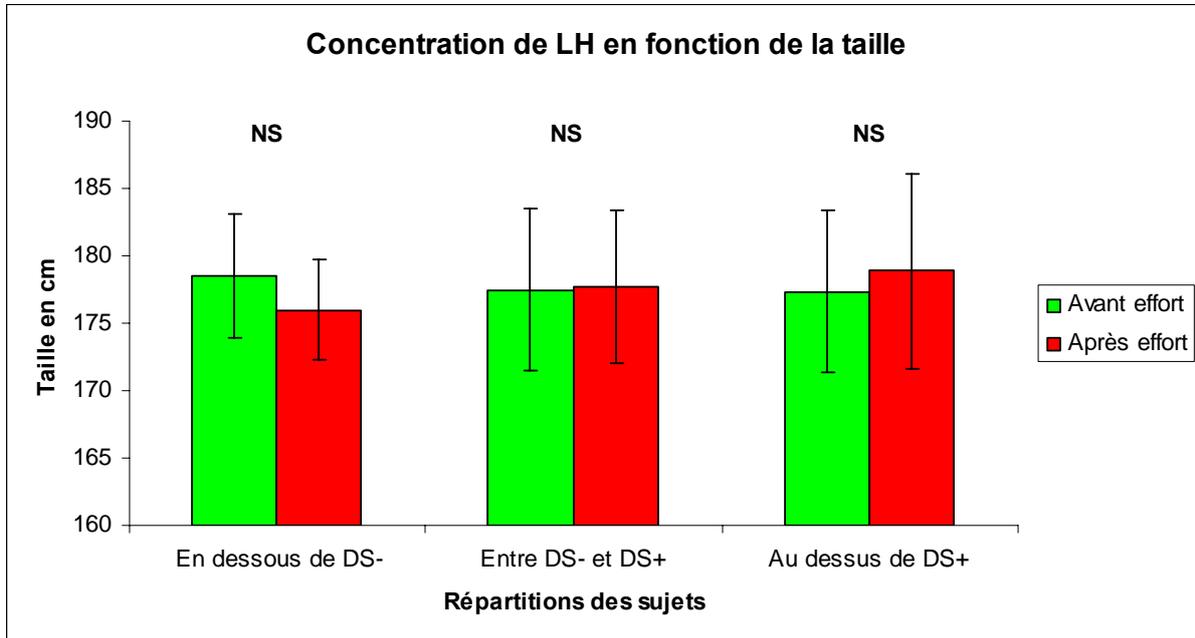


Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

En fonction de la taille, le groupe dont la concentration de LH avant l'effort est située au dessus de DS+ donne une valeur qui paraît inférieure à celle du groupe dont les concentrations ont été relevées après le test d'effort mais cette différence est non significative ($p = 0,82$). Pour les groupes entre DS- et DS+ et les groupes en dessous de DS-, on observe également aucune différence significative entre pour la taille des sujets par rapport aux répartitions avant et après l'effort ($p = 0,58$ et $p = 0,39$ respectivement). Enfin, il n'y a pas de

différences significatives entre les groupes ($p > 0,05$) dans le cas des concentrations avant l'effort et dans celui des concentrations après le test d'effort (Figure 40).

Figure 40 : Répartition de [LH] des sujets en fonction des situations par rapport à la taille



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

3.2.2.3.2. Données physiologiques

La catégorisation des individus à l'aide des situations pour les concentrations de LH nous permet d'obtenir le tableau suivant (Tableau 29) qui permet d'apprécier les paramètres physiologiques en fonction de la répartition de cette hormone avant et après exercice.

Tableau 29 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de LH (moyenne \pm écart-type)

	Avant l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 24	n = 153	n = 36
PMA (watts)	451 \pm 49	437 \pm 48	436 \pm 44
Vent Max (l/min)	169,2 \pm 24,1	170,3 \pm 19	167,8 \pm 22
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71,8 \pm 5,4	72 \pm 5,6	70,7 \pm 5,5
FC Max (bpm)	184 \pm 11	187 \pm 9	184 \pm 11
W Anaérobie (watts)	357 \pm 40	348 \pm 37	342 \pm 37
Vent Anaérobie (l/min)	107,4 \pm 16,9	105,2 \pm 12,9	104,2 \pm 13,1
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	61,1 \pm 4,7	60,8 \pm 5,3	59,3 \pm 4,7
FC Anaérobie (bpm)	165 \pm 13	170 \pm 10	167 \pm 12
	Après l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 4	n = 192	n = 17
PMA (watts)	462 \pm 48	438 \pm 47	444 \pm 50
Vent Max (l/min)	156,4 \pm 32,2	170,1 \pm 19	169 \pm 27,7
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71,2 \pm 4,9	71,7 \pm 5,6	71,2 \pm 5,4
FC Max (bpm)	176 \pm 8 $\text{¥} \text{⊖}$	186 \pm 9	188 \pm 9
W Anaérobie (watts)	350 \pm 41	348 \pm 38	347 \pm 41
Vent Anaérobie (l/min)	106,9 \pm 20,5	105,4 \pm 13,4	104,3 \pm 13,5
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60,6 \pm 4,1	60,5 \pm 5,1	59,6 \pm 5,2
FC Anaérobie (bpm)	153 \pm 12 $\text{¥} \text{⊖}$	169 \pm 11	171 \pm 13

Note : ¥ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ ($p < 0,05$). ⊖ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$).

On peut noter d'après le Tableau 29 qu'après l'effort, il n'y a que très peu d'individus qui ont une concentration de LH inférieure à DS- (4 sujets contre 24 dans cette zone avant le test d'effort). Cependant, on constate des différences significatives pour la fréquence cardiaque maximale et pour la fréquence cardiaque anaérobie entre ce groupe avec des concentrations inférieures à DS- et les deux autres ($p < 0,05$). Ainsi les sujets qui ont les concentrations les plus basses de LH après l'effort semblent ceux sur lesquels ont observé les

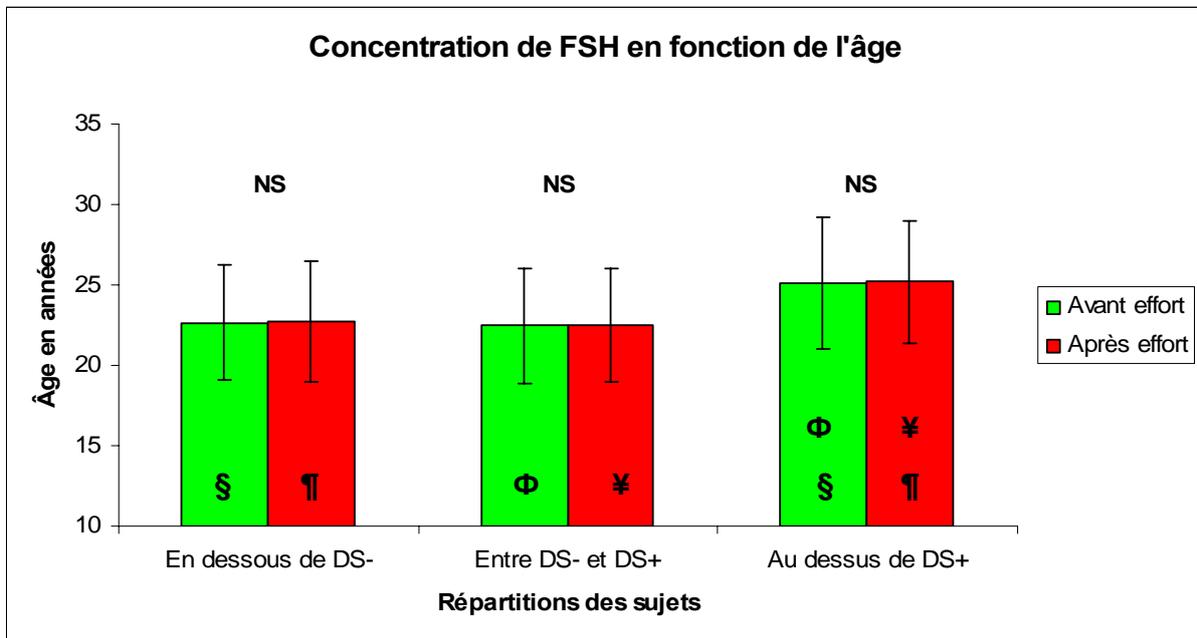
fréquences cardiaques les moins élevées, cependant le nombre d'observations (4 sujets) conduit à aborder ce résultat avec une certaine réserve.

3.2.2.4. L'hormone folliculostimulante (FSH).

3.2.2.4.1. Données physiques

On remarque tout d'abord qu'il n'y a pas vraiment de différences entre l'âge moyen des groupes avant l'effort et celui des groupes après l'effort ($p > 0,9$ dans toutes les situations). Cependant, les groupes d'individus dont la concentration de FSH est au dessus de DS+ présentent des moyennes d'âges significativement plus élevées que celles des groupes de cyclistes avec des concentrations comprises entre DS- et DS+ et des concentrations de FSH inférieures à DS- que ce soit dans le cas des concentrations relevées avant l'effort ou dans le cas des concentrations relevées après le test d'effort ($p = 0,005$, $p = 0,037$ et $p = 0,004$, $p = 0,04$ respectivement). Il semble alors que les sujets les plus âgés sécrètent plus de FSH que les autres au repos comme après le test d'effort (Figure 41).

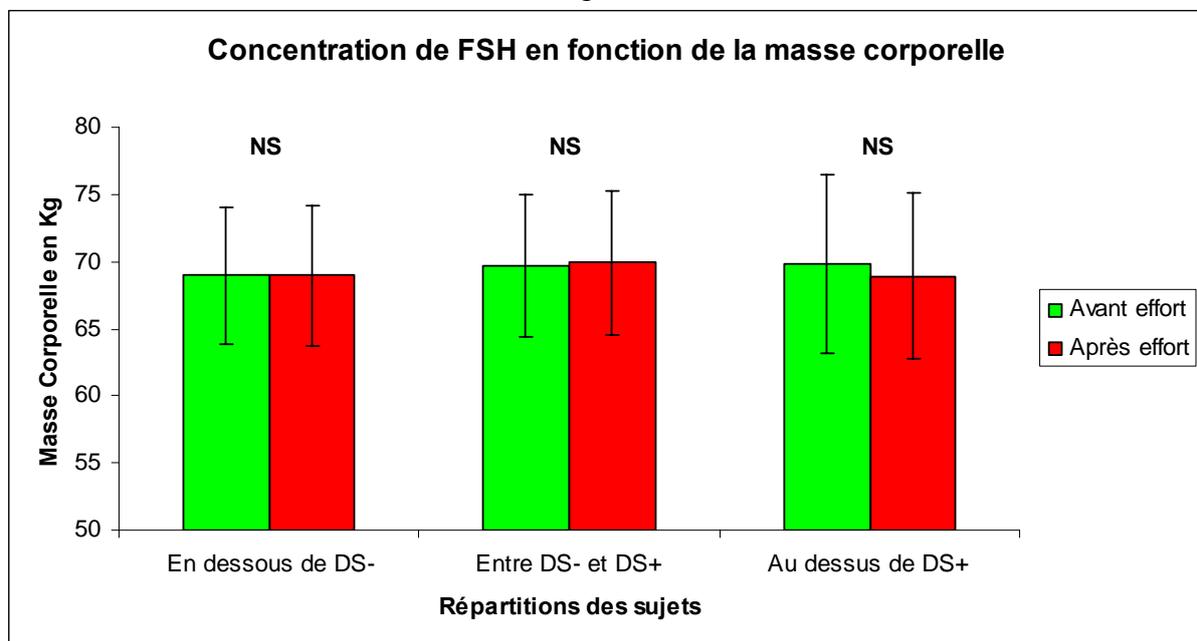
Figure 41 : Répartition de [FSH] des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Respectivement avant et après l'effort, **\$**, **¶** : différences significatives entre en dessous de DS- et au dessus de DS+ ($p < 0,05$), **Φ**, **¥** : différences significatives entre les groupes entre DS- et DS+ et au dessus de DS+ ($p < 0,01$).

Au niveau de la masse corporelle, les groupes de cyclistes dont les concentrations de FSH sont situées en dessous de DS- présentent une valeur moyenne indiquée entre le groupe dont les concentrations ont été enregistrées au repos et le groupe avec les prélèvements enregistrés après l'effort. On obtient le même résultat d'après le test de Mann-Whitney pour les groupes avec des concentrations comprises entre DS- et DS+ ($p = 0,64$) et les groupes avec des concentrations de FSH au dessus de DS+ ($p = 0,66$). On ne constate également aucune différence significative par rapport aux différentes répartitions que ce soit avant ou après l'effort (Figure 42).

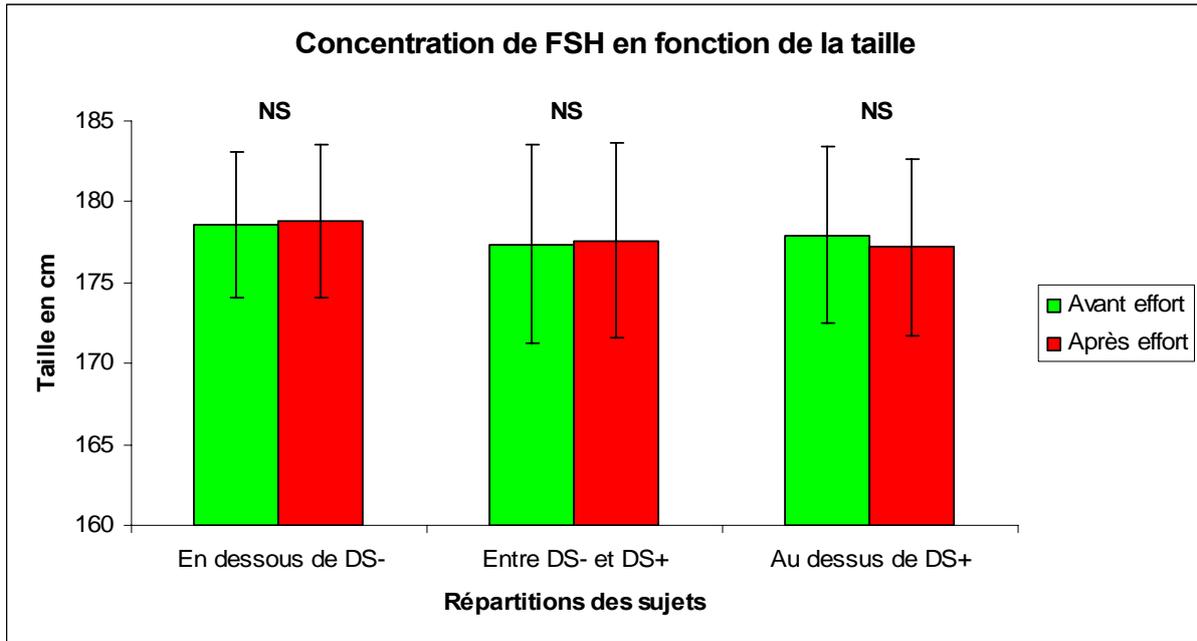
Figure 42 : Répartition de [FSH] des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

La taille moyenne des individus par rapport aux situations de leur concentration de FSH montre que les groupes de cyclistes dont les répartitions des concentrations sont en dessous de DS- et entre DS- et DS+ présentent des valeurs de tailles pour les groupes après l'effort légèrement supérieures graphiquement mais identiques aux valeurs des groupes respectifs avant le test d'effort ($p = 0,88$ et $p = 0,66$). Pour les concentrations au dessus de DS+, les moyennes des groupes avant et après l'effort sont tout aussi identiques ($p = 0,63$). De plus il n'y a pas de différences significatives pour la taille moyenne des groupes avant et après entre en dessous de DS-, entre DS- et DS+ et au dessus de DS+ (Figure 43).

Figure 43 : Répartition de [FSH] des sujets en fonction des situations par rapport à la taille



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

3.2.2.4.2. Données Physiologiques

Nous avons de nouveau exprimé les données physiologiques en fonction des situations obtenues par les sujets pour les concentrations de FSH et les avons reportées dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de FSH (moyenne \pm écart-type)

	Avant l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 27	n = 164	n = 22
PMA (watts)	431 \pm 44	438 \pm 47	445 \pm 53
Vent Max (l/min)	163,9 \pm 21,3	170,3 \pm 20,5	171,2 \pm 16,7
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	70,3 \pm 4,8 ¥	71,6 \pm 5,9	74,1 \pm 3,5
FC Max (bpm)	187 \pm 11	186 \pm 9	187 \pm 8
W Anaérobie (watts)	343 \pm 41	347 \pm 36	359 \pm 45
Vent Anaérobie (l/min)	99,8 \pm 11,5 ⊕	106,2 \pm 14	104,7 \pm 10,9
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60,1 \pm 4,1	60,3 \pm 5,4	62,5 \pm 4,3
FC Anaérobie (bpm)	171 \pm 14	169 \pm 11	169 \pm 9

	Après l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 23	n = 170	n = 20
PMA (watts)	428 ± 45	439 ± 47	450 ± 49
Vent Max (l/min)	163,5 ± 22,8	170,6 ± 20	170 ± 15,4
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	70,1 ± 5,1 ¥	71,5 ± 5,7 Ж	74,6 ± 3,4
FC Max (bpm)	187 ± 12	186 ± 9	188 ± 9
W Anaérobie (watts)	339 ± 42	347 ± 37	362 ± 39
Vent Anaérobie (l/min)	99 ± 12 Ⓣ	106,4 ± 13,8	103,8 ± 11
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60 ± 4,4 ¥	60,2 ± 5,2 Ж	63,1 ± 4,3
FC Anaérobie (bpm)	171 ± 15	168 ± 10	170 ± 12

Note : ¥ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ ($p < 0,05$). Ⓣ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$). Ж indique une différence significative entre le groupe au dessus de DS+ et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$).

Le groupe dont les concentrations avant l'effort sont situées en dessous de DS- présente une consommation d'oxygène maximale significativement inférieure à celle du groupe avec les concentrations au dessus de DS+ ($p = 0,004$). Ce groupe détient également une valeur de ventilation anaérobie significativement inférieure au groupe entre DS- et DS+ ($p = 0,025$). Le groupe dont les concentrations sont au dessus de DS+ après l'effort possède des valeurs de consommation d'oxygène maximale et anaérobie supérieures à celles des aux groupes en dessous de DS- et entre DS- et DS+ après l'effort ($p < 0,05$).

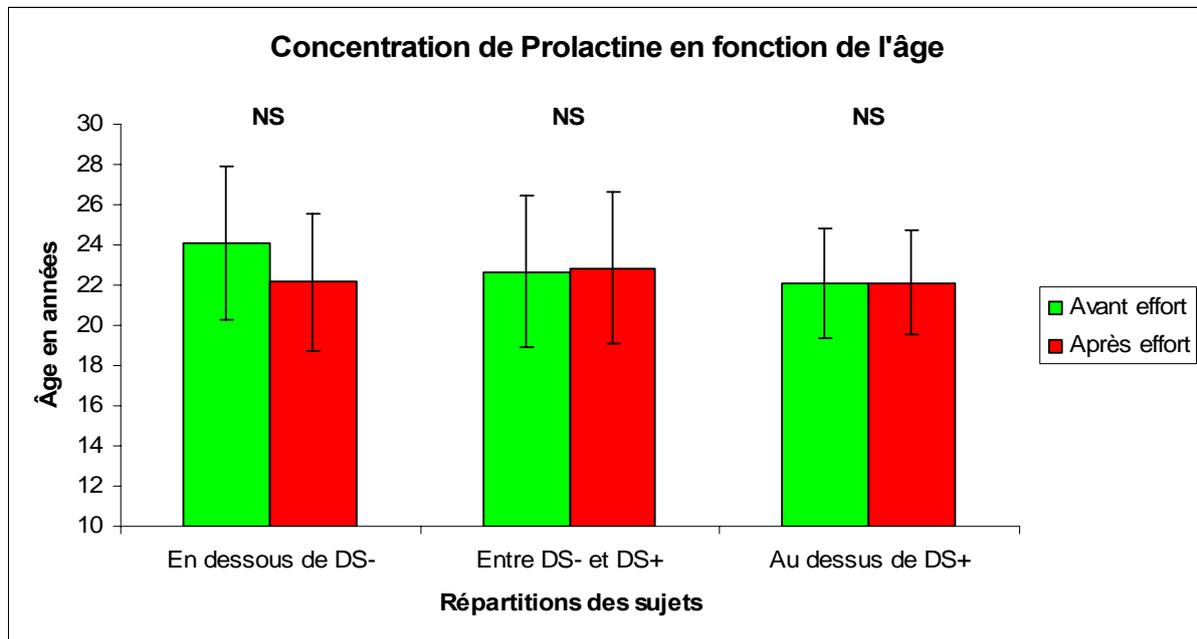
3.2.2.5. La prolactine.

3.2.2.5.1. Données physiques

Le groupe de cyclistes dont les concentrations de prolactine sont en dessous de DS- avant l'effort présente la moyenne d'âges la plus élevée lorsque l'on regarde la Figure 44, ce qui sous entendrait que les cyclistes les plus âgés sont ceux qui au repos secrètent le moins de prolactine. Malgré tout cette moyenne d'âge est identique à celle du groupe après le test d'effort puisque $p = 0,25$. La moyenne d'âge est similaire entre les groupes avec des concentrations de prolactine supérieures à DS+. Pour les groupes avec des sujets aux

concentrations comprises entre DS- et DS+, les moyennes sont également identiques car $p = 0,7$ (Figure 44).

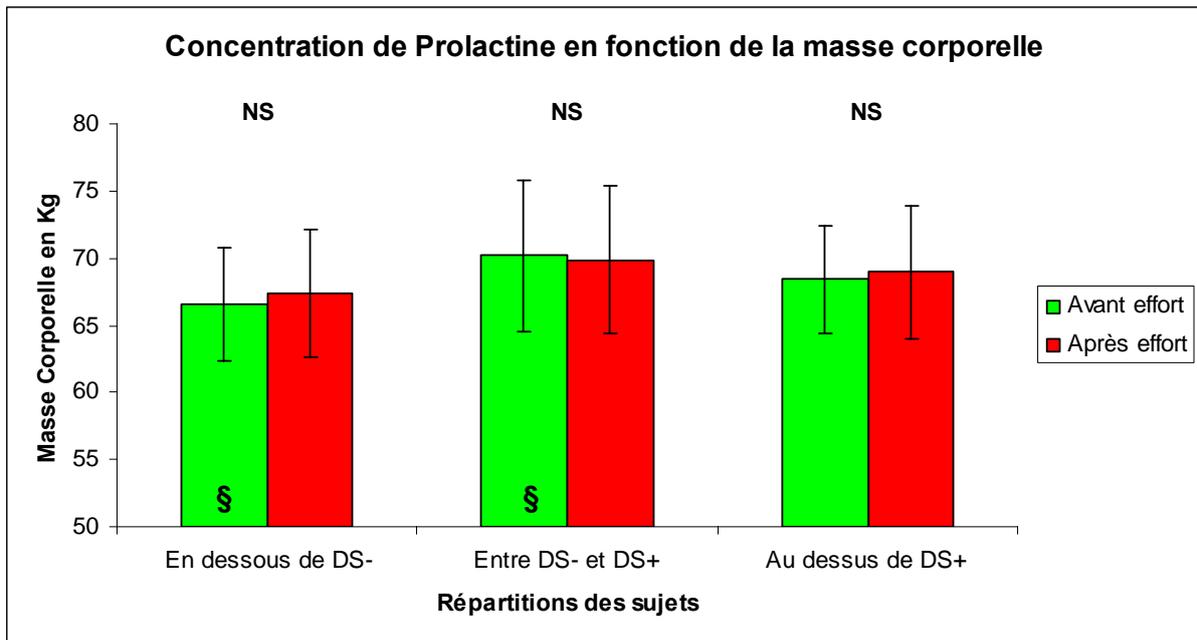
Figure 44 : Répartition de la prolactine des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

On peut voir, concernant la masse corporelle moyenne, que le groupe ayant des concentrations de prolactine comprises entre DS- et DS+ avant l'effort est significativement plus lourd que le groupe ayant les plus petites concentrations de prolactine au repos, c'est-à-dire en dessous de DS-. Pour les groupes ayant des concentrations en dessous de DS- et au dessus de DS+, les groupes dont les concentrations ont été obtenues avant l'effort fournissent respectivement une masse corporelle moyenne légèrement inférieure que pour les groupes dont le moment de prélèvement était après le test d'effort mais restent identiques d'après les résultats du test de Mann-Whitney ($p = 0,81$ et $p = 0,70$) (Figure 45).

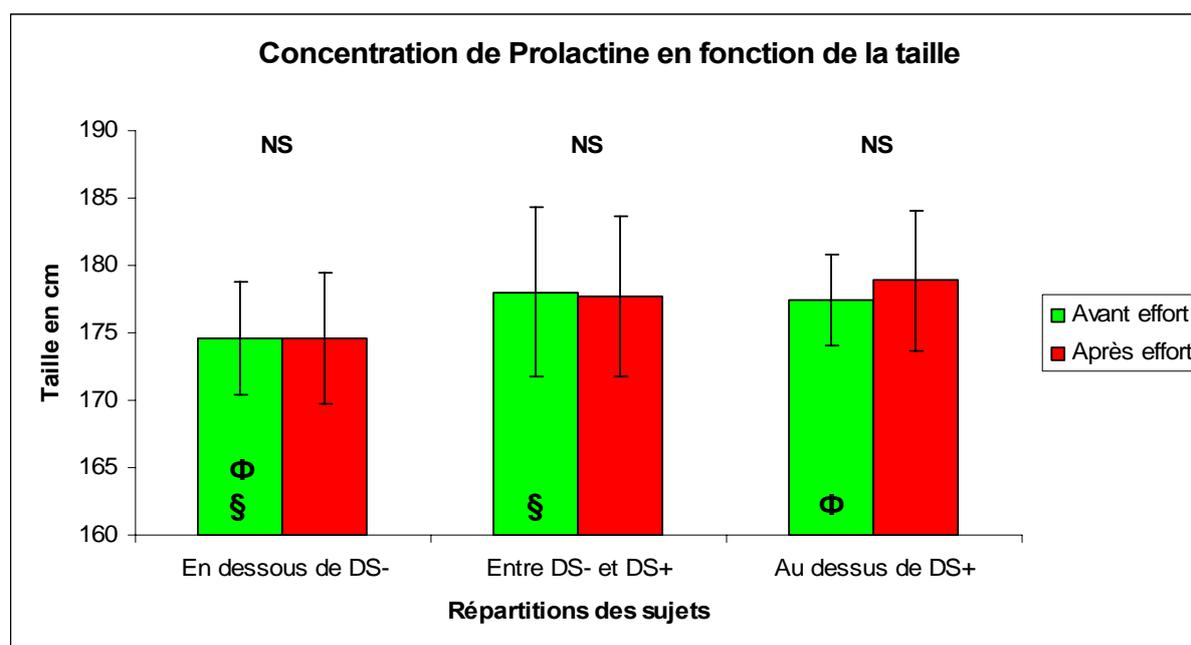
Figure 45 : Répartition de la prolactine des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. **§** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ avant l'effort ($p = 0,003$).

Les groupes dont les concentrations de prolactine sont en dessous de DS- semblent présenter des moyennes de tailles identiques entre avant et après l'effort. Cependant, le groupe qui a des concentrations en dessous de DS- au repos possède une taille moyenne significativement plus petite que celle des autres groupes avec des concentrations avant l'effort comprises entre DS- et DS+ et supérieures à DS+ ($p = 0,01$ et $p = 0,02$ respectivement). Pour les groupes avec des répartitions des concentrations au dessus de DS+, le groupe avant l'effort montre une moyenne de taille inférieure à celle du groupe après l'effort de façon visuelle uniquement car cette différence n'est pas significative ($p = 0,54$). Pour les groupes avec des concentrations entre DS- et DS+, il y a une légère infériorité pour le groupe après l'effort mais toujours non significative car $p = 0,66$ (Figure 46).

Figure 46 : Répartition de la prolactine des sujets en fonction des situations par rapport à la taille



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. **§** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ avant l'effort ($p = 0,01$). **Φ** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ avant l'effort ($p = 0,02$)

3.2.2.5.2. Données physiologiques

En mettant en relation les situations liées aux concentrations de prolactine avant et après l'effort, nous obtenons le Tableau 31

Tableau 31 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de Prolactine (moyenne \pm écart-type)

	Avant l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 22	n = 166	n = 25
PMA (watts)	430 \pm 48	439 \pm 48	442 \pm 40
Vent Max (l/min)	159,5 \pm 18,6 Φ	170,9 \pm 20,3	169,8 \pm 18,8
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	70,4 \pm 5,7 ¥	71,4 \pm 5,6 Ж	74,6 \pm 5,4
FC Max (bpm)	177 \pm 12 *	187 \pm 9	191 \pm 6
W Anaérobie (watts)	338 \pm 39	347 \pm 38	360 \pm 29
Vent Anaérobie (l/min)	99,1 \pm 9,9 Φ	105,9 \pm 13,7	106 \pm 13,8
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	59,4 \pm 4,7 ¥	60,3 \pm 5,2 Ж	63,1 \pm 4,6
FC Anaérobie (bpm)	159 \pm 13 *	169 \pm 11	174 \pm 9

	Après l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 7	n = 184	n = 22
PMA (watts)	414 ± 38	439 ± 47	443 ± 44
Vent Max (l/min)	169,8 ± 13,3	168,7 ± 20,8	176,1 ± 14,3
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	70,4 ± 6,6	71,5 ± 5,5	73,6 ± 5,6
FC Max (bpm)	176 ± 13 Θ ¥	186 ± 9	189 ± 8
W Anaérobie (watts)	321 ± 27 ¥	348 ± 39	354 ± 30
Vent Anaérobie (l/min)	104 ± 11	104,4 ± 13,5 Ж	111,8 ± 13,1
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	58,1 ± 5,2 ¥	60,3 ± 5,1	62,2 ± 4,6
FC Anaérobie (bpm)	159 ± 12 Θ ¥	169 ± 11	172 ± 10

Note : ¥ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ ($p < 0,05$). Θ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$). Ж indique une différence significative entre le groupe au dessus de DS+ et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$). * indique une différence significative entre les trois groupes ($p < 0,05$)

D'après le Tableau 31, le groupe avec les concentrations en dessous de DS- avant l'effort présente les valeurs les moins élevées de : ventilation maximale, consommation maximale d'oxygène, fréquence cardiaque maximale, ventilation anaérobie, consommation d'oxygène anaérobie, et de fréquence cardiaque anaérobie ($p < 0,05$). On constate d'ailleurs que plus la concentration de repos de prolactine est élevée et plus la fréquence cardiaque semble l'être également. Pour les concentrations en dessous de DS- après l'effort, le nombre de sujets de ce nombre est moins élevé qu'au repos (7 sujets contre 22). Toutefois ce groupe possède les fréquences cardiaques les moins élevées de l'ensemble des répartitions ($p < 0,05$) ainsi qu'une puissance maximale anaérobie significativement plus faible que par rapport à celle du groupe au dessus de DS+ ($p = 0,03$).

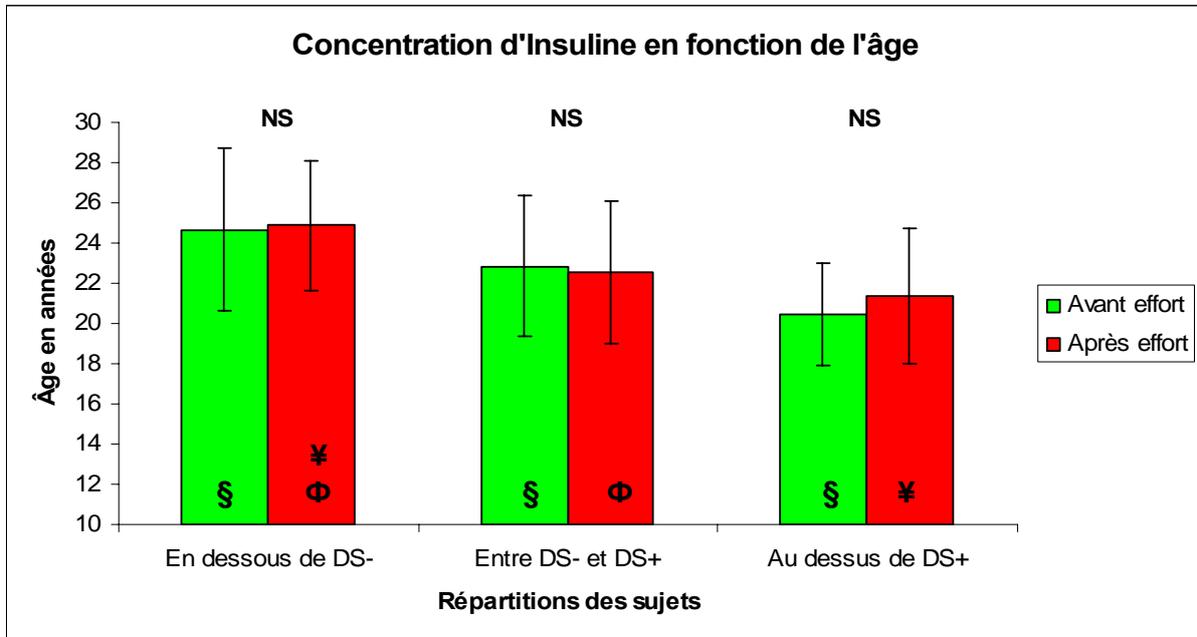
3.2.2.6. L'Insuline.

3.2.2.6.1. Données physiques.

La répartition de la concentration d'insuline en fonction de l'âge nous indique que les groupes composés d'individus ayant une concentration d'insuline en dessous de DS- sont en moyennes significativement plus âgés que les autres ($p < 0,05$). D'autre part, les groupes de

cyclistes avec des concentrations supérieures à DS+ sont les moins âgés avec une légère supériorité pour le groupe dont les valeurs ont été relevées après le test d'effort, toutefois il n'y a pas de différence significative entre les deux valeurs ($p = 0,43$). Pour les groupes situés entre les valeurs DS- et DS+ les moyennes sont similaires puisque $p = 0,57$ (Figure 47).

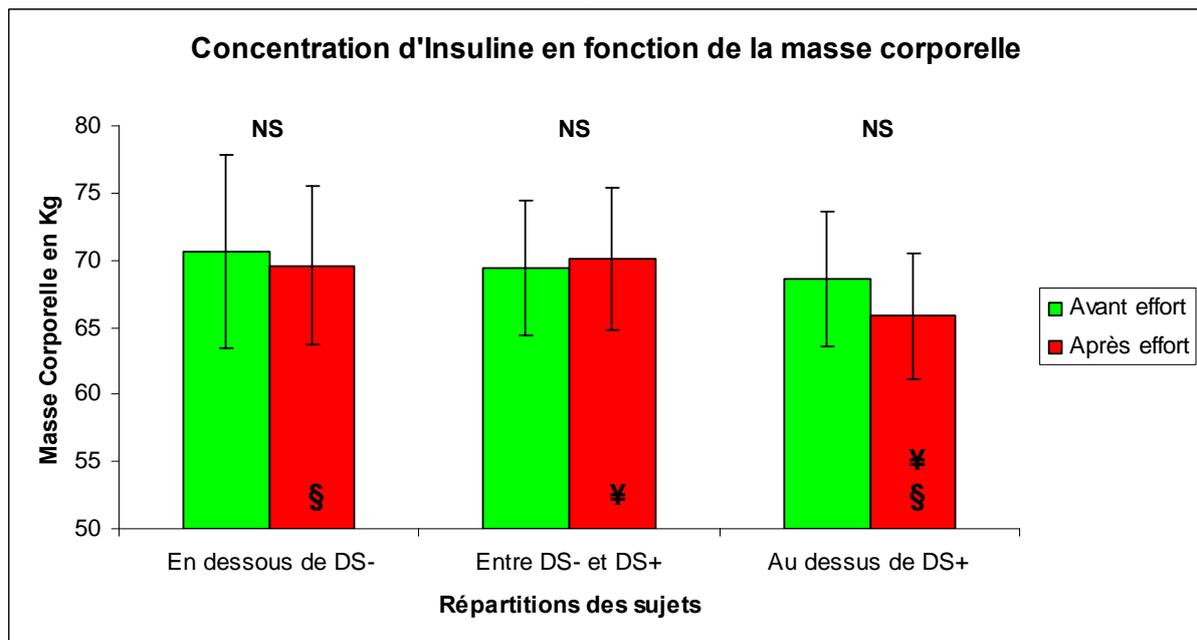
Figure 47 : Répartition de l'insuline des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. **\$** : différence significative entre tous les groupes pour les concentrations au repos ($p < 0,05$). **Φ** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ après l'effort ($p = 0,007$). **¥** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ après l'effort ($p = 0,003$)

Au niveau de la masse corporelle moyenne, pour les groupes ayant des concentrations d'insuline supérieures à DS+, il n'y a pas de différence significative ($p = 0,12$) entre le groupe dont les concentrations sont prélevées avant le test d'effort et celui après l'effort. Pour les groupes avec des concentrations en dessous de DS- et ceux avec des concentrations comprises entre DS- et DS+, les moyennes sont identiques entre les groupes au repos et après l'effort ($p = 0,54$ et $p = 0,37$, respectivement). Cependant le groupe avec des concentrations après l'effort supérieures à DS+ possède une masse corporelle moyenne significativement inférieure à celle des groupes avec des répartitions entre DS- et DS+ et au dessus de DS+ ($p = 0,04$ et $p = 0,001$ respectivement) (Figure 48).

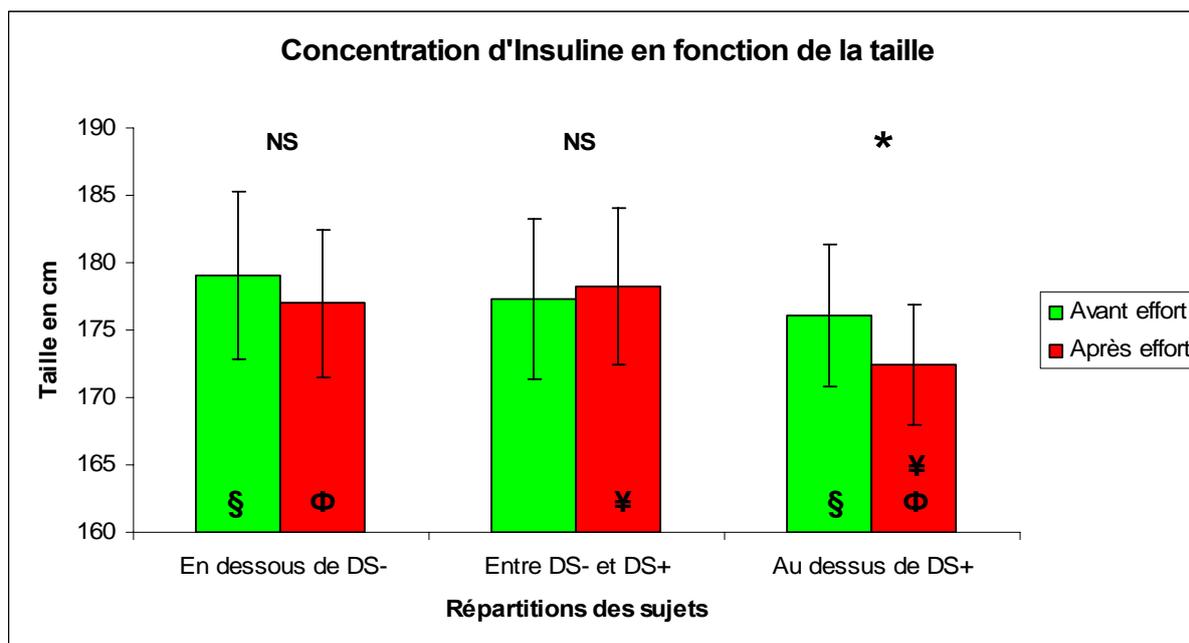
Figure 48 : Répartition de l'insuline des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. **§** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ après l'effort ($p = 0,04$). **¥** : différence significative entre le groupe entre DS- et DS+ et le groupe au dessus de DS+ après l'effort ($p = 0,001$)

Concernant la représentation de la répartition des concentrations d'insuline en fonction de la taille des individus. Pour les groupes avec des concentrations en dessous de DS- et ceux avec des concentrations d'insuline comprises entre DS- et DS+, il n'y a pas de différences significatives car $p = 0,24$ et $p = 0,18$ respectivement. Par contre pour les groupes au dessus de DS+, le groupe après le test d'effort présente une taille moyenne significativement inférieure à celle du groupe avec des concentrations au dessus de DS+ au repos ($p = 0,04$), ce qui signifierai qu'après l'effort, ce sont les cyclistes les plus petits qui ont les concentrations d'insuline les plus faibles (Figure 49).

Figure 49 : Répartition de l'insuline des sujets en fonction des situations par rapport à la taille



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort * Pour cette répartition, différence significative entre avant et après l'effort. **§** : différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ avant l'effort ($p = 0,01$). **¥**, **Φ** : différences significatives entre le groupe au dessus de DS+ et les groupes entre DS- et DS+ et en dessous de DS- après l'effort ($p < 0,01$)

3.2.2.6.2. Données physiologiques

Les statistiques des paramètres physiologiques pour les répartitions des concentrations d'insuline sont affichées dans le tableau ci après (Tableau 32). Dans ce dernier, le groupe avec les concentrations au dessus de DS+ au repos présente la puissance maximale aérobie significativement la moins élevée ($p < 0,01$) tout comme la puissance maximale anaérobie ($p = 0,03$). Pour le groupe en dessous de DS- au repos, on observe la fréquence cardiaque maximale la moins élevée ($p < 0,05$). Pour les concentrations en dessous de DS- après l'effort, ce groupe est associé à une ventilation maximale significativement plus petite ($p = 0,03$) ainsi que des fréquences cardiaques moins élevées ($p < 0,001$)

Tableau 32 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration d'insuline (moyenne \pm écart-type)

	Avant l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 29	n = 156	n = 28
PMA (watts)	441 \pm 50 ¥	439 \pm 45 Ж	414 \pm 52
Vent Max (l/min)	163,3 \pm 19,3	170 \pm 19,6	170,1 \pm 26,3
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	70,8 \pm 5,4	72,1 \pm 6	70,8 \pm 5,4
FC Max (bpm)	181 \pm 11 $\text{¥} \text{⊕}$	186 \pm 10	190 \pm 7
W Anaérobie (watts)	350 \pm 40	347 \pm 36 Ж	332 \pm 41
Vent Anaérobie (l/min)	102,9 \pm 11,2	106 \pm 13,3	102,2 \pm 16,3
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	59,6 \pm 4,8	60,9 \pm 5,4	59,8 \pm 6
FC Anaérobie (bpm)	162 \pm 11 $*$	169 \pm 11	174 \pm 10
	Après l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 23	n = 169	n = 21
PMA (watts)	450 \pm 50	437 \pm 46	418 \pm 56
Vent Max (l/min)	160,9 \pm 18,9 ⊕	170,4 \pm 20,5	167,4 \pm 20,8
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71,5 \pm 4,5	71,8 \pm 5,8	71,4 \pm 6,4
FC Max (bpm)	178 \pm 10 $\text{¥} \text{⊕}$	187 \pm 9	189 \pm 7
W Anaérobie (watts)	352 \pm 44	347 \pm 36	333 \pm 40
Vent Anaérobie (l/min)	104,1 \pm 13,6	105,8 \pm 13,4	100,4 \pm 14,9
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60,3 \pm 4,1	60,4 \pm 5,4	61,1 \pm 5,6
FC Anaérobie (bpm)	160 \pm 12 ⊕	170 \pm 11	160 \pm 12

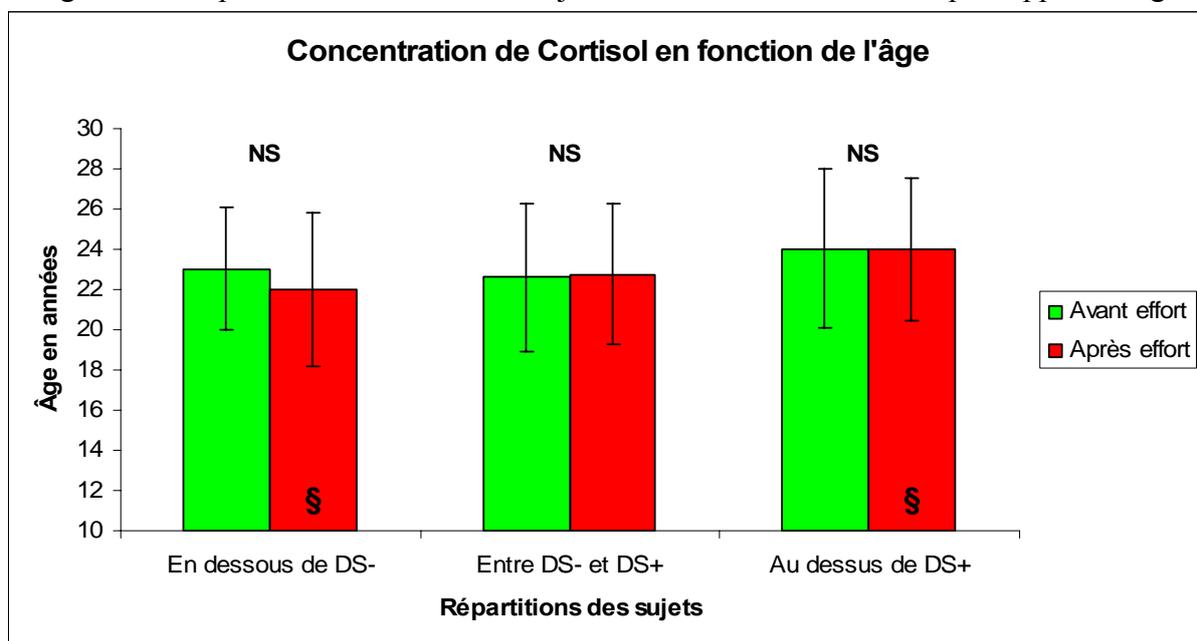
Note : ¥ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ ($p < 0,05$). ⊕ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$). Ж indique une différence significative entre le groupe au dessus de DS+ et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$). $*$ indique une différence significative entre les trois groupes ($p < 0,05$)

3.2.2.7. Cortisol.

3.2.2.7.1. Données physiques

Le groupe ayant des concentrations de cortisol supérieures à DS+ après l'effort a une moyenne d'âge significativement plus élevée que le groupe avec des concentrations en dessous de DS- après l'effort ($p = 0,03$). Cependant entre les groupes avec les concentrations prélevées avant l'effort et ceux avec des concentrations relevées après l'effort, il n'y a pas de différence significative observée pour l'âge de chaque groupe ($p > 0,05$) (Figure 50).

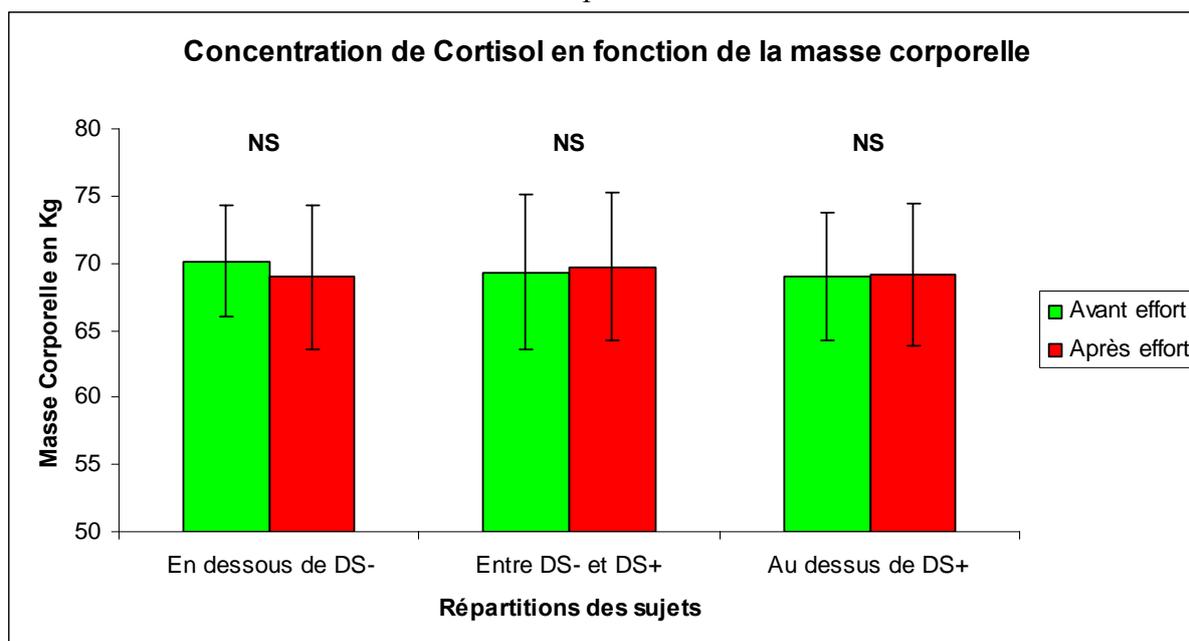
Figure 50 : Répartition du cortisol des sujets en fonction des situations par rapport à l'âge



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. **§** : Différence significative entre au dessus de DS+ et en dessous de DS- pour les concentrations après l'effort

En fonction de la masse corporelle, il y a égalité entre les valeurs des groupes contenant les prélèvements effectués avant le test d'effort et ceux effectués après et même au niveau des groupes ayant des concentrations de cortisol en dessous de DS- ($p = 0,42$) (Figure 51).

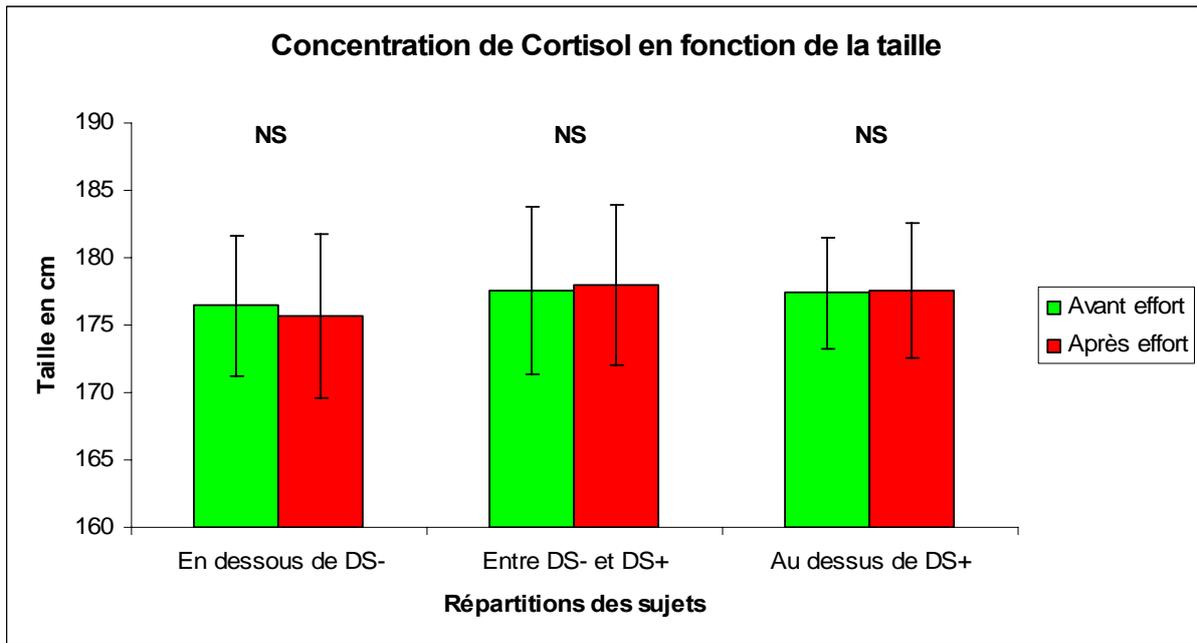
Figure 51 : Répartition du cortisol des sujets en fonction des situations par rapport à la masse corporelle



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

Pour les groupes avec des concentrations de cortisol au dessus de DS+, il y a égalité entre la taille moyenne de la population du groupe avant le test d'effort et celle du groupe après le test d'effort. Pour les groupes avec des concentrations comprises entre DS- et DS+, il y a similitude ($p = 0,57$) et pour les groupes avec des concentrations de cortisol en dessous de DS- également ($p = 0,95$) (Figure 52).

Figure 52 : Répartition du cortisol des sujets en fonction des situations par rapport à la taille



Note : **NS** signifie pas de différences significatives entre avant et après l'effort. Pas de différences significatives entre les groupes en dessous de DS-, entre DS- et DS+, et au dessus de DS+ ($p > 0,05$)

3.2.2.7.2. Données physiologiques

En utilisant le tri fournit par les différentes situations, les statistiques descriptives des paramètres physiologiques en rapport avec les concentrations de cortisol apparaissent dans le tableau suivant (Tableau 33).

Tableau 33 : Statistiques descriptives des paramètres physiologiques par rapport à la concentration de cortisol (moyenne \pm écart-type)

	Avant l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 28	n = 159	n = 26
PMA (watts)	446 \pm 36	434 \pm 51	435 \pm 46
Vent Max (l/min)	175,6 \pm 16 Θ Ψ	168,4 \pm 21,1	162,2 \pm 19,8
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71,8 \pm 4,4	72,1 \pm 5,9	70,3 \pm 6
FC Max (bpm)	180 \pm 10 Θ Ψ	186 \pm 10	187 \pm 10
W Anaérobie (watts)	343 \pm 29	346 \pm 40	347 \pm 37
Vent Anaérobie (l/min)	112,3 \pm 1,4 Θ Ψ	103,9 \pm 13,3	102,2 \pm 14,8
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	60,2 \pm 4	60,8 \pm 5,6	59,6 \pm 4,8
FC Anaérobie (bpm)	163 \pm 11 Θ Ψ	169 \pm 11	169 \pm 11
	Après l'effort		
	En Dessous (DS-)	Entre (DS- et DS+)	Au dessus (DS+)
	n = 32	n = 152	n = 29
PMA (watts)	420 \pm 52	440 \pm 48	443 \pm 42
Vent Max (l/min)	169,3 \pm 23,6 Ψ	171,1 \pm 19,4 \mathcal{K}	158,8 \pm 18,5
$\dot{V}O_2$ Max (ml/min/kg)	71,2 \pm 6,2	72,1 \pm 5,5	71,1 \pm 5,2
FC Max (bpm)	183 \pm 9 Θ	187 \pm 10	186 \pm 10
W Anaérobie (watts)	330 \pm 42 Θ Ψ	349 \pm 37	352 \pm 39
Vent Anaérobie (l/min)	103 \pm 15,6	106,7 \pm 13,4 \mathcal{K}	99,7 \pm 10,5
$\dot{V}O_2$ Anaérobie (ml/min/kg)	59,8 \pm 5,7	60,8 \pm 5,3	59,8 \pm 4
FC Anaérobie (bpm)	165 \pm 10	169 \pm 12	167 \pm 11

Note : Ψ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe au dessus de DS+ ($p < 0,05$). Θ indique une différence significative entre le groupe en dessous de DS- et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$). \mathcal{K} indique une différence significative entre le groupe au dessus de DS+ et le groupe entre DS- et DS+ ($p < 0,05$).

Pour les concentrations de cortisol, le groupe en dessous de DS- au repos présente pour la ventilation maximale et la ventilation anaérobie les valeurs significativement les plus élevées ($p < 0,05$ et $p < 0,01$ respectivement) et les fréquences cardiaques les plus faibles ($p < 0,05$). Pour les concentrations après l'effort, le groupe avec les concentrations en dessous de

DS- à une puissance maximale anaérobie plus basse que le groupe avec les concentrations entre DS- et DS+ ($p = 0,01$) et plus basse celui au dessus de DS+ ($p = 0,046$).

3.2.3. Les régressions multiples

Nous avons cherché à définir d'une part s'il pouvait y avoir une relation entre la PMA qui représente l'aptitude physique du sujet et toutes les autres variables disponibles et d'autre part entre la puissance maximale au seuil anaérobie (W Anaérobie) et ces variables. Pour ce faire nous avons alors un tableau regroupant les variables : âge, poids, taille, PMA, ventilation max, $\dot{V}O_2$ max, fréquence cardiaque maximale, W anaérobie, ventilation anaérobie, $\dot{V}O_2$ anaérobie, fréquence cardiaque anaérobie, des données hormonales avant et après effort (testostérone totale, testostérone libre, LH, FSH, prolactine, insuline, cortisol), nous pouvons ainsi définir la variable PMA comme étant la variable dépendante dans un premier temps et la variable W Anaérobie dans un second. Pour cela, nous recherchons un modèle de régression linéaire dont l'équation s'écrit $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon$ où Y correspond à la variable dépendante, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_i$ correspondent elles aux variables explicatives, et $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_i$ sont les paramètres estimés associés aux variables indépendantes et ε à l'erreur du modèle. C'est ainsi que dans l'investigation de nos deux modèles, nous avons défini Y comme étant PMA puis W Anaérobie.

Etant donné que nous disposons à chaque fois d'un panel de 24 variables explicatives, afin de trouver le meilleur sous ensemble de variables explicatives, nous avons utilisé cinq procédures de sélection de variables sachant que les modèles obtenus seront soumis à quelques hypothèses concernant leur fiabilité.

3.2.3.1. La sélection des variables

A l'aide de SAS, nous avons utilisé plusieurs méthodes de sélection de variables que sont la méthode pas à pas, la méthode d'introduction progressive et la méthode d'élimination progressive (cf chap.1) ainsi que celle permettant le choix d'un modèle à l'aide du coefficient de détermination ajusté (qui fournit le modèle qui possède le meilleur coefficient de

détermination ajusté) et celle permettant le choix d'un modèle à l'aide de la statistique Cp de Mallows² (on obtient le modèle ayant le Cp le plus faible).

3.2.3.1.1. La méthode pas à pas

Pour définir la variable PMA, le modèle fournit par cette procédure de sélection contient les variables Taille, W anaérobie (W ana), Ventilation anaérobie, Fréquence cardiaque anaérobie et Testostérone libre avant l'effort. Le modèle s'écrit alors :

$$\text{PMA} = 1,67 \text{ Taille} + 0,7 \text{ W Ana} + 0,57 \text{ Vent Ana} - 0,88 \text{ FC Ana} - 0,75 \text{ Testo libre avant.}$$

Les paramètres associés à chaque variable ainsi que les probabilités du test de ces paramètres (ce test permet d'examiner la contribution marginale de chaque variable indépendante, c'est-à-dire si le paramètre est égal ou différent de 0 ; si la probabilité obtenue est supérieure à 0,05 alors le paramètre est nul) sont donnés par le Tableau 34 avec également le coefficient de détermination du modèle, la probabilité de significativité du modèle (qui est fournie par une analyse de variance et qui permet de savoir si la régression est significative dans son ensemble) et le coefficient Cp de Mallows.

Tableau 34 : Modèle issu de la méthode de sélection pas à pas pour la variable PMA

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Taille	1,67	<0,0001
W Ana	0,7	<0,0001
Vent Ana	0,57	0,0018
FC Ana	-0,88	<0,0001
Testostérone libre avant effort	-0,75	0,0472
R ² =0,9966 <i>p</i> <0,0001 Cp=9,5		

Pour la puissance au seuil anaérobie, la méthode de sélection pas à pas propose un modèle contenant les variables suivantes : Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, Vent Ana, LH avant l'effort

² Le Cp de Mallows est une statistique qui estime l'erreur d'échantillonnage et le biais statistique, ce qui permet de se fier ou non au modèle de régression obtenu.

et la prolactine avant l'effort. Le Tableau 35 donne les valeurs des paramètres associés aux variables et leur significativité.

Tableau 35 : Modèle issu de la méthode d'introduction progressive pour la variable W Ana

Variabiles sélectionnées	Paramètres	Significativité
Age	2,21	<0,0001
$\dot{V}O_2$ Max	0,74	0,0017
PMA	0,43	<0,0001
Vent Ana	0,43	0,0047
LH av effort	-2,66	0,0452
Prolactine av effort	2,23	<0,001
$R^2=0,9968$ $p<0,0001$ $C_p=10,88$		

3.2.3.1.2. La méthode d'introduction progressive

Le modèle expliquant la variable PMA qui est fournit par cette méthode de sélection est :

$$PMA = 0,91 \text{ Poids} + 1,21 \text{ Taille} - 0,31 \text{ Vent Max} + 0,68 \text{ W Ana} + 0,87 \text{ Vent Ana} - 0,57 \text{ FC Ana} - 0,79 \text{ Testo libre av} - 0,97 \text{ Prl av.}$$

Tableau 36 : Modèle issu de la méthode d'introduction progressive pour la variable PMA

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Poids	0,91	0,1410*
Taille	1,21	0,0012
Vent Max	-0,31	0,0640*
W Ana	0,68	<0,0001
Vent Ana	0,87	0,0018
FC Ana	-0,57	0,0126
Testostérone libre av effort	-0,79	0,0375
Prolactine av effort	-0,97	0,1669*

$R^2=0,9967$ $p<0,0001$ $C_p=8,85$

Note :* Ces variables n'ont pas d'effets significatifs sur la variable dépendante car les valeurs de significativité sont supérieures à $\alpha=5\%$.

On remarque d'après ce tableau (Tableau 36) que les paramètres associés aux variables Poids, Vent Max et Prolactine av effort ne sont pas différent de 0 (les probabilités respectives de 0,1410, 0,0640 et 0,1669 sont supérieures à 0,05) même si la régression est significative dans son ensemble ($p < 0,0001$). Outre ces variables, les autres qui contribuent le plus à expliquer la PMA sont les mêmes que lors de la procédure de sélection pas à pas, il s'agit des variables Taille, W Ana, Vent Ana, FC Ana et Testostérone libre av effort.

Pour la variable W Ana, le modèle livré par la procédure d'introduction progressive est le même que celui de la méthode de sélection pas à pas (Tableau 35), c'est-à-dire :

$$W \text{ Ana} = 2,21 \text{ Age} + 0,74 \dot{V}O_2 \text{ Max} + 0,43 \text{ PMA} + 0,43 \text{ Vent Ana} - 2,66 \\ \text{LH av effort} + 2,23 \text{ Prolactine av effort}$$

3.2.3.1.3. La méthode d'élimination progressive

Le modèle que procure cette méthode pour expliquer la variable PMA est identique à celui de la méthode de sélection pas à pas. Il contient les variables Taille, W Ana, Vent Ana, FC Ana et Testostérone libre av effort.

Concernant la variable W Ana, le modèle que suggère la méthode d'élimination progressive est différent de celui proposé par les deux précédentes méthodes de sélection de variables. Ce modèle est présenté dans le Tableau 37.

Tableau 37 : Modèle issu de la méthode d'élimination progressive pour la variable W Ana

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Age	2,53	<0,0001
Poids	1,88	0,0002
Taille	-1,09	0,0013
$\dot{V}O_2$ Max	1,46	<0,0001
PMA	0,42	<0,0001
FC Ana	0,36	0,0455
LH av effort	-3,43	0,0121
Prolactine av effort	2,26	<0,0001
Cortisol av effort	-0,05	0,0138
Cortisol ap effort	0,03	0,0355
$R^2=0,9970$ $p<0,0001$ $C_p=7,37$		

Comme dans le précédent modèle définissant la variable W Ana, on retrouve les prédicteurs Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, LH avant l'effort et la prolactine avant l'effort, mais pas la variable Vent Ana. En contrepartie, ce sont les variables Poids, Taille, FC Ana, Cortisol avant et après l'effort qui font leur apparition dans le modèle avec des paramètres significativement différents de 0.

3.2.3.1.4. La méthode du coefficient de détermination ajusté

Pour expliquer la PMA, la méthode de sélection par le coefficient de détermination ajusté fournit un modèle composé de 13 variables (Tableau 38).

Tableau 38 : Modèle issu de la méthode du coefficient de détermination ajusté pour la variable PMA

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Poids	1,19	0,0602*
Taille	0,67	0,1244*
Vent Max	-0,3	0,0629*
FC Max	0,95	0,0970*
W Ana	0,69	<0,0001
FC Ana	-1,16	0,0172
Vent Ana	0,88	0,0014
Testostérone libre av effort	-1,56	0,0107
Testostérone libre ap effort	0,65	0,1370*
LH ap effort	1,48	0,1208*
FSH av effort	-0,86	0,3768*
Prolactine av effort	-1,12	0,0998*
Insuline av effort	-0,29	0,0598*
R ² =0,9970 <i>p</i> <0,0001 Cp=13		

Note :* Ces variables n'ont pas d'effets significatifs sur la variable dépendante car les valeurs de significativité sont supérieures à $\alpha=5\%$.

D'après les résultats du Tableau 38, on retrouve les variables W Ana, FC Ana, Vent Ana et Testostérone libre av effort avec des paramètres significativement différents de 0 comme dans les modèles issus des autres méthodes de sélections de variables. Par contre, la variable Taille est associée à un paramètre (0,67) qui n'est pas significativement différent de 0 ($p = 0,1244$ supérieur à $\alpha = 5\%$). Malgré la significativité du modèle dans son ensemble, les autres variables qui le compose ne sont pas significatives, il s'agit des variables Poids, Vent Max, FC Max, Testostérone libre ap effort, LH ap effort, FSH av effort, Prolactine av effort et Insuline av effort.

L'expression de la variable W Ana par cette méthode de sélection est donnée par un modèle composé de 16 variables (Tableau 39).

Tableau 39 : Modèle issu de la méthode du coefficient de détermination ajusté pour la variable W Ana

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Age	2,46	<0,0001
Poids	1,53	0,0064
Taille	-0,71	0,0730*
Vent Max	0,10	0,3018*
$\dot{V}O_2$ Max	1,22	0,0003
FC Max	-0,64	0,1385*
PMA	0,42	<0,0001
FC Ana	0,72	0,0575*
Testostérone total ap effort	1,12	0,2540*
LH av effort	-3,84	0,0131
LH ap effort	-1,23	0,1070*
FSH ap effort	0,71	0,2559*
Prolactine av effort	2,16	0,0001
Cortisol av effort	-0,04	0,0435
Cortisol ap effort	0,04	0,0153
Insuline av effort	0,21	0,1044*
$R^2 = 0,9972$ $p < 0,0001$ $C_p = 16$		

Note :* Ces variables n'ont pas d'effets significatifs sur la variable dépendante car les valeurs de significativité sont supérieures à $\alpha = 5\%$.

Les variables déjà retenues lors des autres méthodes de sélection le sont également dans cette procédure mis à part que les significativités ont changé pour certains paramètres. C'est ainsi que les variables Taille et FC Ana ne sont pas accolées à des paramètres significatifs ($p = 0,073$ et $p = 0,0575$ respectivement). Les variables restantes étant dans la même situation, le modèle obtenu comportant 16 variables, malgré le fait qu'il soit significatif dans son ensemble ($p < 0,0001$) n'inclut que 8 variables ayant une influence significative sur W Ana. Il s'agit des variables Age, Poids, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, LH av effort, Prolactine av effort, Cortisol avant et après effort.

3.2.3.1.5. La méthode du coefficient Cp de Mallows

Ayant un coefficient Cp de Mallows de 5,51, le modèle pourvu par cette procédure dans le but d'expliquer la variable PMA contient les modalités Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, FC Ana, Vent Ana, Testostérone libre avant et après effort ainsi que l'insuline avant effort (Tableau 40).

Tableau 40 : Modèle issu de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour la variable PMA

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Poids	1,24	0,0447
Taille	0,79	0,0679*
Vent Max	-0,32	0,0465
FC Max	0,94	0,0972*
W Ana	0,64	<0,0001
FC Ana	-1,25	0,0096
Vent Ana	0,91	0,0008
Testostérone libre av effort	-1,57	0,0095
Testostérone libre ap effort	0,73	0,0873*
Insuline av effort	-0,29	0,0485

$R^2 = 0,9969$ $p < 0,0001$ $C_p = 5,51$

Note :* Ces variables n'ont pas d'effets significatifs sur la variable dépendante car les valeurs de significativité sont supérieures à $\alpha = 5\%$.

Comme dans l'ensemble des modèles livré pour PMA par les différentes méthodes de sélection, on retrouve des variables communes et significatives comme W Ana, FC Ana, Vent Ana et Testostérone libre avant effort. Dans ce modèle, les variables Poids, Vent Max et Insuline avant effort apparaissent comme associées à des paramètres significatifs alors que ce n'est pas le cas des variables Taille, FC Max et Testostérone libre après effort.

Le plus petit coefficient Cp de Mallows fourni par une combinaison de variables pour interpréter W Ana est de 7,1. Il appartient à un modèle constitué des variables Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, LH avant effort, Prolactine avant effort et Cortisol avant et après effort comme présenté dans le Tableau 41.

Tableau 41 : Modèle issu de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour la variable W Ana

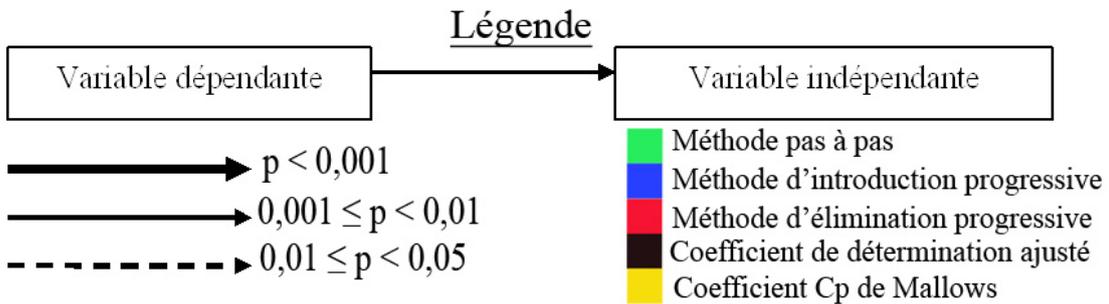
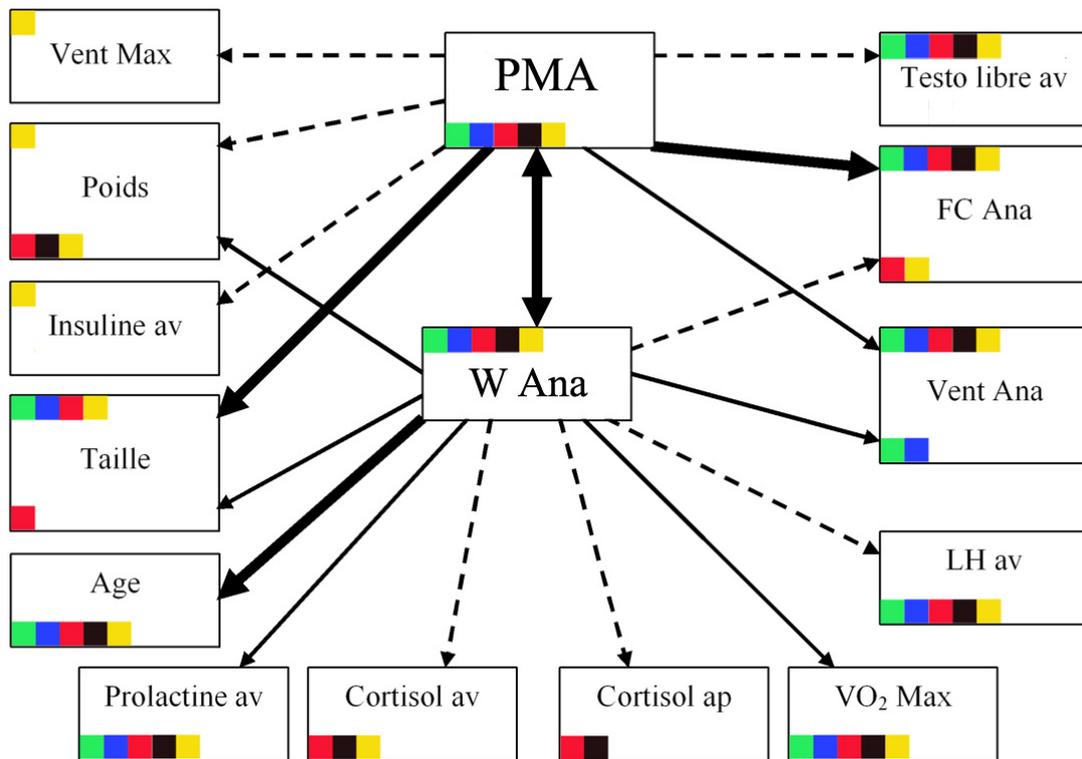
Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Age	2,16	<0,0001
Poids	1,50	0,0036
Taille	-0,66	0,0834
$\dot{V}O_2$ Max	1,47	<0,0001
FC Max	-0,65	0,1187
PMA	0,45	<0,0001
FC Ana	0,75	0,0358
LH av effort	-3,42	0,0097
Prolactine av effort	2,33	<0,0001
Cortisol av effort	-0,04	0,0353
Cortisol ap effort	0,02	0,0794
$R^2 = 0,9971$ $p < 0,0001$ $C_p = 7,1$		

Dans ce modèle (Tableau 41), trois variables ne sont pas associées à des paramètres significatifs, il s'agit de Taille ($p = 0,0834$), FC max ($p = 0,1187$) et Cortisol après effort ($p = 0,0794$). Les paramètres significatifs correspondent à des variables déjà aperçues dans d'autres modèles parmi ceux précédents pour définir W Ana, ce sont les variables Age, Poids, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, FC Ana, LH avant effort, Prolactine avant effort et Cortisol av effort.

3.2.3.2. Le modèle général

Les résultats des méthodes de sélection de variables utilisées sont résumés dans la Figure 53 permettant d'apprécier la nature des relations entre les variables.

Figure 53 : Les variables expliquant la PMA



Pour chaque variable, les « carrés de couleurs » situés en haut indiquent les méthodes de sélection de variables qui montrent une relation significative entre la variable dépendante (PMA) et la variable indépendante ; situés en bas ils indiquent les méthodes qui décrivent les relations entre W Ana et les variables indépendantes.

Précisons que nous n'avons que des modèles sans ordonnée à l'origine car nous avons effectué les procédures de sélection de variables avec une ordonnée à l'origine et dans tous les modèles obtenus, on avait un paramètre associé avec une valeur élevée et à chaque fois non significative. ($p > 0,1$) (Cf Annexe 3).

3.2.3.3. Les hypothèses de base du modèle de régression linéaire

Pour qu'un modèle de régression linéaire soit valide, il faut le respect d'un certain nombre d'hypothèses. Nous pouvons vérifier ces hypothèses avec différentes procédures disponibles sous SAS.

3.2.3.3.1. L'espérance nulle

Cette hypothèse concerne le fait que les erreurs $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_T$ doivent avoir une moyenne nulle, c'est-à-dire que $E(\varepsilon_t) = 0 \quad \forall t = 1, \dots, T$ où T représente le nombre de sujets. Avec SAS, nous pouvons vérifier cette hypothèse graphiquement et pour que l'on puisse conclure que l'hypothèse semble respectée, les graphiques des résidus en fonction des variables indépendantes doivent présenter une certaine symétrie par rapport à l'axe $e_i = 0$. Le programme nous affiche ainsi un diagramme de dispersion des résidus en fonction de chaque variable indépendante (par exemple Figure 54 et Figure 55, pour le modèle obtenu par la méthode de sélection pas à pas pour définir la variable PMA) et selon les graphiques obtenues, pour tous les modèles issus des procédures de sélection de variables, il ne semble pas y avoir de problème concernant cette hypothèse de base car les résidus semblent répartis aléatoirement autour de l'axe $e_i = 0$.

Figure 54 : Dispersion des résidus en fonction de la variable FC Ana

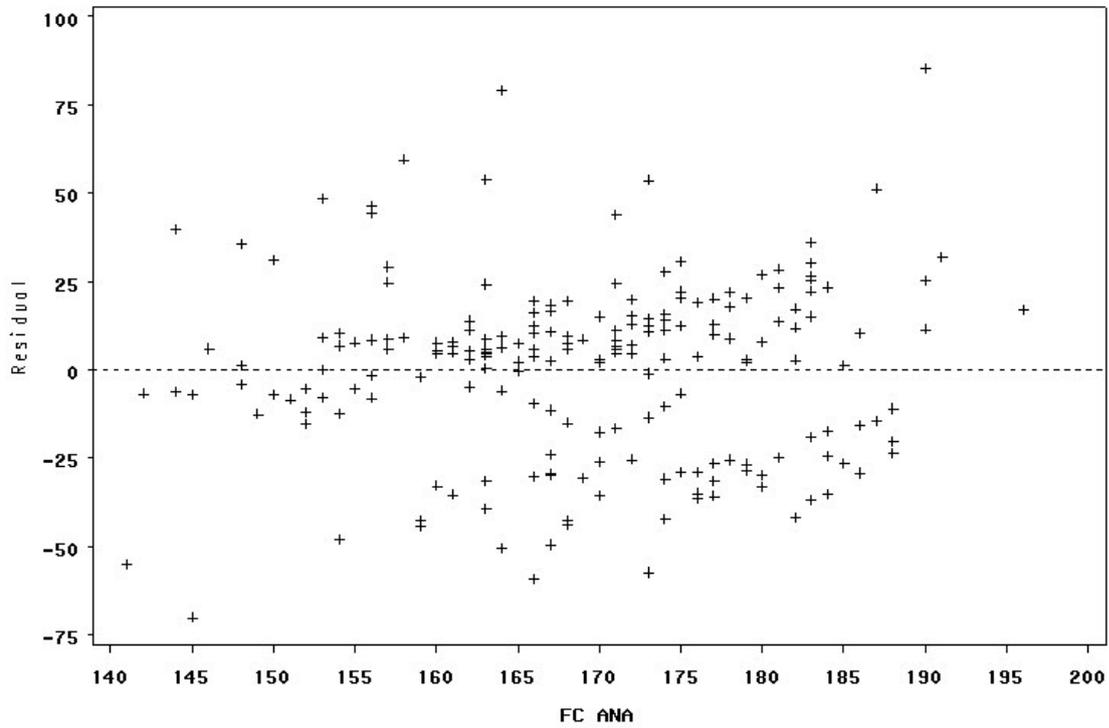
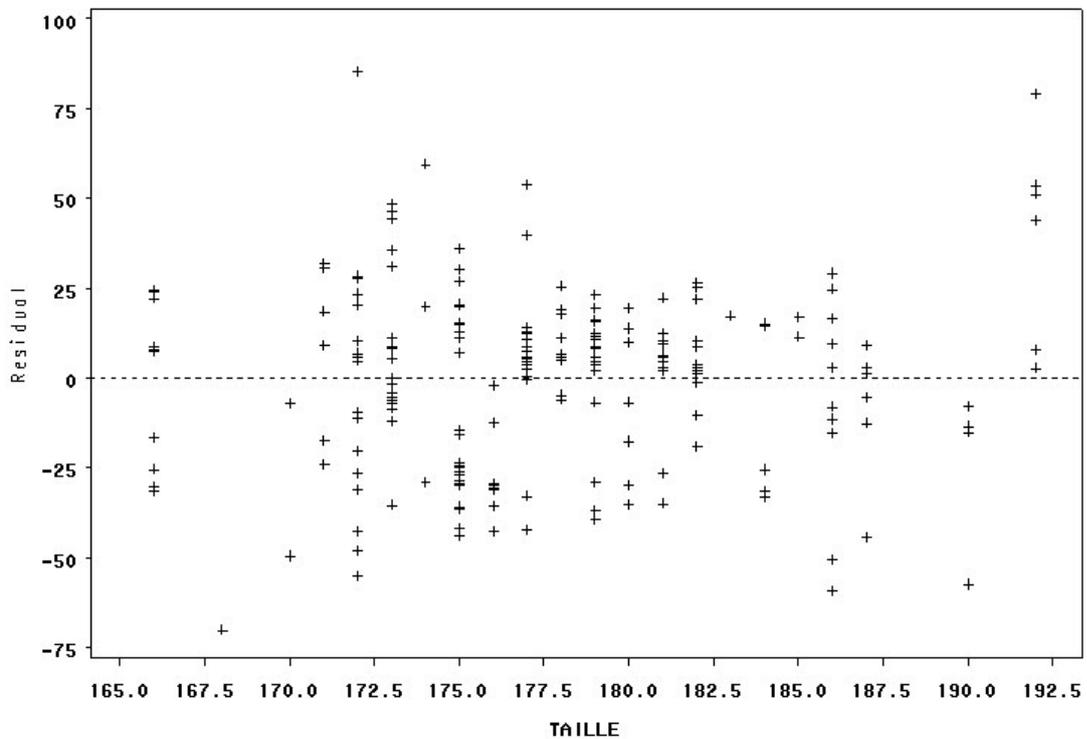


Figure 55 : Dispersion des résidus en fonction de la variable Taille



De plus, afin de confirmer cette hypothèse, SAS propose les résultats de deux tests statistiques sur les erreurs, le test t sur une moyenne (fournissant la probabilité critique $Pr>|T|$ qui permet de vérifier si la moyenne de la population est nulle) et le test de Wilcoxon sur un échantillon (donne la probabilité critique $Pr\geq|S|$ permettant de vérifier si la médiane de la population est nulle) sachant que le test t exige que les données proviennent d'une population normale. La règle de décision pour ces valeurs de probabilité est la suivante, si la valeur $Pr>|T|$ est supérieure au seuil $\alpha = 5\%$, nous favorisons l'hypothèse selon laquelle la moyenne est nulle et si la probabilité critique $Pr\geq|S|$ est supérieure au seuil α , l'hypothèse selon laquelle la médiane est nulle. Les résultats de ces procédures sont présentés dans le Tableau 42.

Tableau 42 : Résultat des tests concernant l'hypothèse d'espérance nulle.

Variable dépendante	Variabiles Indépendantes	$Pr> T $	$Pr\geq S $
PMA	Taille, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant	0,9698	0,6916
	Poids, Taille, Vent Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant	0,9816	0,6058
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant, LH après, FSH avant, Insuline avant	0,9918	0,8274
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Testostérone libre après, Prolactine avant	0,9894	0,8413
W Ana	Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, Vent Ana, LH avant, Prolactine avant	0,9496	0,9814
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	0,9346	0,9818
	Age, Poids, Taille, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, Testostérone total après, LH avant, LH après, FSH après, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après, Insuline avant	0,9377	0,9433
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	0,9433	0,9921

Note : Toutes les probabilités supérieures à 5% induisent l'espérance nulle des erreurs.

D'après ce tableau, l'hypothèse d'espérance nulle est respectée pour tous les modèles ce qui induit que les estimations des paramètres associés sont sans biais.

3.2.3.3.2. L'hypothèse d'homoscédasticité (ou variance constante)

Si la variance des résidus n'est pas constante (constante signifie $Var(\varepsilon_t) = \sigma^2 \quad \forall t = 1, \dots, T$), on dit alors qu'il y a hétéroscédasticité, dans ce cas les estimations des écarts-types sont biaisées impliquant ainsi que les résultats des tests statistiques et que le calcul des intervalles de confiance sont biaisés également. La violation de cette hypothèse peut tenter d'être décelée à l'aide d'un graphique comme pour l'espérance nulle mais l'homoscédasticité sera confirmée si les résidus sont distribués aléatoirement à l'intérieur d'une même bande horizontale.

SAS permet de vérifier cette hypothèse par l'utilisation du test de White en fournissant directement la probabilité critique pour le modèle concerné et si cette probabilité est supérieure au seuil $\alpha = 5\%$, la conclusion est que les variances sont égales et donc qu'il ne semble pas y avoir de problème d'hétéroscédasticité. Le Tableau 43 présente les résultats de ce test.

Tableau 43 : Test sur l'hypothèse d'homoscédasticité pour les modèles obtenus

Variable dépendante	Variabiles Indépendantes	Test de White
PMA	Taille, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant	$p=0,2092$
	Poids, Taille, Vent Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant	$p=0,2068$
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant, LH après, FSH avant, Insuline avant	$p=0,5388$
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Testostérone libre après, Prolactine avant	$p=0,4503$
W Ana	Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, Vent Ana, LH avant, Prolactine avant	$p=0,3700$
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	$p=0,5233$
	Age, Poids, Taille, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, Testostérone total après, LH avant, LH après, FSH après, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après, Insuline avant	$p=0,4845$
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	$p=0,5875$

Note : Pour chaque modèle les variances sont égales car $p > 0,05$.

3.2.3.3.3. L'hypothèse de non autocorrélation

Les inconvénients d'une autocorrélation sont importants : les variations des paramètres ainsi que la variance des résidus sont biaisées, ce qui implique des biais également dans l'exécution des tests d'hypothèses et dans le calcul des intervalles de confiance et de prévision.

Le test le plus fréquemment utilisé pour déceler l'autocorrélation est le test de Durbin-Watson. On obtient facilement avec SAS la statistique appelé Durbin-Watson D. Il faut alors examiner cette statistique en la comparant avec les valeurs d_1 et d_2 obtenues d'une table (Cf annexe 5) pour évaluer l'autocorrélation positive et négative.

Pour l'autocorrélation positive, si la statistique est inférieure à d_1 , il y a autocorrélation positive et si elle est supérieure à d_2 , il n'y a pas d'autocorrélation positive. Dans le cas où la statistique est comprise entre d_1 et d_2 , le test ne nous permet pas de conclure.

La règle de décision est légèrement différente pour l'autocorrélation négative dans le sens où l'on soustrait la statistique de Durbin-Watson du nombre 4 et si le résultat obtenu est inférieur à d_1 , il y a autocorrélation négative. Si ce résultat est supérieur à d_2 , il n'y a pas d'autocorrélation négative et s'il est compris entre d_1 et d_2 , comme pour l'autocorrélation positive, le test ne nous permet pas de conclure.

Les valeurs de d_1 et de d_2 dépendent de la taille de l'échantillon, du nombre de variables indépendantes dans l'équation de régression et du seuil de signification. Le Tableau 44 précise toutes ces valeurs.

Tableau 44 : Test de Durbin-Watson sur l'hypothèse d'autocorrélation pour les modèles obtenus

Variable dépendante	Variabiles Indépendantes	DW	d ₁	d ₂
PMA	Taille, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant	1,743	1,708	1,613
	Poids, Taille, Vent Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant	1,778	1,676	1,582
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant, LH après, FSH avant, Insuline avant	1,972	1,633	1,540
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Testostérone libre après, Prolactine avant	1,840	1,655	1,561
W Ana	Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, Vent Ana, LH avant, Prolactine avant	1,801	1,697	1,603
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	1,863	1,655	1,651
	Age, Poids, Taille, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, Testostérone total après, LH avant, LH après, FSH après, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après, Insuline avant	1,956	1,589	1,497
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	1,905	1,644	1,551

Tous les modèles semblent ne pas dénoter d'autocorrélation ce qui permet d'appuyer l'efficacité de l'estimation des paramètres associés aux variables de chaque modèle.

3.2.3.3.4. L'hypothèse de normalité des résidus

La normalité des erreurs est requise pour pouvoir valider l'exactitude des tests d'hypothèses (significativité des paramètres, du modèle) et des intervalles de confiance (et de prévision). Elle n'est toutefois pas nécessaire pour la partie estimation d'un modèle de régression. Cette hypothèse a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk détaillé précédemment (Cf Chap 1). Les résultats de ce test sont reportés dans le Tableau 45.

Tableau 45 : Test de normalité des résidus des modèles de régression.

Variable dépendante	Variabiles Indépendantes	Test de Shapiro-Wilk
PMA	Taille, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant	W=0,98 ; $p=0,0014^*$
	Poids, Taille, Vent Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant	W=0,98 ; $p=0,0069^*$
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant, LH après, FSH avant, Insuline avant	W=0,99 ; $p=0,0836$
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Testostérone libre après, Prolactine avant	W=0,98 ; $p=0,0298^*$
W Ana	Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, Vent Ana, LH avant, Prolactine avant	W=0,99 ; $p=0,3885$
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	W=0,99 ; $p=0,2000$
	Age, Poids, Taille, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, Testostérone total après, LH avant, LH après, FSH après, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après, Insuline avant	W=0,99 ; $p=0,1453$
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	W=0,99 ; $p=0,3691$

Note : * La normalité des résidus pour ces modèles ne semble pas être vérifiée ($p < 0,05$). La statistique W du test de Shapiro-Wilk est également fournie.

D'après les résultats du Tableau 45, trois modèles ne semblent donc pas avoir de résidus normalement distribués, cependant l'hypothèse de normalité est souvent rejetée et cela peut provenir d'une ou deux valeurs résiduelles extrêmes ou encore du fait qu'à partir du moment où une variable dépendante ne prend que des valeurs positives (ou négatives), sa distribution, par définition, ne peut être normale (c'est le cas par exemple en économétrie avec les salaires, l'épargne, etc...). De plus, le test de Shapiro-Wilk, robuste dans le cas univarié³, l'est moins dans le cas multivarié. En effet, comme nous l'avons vu au premier chapitre, le test de Shapiro-Wilk calcule la statistique W qui est positive et inférieure ou égale

³ On parle en mathématiques du terme univarié, quand on réfère à une expression, une équation ou une fonction résultante d'une seule variable. Dès lors que plus d'une variable sont impliqués, on parle alors de multivarié.

à 1. Une petite valeur de la statistique W conduit au rejet de l'hypothèse de normalité alors qu'une valeur proche de 1 est synonyme de distribution normale pour l'échantillon, mais il arrive qu'une valeur élevée de W ($W = 0,9$) soit considérée comme basse et conduise à rejeter l'hypothèse de normalité (SAS Institute, 1999). Ce phénomène se produit pour les trois modèles qui ne semblent pas avoir de résidus normalement distribués (car $W=0,98$ dans les trois cas). C'est pourquoi, Looney (1995), dans son accession à la normalité multivariée en utilisant des tests pour la normalité univariée, reprenait les recommandations de beaucoup d'auteurs préconisant l'utilisation des coefficients d'asymétrie (skewness) et d'aplatissement (kurtosis) et l'utilisation du test de Shapiro-Wilk car aucune des deux approches n'est plus efficace que l'autre dans la détection de l'alternative de non-normalité. Un coefficient d'asymétrie de l'ordre de 0 est indicateur d'une symétrie (caractéristique d'une distribution normale) et, combiné à un coefficient d'aplatissement également proche de 0, ils permettent de conclure à la normalité d'un échantillon. Ces coefficients sont présentés dans le Tableau 46

Tableau 46 : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des résidus

Variable dépendante	Variables Indépendantes	Kurtosis	Skewness
PMA	Taille, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant	0,514	-0,001
	Poids, Taille, Vent Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant	0,352	-0,088
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant, LH après, FSH avant, Insuline avant	0,223	0,069
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Testostérone libre après, Prolactine avant	0,556	0,162

W Ana	Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, Vent Ana, LH avant, Prolactine avant	0,090	-0,161
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	-0,127	-0,121
	Age, Poids, Taille, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, Testostérone total après, LH avant, LH après, FSH après, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après, Insuline avant	-0,093	-0,093
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	-0,249	-0,098

Note : Tous les coefficients sont proches de zéro, on favorise l'hypothèse de normalité des résidus.

Les résultats du Tableau 46 tendent à favoriser l'hypothèse de normalité des résidus même pour les modèles dont les résidus semblaient non normalement distribués d'après les probabilités critiques obtenues par le test de Shapiro-Wilk (Tableau 45) bien que les statistiques W elles, suggéraient la normalité des résidus pour ces modèles.

Afin de compléter la vérification de cette hypothèse, il y a aussi la méthode graphique. Chambers et al. (1983) proclamait qu'il n'y avait pas plus puissant qu'un graphique bien choisi, ce qui reste vrai dans la plupart des cas mais qui peu paraître exagéré. La droite de Henry (en anglais : Q-Q Plot) est une méthode qui permet de visualiser les chances qu'une distribution soit normale. Il s'agit d'un graphique composé d'une droite caractérisant une distribution normale ainsi que d'une courbe représentant la distribution à tester. Si les points obtenus sont sensiblement alignés sur la droite, on conclut qu'il n'y a aucune raison de rejeter l'hypothèse de normalité de la population. Dans le cas contraire, on rejette l'hypothèse de normalité. Les figures suivantes (Figure 56 à Figure 58) sont les droites de Henry pour les trois modèles sur lesquelles la valeur de la probabilité critique du test de Shapiro-Wilk était inférieure à 0,05.

Figure 56 : Droite de henry des résidus du modèle issu de la sélection pas à pas pour PMA

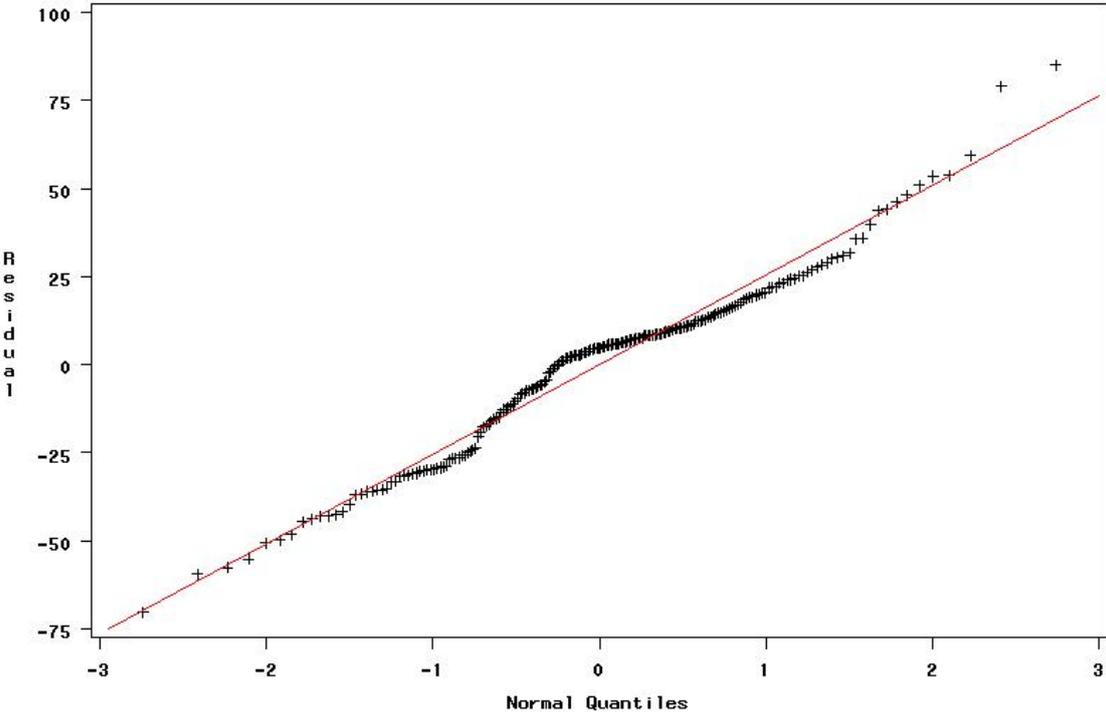


Figure 57 : Droite de Henry des résidus du modèle issu de la sélection d'introduction progressive pour PMA

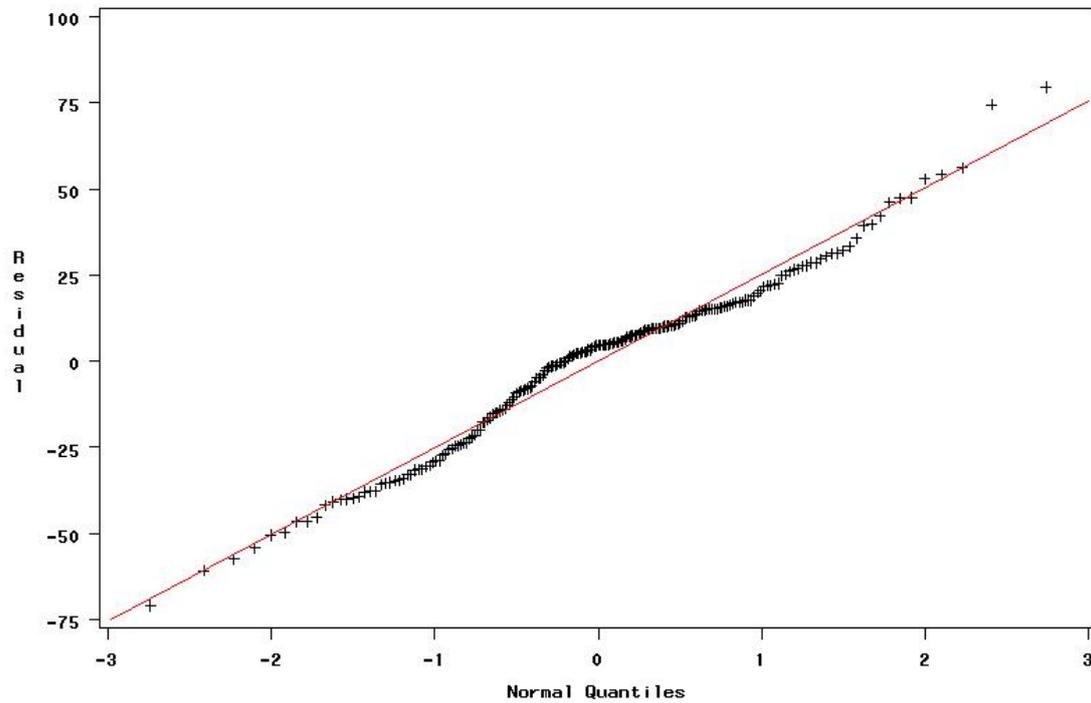
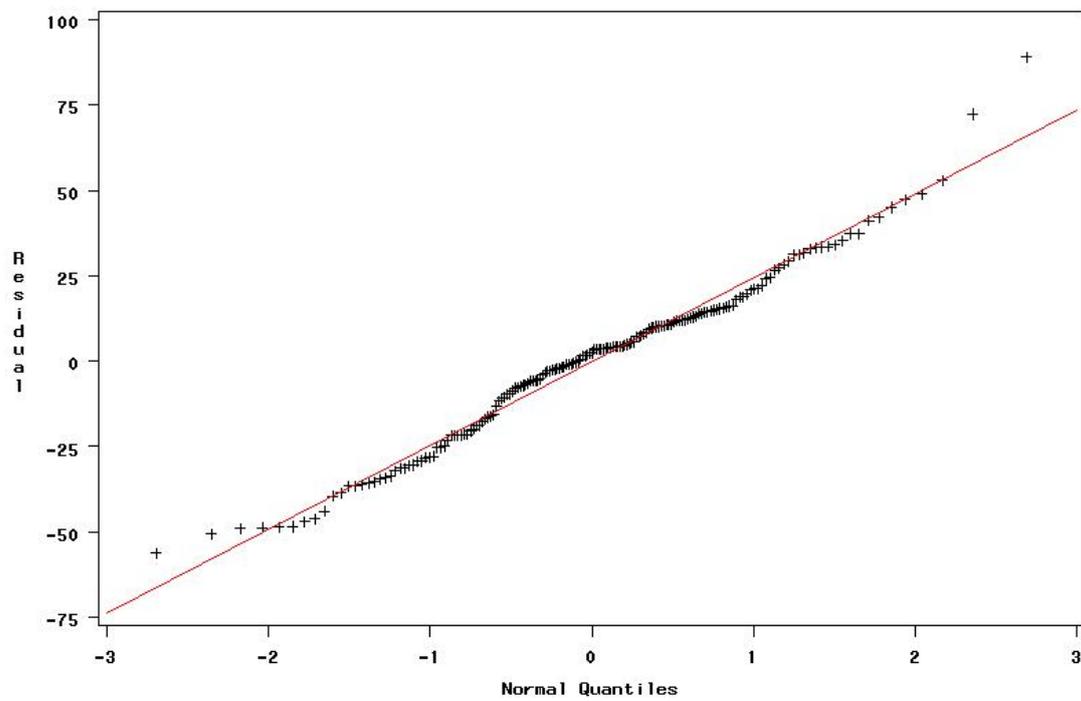


Figure 58 : Droite de Henry des résidus du modèle issu de la sélection du coefficient Cp de Mallows pour PMA



Ces figures (Figure 56 à Figure 58) ne semblent pas permettre de rejeter l'hypothèse de normalité des résidus des trois modèles pour lesquels le test de Shapiro-Wilk fournissait des statistiques W proches de 1 mais des probabilités critiques inférieures à 0,05.

Les histogrammes des résidus pour ces modèles avec la courbe de la distribution de la loi normale permettent aussi vérifier la normalité et sont disponibles en annexe 4.

3.2.3.3.5. L'hypothèse de non multicollinéarité

Il y a colinéarité lorsque plusieurs variables indépendantes sont liées linéairement, les estimations des paramètres obtenues sont alors instables et leur précision s'en trouve affectée. Nous avons diagnostiqué la colinéarité à l'aide de l'index de condition fourni par SAS qui dans le cas d'une supériorité à la valeur 100 indique la présence probable d'un problème de colinéarité. Lorsque cet indice est inférieur à 100, la colinéarité n'est pas un problème, par contre s'il est supérieur à 1000, la colinéarité est sévère (Tableau 47).

Tableau 47 : Test de diagnostique de la colinéarité des variables des modèles

Variable dépendante	Variabiles Indépendantes	Index de Condition
PMA	Taille, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant	52
	Poids, Taille, Vent Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant	106*
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Prolactine avant, LH après, FSH avant, Insuline avant	252*
	Poids, Taille, Vent Max, FC Max, W Ana, Vent Ana, FC Ana, Testostérone libre avant, Testostérone libre après, Prolactine avant	223*
W Ana	Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, Vent Ana, LH avant, Prolactine avant	34
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	138*
	Age, Poids, Taille, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, Testostérone total après, LH avant, LH après, FSH après, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après, Insuline avant	278*
	Age, Poids, Taille, $\dot{V}O_2$ Max, FC Max, PMA, FC Ana, LH avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après	230*

Note : * Ces modèles ont un problème de colinéarité car l'index de condition est supérieur à 100.

3.2.3.4. Validation des modèles

Après vérification des hypothèses de bases de la régression linéaire, on s'aperçoit que mis à part la multicollinéarité, toutes les autres hypothèses, et même la normalité sur laquelle nous devons être prudent, semblent être respectées pour tous les modèles fournis par les procédures de sélection de variables.

L'hypothèse relative à la multicollinéarité nous fournit uniquement deux modèles dans lesquels la colinéarité n'est pas un problème : un pour chaque variable dépendante. Pour la variable W Ana, le modèle respectant cette hypothèse respecte aussi les autres hypothèses de base, cela permet de pouvoir le sélectionner comme étant le plus « valide » pour expliquer cette variable. Pour la variable PMA, le modèle n'ayant pas de problème de colinéarité dispose de résidus distribués normalement même si la probabilité critique fourni par le test de Shapiro-Wilk ne permettait pas de favoriser cette hypothèse. Les modèles donc les plus « valides » pour expliquer PMA et W Ana sont donc :

$$\text{PMA} = 1,67 \text{ Taille} + 0,7 \text{ W Ana} + 0,57 \text{ Vent Ana} - 0,88 \text{ FC Ana} - 0,75$$

Testo libre avant.

et

$$\text{W Ana} = 2,21 \text{ Age} + 0,74 \dot{V}O_2 \text{ Max} + 0,43 \text{ PMA} + 0,43 \text{ Vent Ana} - 2,66$$

LH av effort + 2,23 Prolactine av effort

3.2.3.5. Un résultat d'analyse discriminante

Nous avons tenté de faire un lien avec les résultats d'une analyse discriminante en transformant le type de nos variables dépendantes qui à l'origine étaient des variables quantitatives en variables dépendantes ordinales.

Pour la variable PMA, le ré-encodage a été effectué de la façon suivante : à la plus petite valeur en watts (350), nous avons attribué la valeur 1, puis à chaque palier supplémentaire, nous avons rajouté une unité et ainsi la valeur en watts la plus élevée (550 W) dispose de la valeur 5. Ainsi pour PMA, les valeurs ordinales de la variable sont :

- 1 → 350 W
- 2 → 400 W
- 3 → 450 W
- 4 → 500 W
- et 5 → 550 W.

Nous avons ensuite procédé aux différentes procédures de sélection de variables pour déterminer les variables les plus discriminantes pour définir notre répartition pour cette variable en choisissant des seuils pour l'introduction et l'élimination de 10 et 25%. Nous avons obtenu pour la variable PMA deux modèles en fonction des seuils choisis (Tableau 48).

Tableau 48 : Sélection de variables pour l'analyse discriminante de PMA

<i>Méthodes de sélection</i>	<i>Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 25%</i>	<i>Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 10%</i>
Pas-à-pas	Age, Taille, W Ana, FC Ana, Vent Ana, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Ana, Insuline avant, FSH avant, FSH après	Age, Taille, W Ana, FC Ana, Vent Ana, Vent Max, Insuline avant, FSH avant, FSH après
Introduction progressive	Age, Taille, W Ana, FC Ana, Vent Ana, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Ana, Insuline avant, FSH avant, FSH après	Age, Taille, W Ana, FC Ana, Vent Ana, Vent Max, Insuline avant, FSH avant, FSH après
Elimination progressive	Age, Taille, W Ana, FC Ana, Vent Ana, Vent Max, $\dot{V}O_2$ Ana, Insuline avant, FSH avant, FSH après	Age, Taille, W Ana, FC Ana, Vent Ana, Vent Max, Insuline avant, FSH avant, FSH après
	Taux d'erreur = 15,52% Taux d'erreur Jacknife = 33,33%	Taux d'erreur = 15,52% Taux d'erreur Jacknife = 34,48%

Note : Moins la différence entre les deux taux d'erreur est élevée et plus valide est le modèle.

Toutes les méthodes de sélection de variables fournissent le même résultat concernant les variables les plus discriminantes suivant le seuil alpha choisi (Tableau 48). Pour un seuil alpha de 10%, on obtient les variables Age, Taille, W Ana, FC Ana, Vent Ana, Vent Max, Insuline avant, FSH avant et après, et pour un seuil alpha de 25%, on retrouve ces mêmes variables avec une variable supplémentaire, la variable $\dot{V}O_2$ Ana. Ce modèle semble être le plus valide, mais dans les deux cas, on retrouve des variables communes à la régression multiple, c'est-à-dire les variables Taille, W Ana, Vent Ana et FC Ana.

Pour la variable W Ana, nous avons ré-encodé de la façon suivante :

1 → 300 W

2 → 350 W

3 → 400 W
 et 4 → 450 W.

Les procédures de sélection de variables disponibles sous SAS ont fourni trois modèles comme le montre le Tableau 49.

Tableau 49 : Sélection de variables pour l'analyse discriminante de W Ana

Méthodes de sélection	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 25%	Seuil alpha pour l'introduction et le retrait à 10%
Pas-à-pas	Age, Poids, PMA, FC Ana, Vent Ana, $\dot{V}O_2$ Max, Insuline avant, Prolactine avant	Age, Poids, PMA, FC Ana, Vent Ana, $\dot{V}O_2$ Max, Prolactine avant
Introduction progressive	Age, Poids, PMA, FC Ana, Vent Ana, $\dot{V}O_2$ Max, Insuline avant, Prolactine avant	Age, Poids, PMA, FC Ana, Vent Ana, $\dot{V}O_2$ Max, Prolactine avant
Elimination progressive	Age, Poids, PMA, FC Ana, Vent Ana, $\dot{V}O_2$ Max, LH après, Insuline avant, Prolactine avant, Cortisol avant, Cortisol après.	Age, Poids, PMA, FC Ana, Vent Ana, $\dot{V}O_2$ Max, Prolactine avant

Note : Pour les modèles en **bleu**, le taux d'erreur est de 17% contre 23,50% pour le taux d'erreur « jacknife », en **vert**, 17,14% contre 21,71% et en **jaune**, 14,29% contre 21,43%.

D'après le Tableau 49, le modèle le plus valide serait celui avec huit variables sachant que dans tous les modèles fournis, on retrouve cinq variables communes au résultat de la régression pour W Ana qui sont les variables Age, $\dot{V}O_2$ Max, PMA, Vent Ana et Prolactine avant.

Chapitre IV – Une modélisation de l'évolution complète du lactate sanguin, cas des cyclistes professionnels

Étudié depuis plus d'un siècle, l'acide lactique est pratiquement devenu le paramètre incontournable lorsque l'on vient à parler de performance physique. Longtemps considéré comme responsable de la fatigue puis comme témoin de celle-ci, il est plus fréquemment utilisé de nos jours pour l'évaluation de l'impact de l'entraînement. Dans le cas de l'exercice musculaire intense, il en résulte une production et une accumulation de lactates et d'ions H^+ . Ce phénomène peut altérer le fonctionnement énergétique du muscle et diminuer sa force de contraction (Wilmore & Costill, 2006). Après avoir été produit, l'organisme ne peut se permettre de maintenir sur place une grande quantité d'acide lactique. Il doit donc en faire quelque chose. L'élimination du lactate est alors assurée par plusieurs mécanismes tels, sa transformation en glucose ou en glycogène (néoglucogenèse) qui concerne 15 à 20 % de sa quantité totale, son oxydation en pyruvate étant la réaction inverse à celle lui donnant naissance qui se fait essentiellement au niveau des muscles et du myocarde pour lesquels elle représente une source importante d'énergie (Freund & Zouloumian 1981, Freund et al. 1986, Brooks 1986), et enfin le reste est excrété principalement par le rein et accessoirement par la sueur.

Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour décrire le système endocrinien comme celui de Danziger et Elmergreen (1957) composé d'un ensemble d'équations différentielles qui décrivent une chaîne de réactions chimiques. Ils ont permis de pouvoir obtenir de nouveaux modèles compartimentés de la cinétique des lactates chez l'homme.

Le modèle de Zerman, Cobelli et Sacca (1990), a fourni une évaluation de quelques variables relatives aux lactates tels que les masses, le dégagement intracellulaire et les flux.

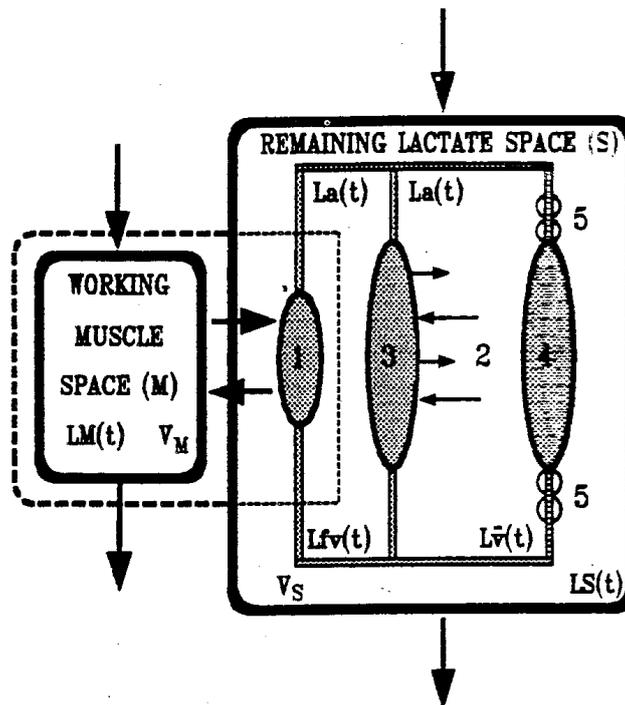
Nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux travaux de Freund et Zouloumian (1981) qui, partant du constat que la variation de la quantité de lactate accumulée dans le sang est la résultante dynamique de la production, de l'utilisation intramusculaire et des échanges, ont suivi la lactatémie après l'exercice jusqu'au retour à des valeurs basales. Ils ont alors modélisé par une formule mathématique biexponentielle l'évolution de la lactatémie après l'exercice quel que soit le type, l'intensité et la durée d'exercice. Cette évolution est composée de deux phases, elle est donc biphasique. Il y a une phase d'élévation et de stagnation et une phase de baisse. Ils ont, au travers d'un modèle bicompartimental ayant l'avantage de pouvoir représenter les échanges de lactate entre les muscles actifs (compartiment M) et le reste de l'espace de distribution (compartiment S), défini l'évolution du lactate artériel par l'équation :

$$L_a(t) = A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t}) + L_a(0)$$

où $L_a(t)$ est la concentration de lactate dans le sang à l'instant t à partir de la fin d'exercice, $L_a(0)$ est la concentration de lactate mesurée à la fin d'exercice, A_1 et A_2 sont les amplitudes de la fonction exponentielle, et γ_1 et γ_2 sont les constantes de vélocité.

La phase d'élévation et de stagnation est représentée par le premier terme de l'équation ($A_1 > 0$), et la phase de baisse par le second terme ($A_2 < 0$).

Ce modèle bicompartimental est représenté par la figure suivante.



Pour l'espace S, l'évolution de la lactatémie lors de la récupération est donnée par l'équation :

$$L_s(t) \equiv L_a(t)$$

Cette évolution est relative à l'une des hypothèses fondamentales de la définition du modèle de Freund & Zouloumian selon laquelle $L_s(t) \approx L_a(t)$.

Alors que pour l'espace M, elle est donnée par :

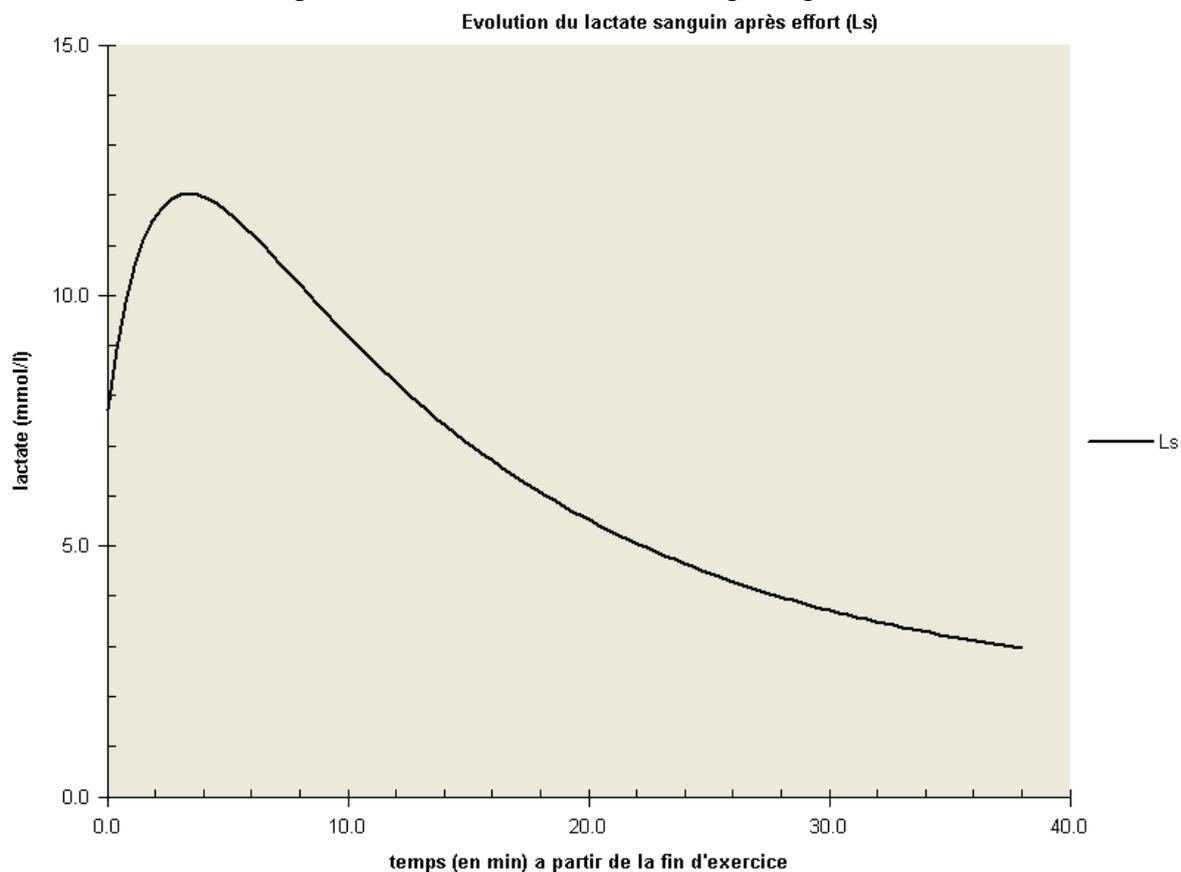
$$L_M(t) = C_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + C_2(1 - e^{-\gamma_2 t}) + L_M(0)$$

où C_1 et C_2 sont les amplitudes des termes exponentiels de $L_M(t)$ et $L_M(0)$ la concentration de lactates dans les muscles actifs au moment de l'arrêt de l'effort.

Avec ce modèle, ils ont fourni un outil permettant d'étudier les facteurs modifiant l'évolution du lactate sanguin (Oyono-Enguelle et al, 1993). Nous avons, à l'aide du logiciel Model

Maker 4 et de l'algorithme de calcul de Zouloumian & Freund, reproduit le comportement du lactate sanguin en utilisant l'application numérique relative au cas d'un exercice incrémental jusqu'au maximum de la capacité du sujet assumant des amplitudes pour les termes exponentielles $A_1 = 9,18 \text{ mmol.l}^{-1}$ et $A_2 = -14,89 \text{ mmol.l}^{-1}$ et des constantes de vélocité $\gamma_1 = 0,509 \text{ min}^{-1}$ et $\gamma_2 = 0,072 \text{ min}^{-1}$ (ces valeurs étant celles obtenues dans l'application de Zouloumian & Freund). Par contre pour $L_s(\infty) = L_a(\infty)$, nous avons choisi la valeur moyenne de la lactatémie relevée chez nos sujets juste avant le début de l'épreuve, c'est-à-dire $2,19 \text{ mmol.l}^{-1}$. Nous avons obtenus la courbe d'évolution de L_s suivante dont l'allure s'accorde avec les résultats de la littérature.

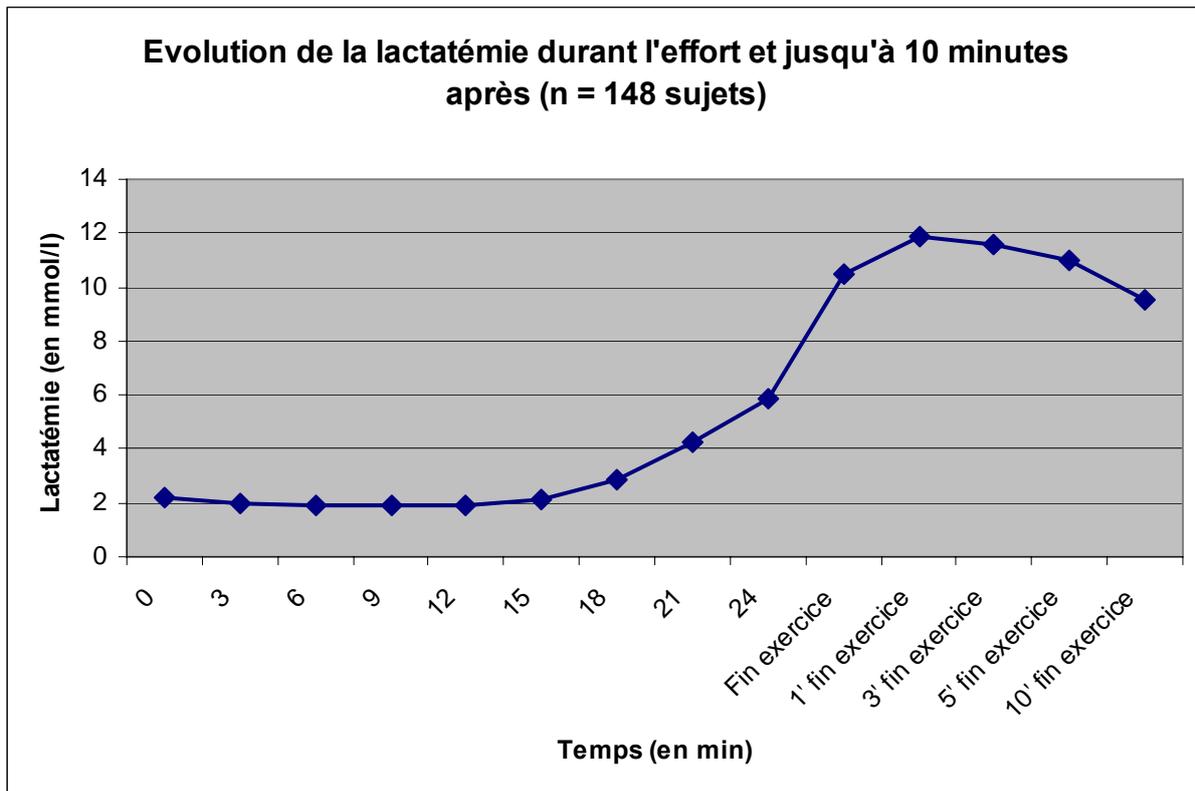
Figure 59 : Evolution du lactate sanguin après l'effort



Nous voulons, à partir des données dont nous disposons, les intégrer sous forme d'une fonction qui permettra de pouvoir obtenir avec Model Maker une modélisation de l'évolution de la lactatémie sanguine pendant toute la durée de l'effort et pendant la phase de récupération. Notre population de cyclistes professionnels comptait cette fois-ci 218 sujets car pour certains d'entre eux, des données manquantes imputées à des problèmes de mesure ont entraîné la suppression de certaines observations. Pour chaque sujet, nous disposons des

valeurs de la lactatémie sanguine à chaque palier jusqu'au dernier palier soutenu suivi d'une mesure dès l'arrêt de l'effort puis de mesures à 1, 3, 5 et 10 minutes après la fin de l'effort. L'évolution moyenne de la lactatémie sanguine durant l'effort est représentée par le graphique suivant (Figure 60).

Figure 60 : Evolution de la lactatémie moyenne de nos sujets (148 sujets)



Etant donné que tous les sujets (218) ne se sont pas arrêtés aux mêmes paliers, nous avons choisi le dernier palier après lequel le maximum de sujets se sont arrêtés et il s'agit du palier de 400W pour un nombre de 148 sujets. Ce palier correspond à la 24^{ème} minute du test d'effort et tous les 148 cyclistes se sont arrêtés après les trois minutes d'effort de ce palier.

En sélectionnant ces données, nous avons tenté avec l'aide du logiciel CurveExpert 1.37 © (par Daniel Hyams) de modéliser la fonction d'évolution de la lactatémie de nos sujets jusqu'à l'arrêt de l'effort. La construction en analyse numérique d'une fonction à partir d'un nombre fini de valeurs est possible grâce à des techniques comme l'interpolation, la régression et le lissage de « données ». L'interpolation consiste à chercher des fonctions « simples » passant par des points donnés $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, c'est-à-dire que l'on cherche une fonction $p(x)$ avec $p(x_i) = y_i$ pour $i=0, 1, \dots, n$. sachant que dans notre cas, les

x_i sont les différents instants où la concentration de lactates a été relevée (en min) et les y_i sont les valeurs de lactates observées (en mmol.l⁻¹) aux instants x_i . On étudie ensuite l'erreur d'interpolation.

Nous distinguons trois types d'interpolation. Tout d'abord l'interpolation linéaire qui est certainement la méthode la plus simple et rapide d'interpolation car la courbe d'interpolation est une succession de segments entre les points mais elle manque de précision. Ensuite nous avons l'interpolation cubique (spline) dans laquelle on obtient une fonction définie par morceaux par des polynômes. Enfin, l'interpolation polynomiale est une technique dans laquelle on cherche un polynôme qui passe par tous les points donnés et de degré le plus bas possible. CurveExpert utilise les techniques de l'interpolation polynomiale et de l'interpolation cubique.

Au niveau de la régression, CurveExpert assure les techniques de régressions linéaires et de régression non linéaires. Pour la régression linéaire, les modèles sont des combinaisons linéaires d'un ensemble de fonctions X_k . Elle est utilisée pour minimiser la différence entre le modèle et les données. La forme générale de ce type de modèle est :

$$Y(x) = \sum a_k X_k(x)$$

où X_k représente les fonctions fixes de x appelées « fonction de base » et a_k les paramètres associés.

Les modèles de régression linéaire disponibles dans CurveExpert sont listés ci-dessous :

Ajustement linéaire : $y = a + bx$

Ajustement quadratique : $y = a + bx + cx^2$

Ajustement polynomiale : $y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots$

Pour la régression non linéaire, CurveExpert utilise l'algorithme de Levenberg-Marquardt (1963) qui au travers de la méthode des moindres carrés cherche le paramètre a , de la fonction $y = y(x ; a^p)$ où la variable dépendante y peut être exprimée en fonction du vecteur de paramètres a de longueur arbitraire p , telle que la différence entre les données et le modèle soit minimale. CurveExpert dispose d'un grand nombre de modèles non-linéaires classés par familles suivant les caractéristiques de leur comportement. Quelques unes sont énumérées ci après :

Famille exponentielle

-exponentielle	$y = a * e^{(b*x)}$
-exponentielle modifiée	$y = a * e^{(b/x)}$
-logarithmique	$y = a + b * \ln(x)$

.....

Famille « puissance »

-ajustement « puissance »	$y = a * x^b$
-ajustement puissance modifiée	$y = a * b^x$
-géométrique	$y = a * x^{(b*x)}$
-géométrique modifiée	$y = a * x^{(b/x)}$

.....

On retrouve également les familles « densité », « croissance », « sigmoïdale » ainsi que la possibilité de définir des fonctions manuellement.

Le logiciel dispose d'un utilitaire permettant de tester tous les modèles et les classes par ordre d'efficacité. Pour chaque modèle fournit, on obtient l'erreur standard d'estimation (**S**) et le coefficient de corrélation (**r**) sachant que le meilleur modèle est celui qui dispose de l'erreur standard la plus proche de 0 et du coefficient de corrélation le plus proche de 1.

Nous avons donc exécuté cette procédure pour trouver une fonction décrivant l'évolution de lactatémie chez nos sujets jusqu'à l'arrêt de l'effort. Les meilleures modélisations obtenues sont présentées dans les figures suivantes (Figure 61 et Figure 62)

Figure 61 : Ajustement de l'évolution de la lactatémie par un modèle polynomial

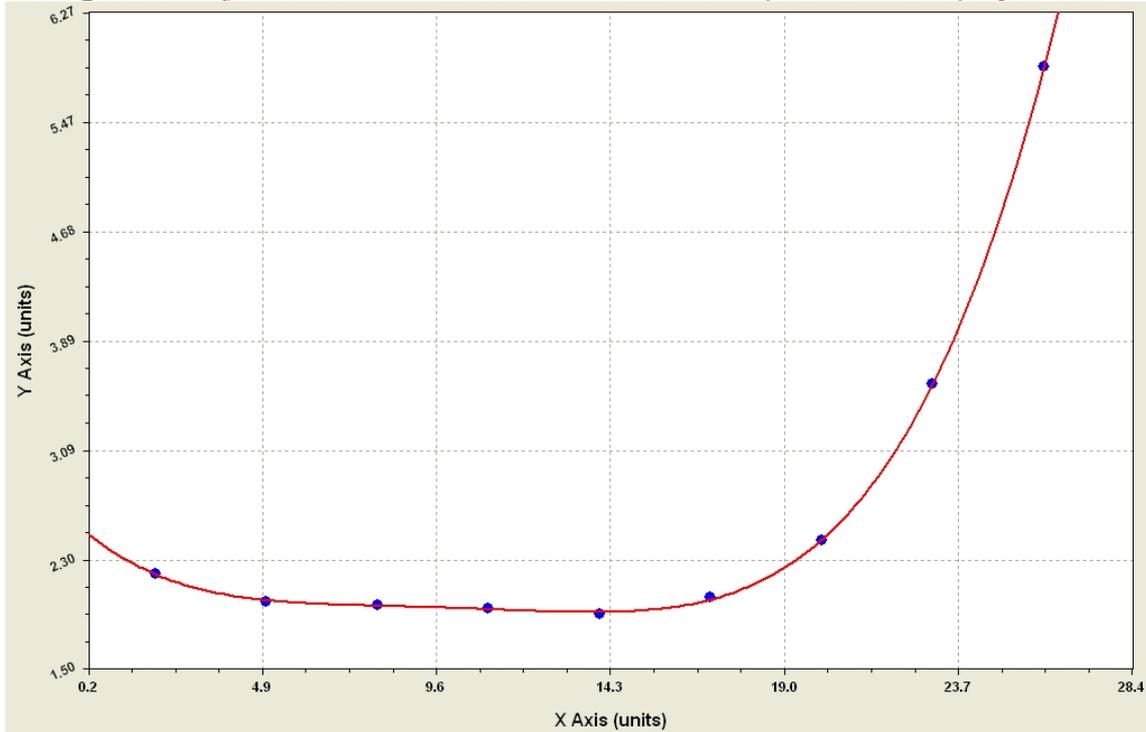
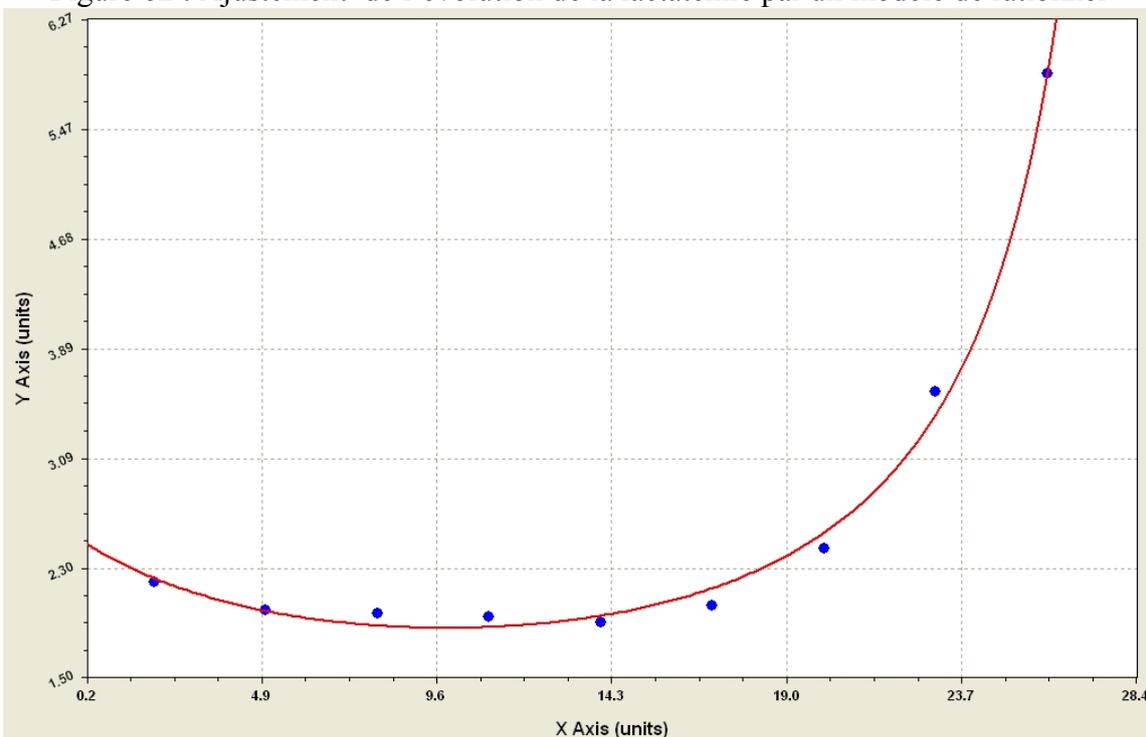


Figure 62 : Ajustement de l'évolution de la lactatémie par un modèle de rationnel



On peut voir sur les figures (Figure 61 et Figure 62), les données moyennes dont nous disposons pour la lactatémie en fonction du temps (représentées par les points de couleur bleu) ainsi que les courbes des modèles obtenus (en rouge) pour modéliser cette évolution.

Nous pouvons dans un premier temps apprécier visuellement le fait que le modèle polynomial de degré 4 semble avoir une meilleure qualité d'ajustement par rapport à nos données.

Le modèle obtenu dans la Figure 61 est un modèle polynomial de degré 4 de la forme :

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$$

avec $a = 2,5195917$, $b = -0,22509525$, $c = 0,03493203$, $d = -0,00243816$, $e = 6,2245388 \times 10^{-5}$.

L'erreur standard de ce modèle est $S = 0,0124$ et son coefficient de corrélation est $r = 0,9999$.

Pour le modèle rationnel (Figure 62), celui-ci est de la forme :

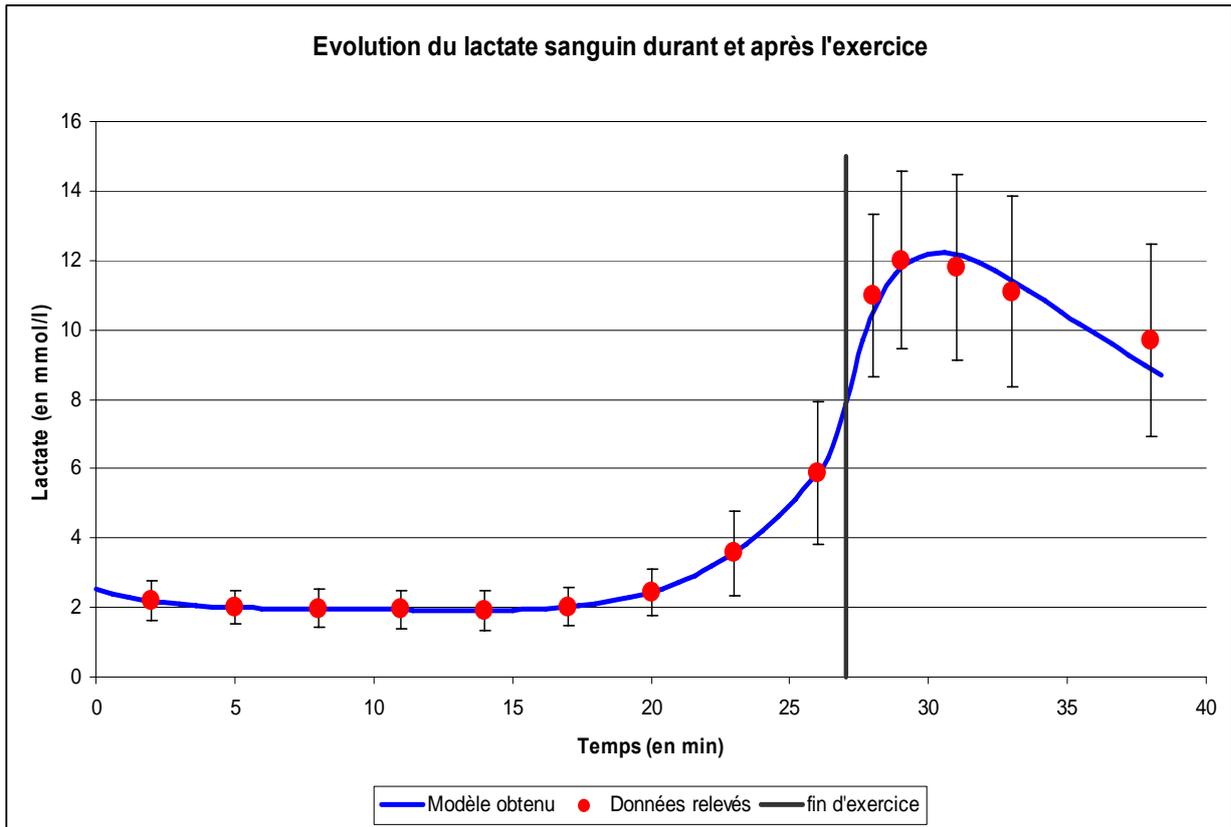
$$y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$$

avec $a=2.5013263$, $b=0,000854178$, $c=0,0702151$, $d=-0,0035467$.

On a obtenu pour ce modèle, $S = 0,1226$ et $r = 0,9972$.

D'après les résultats de cette modélisation, le modèle polynomial est celui qui semble le mieux traduire l'évolution de la lactatémie de notre population de cyclistes professionnels jusqu'à arrêt de l'effort. Nous avons donc adjoint au modèle compartimental réalisé avec Model Maker la fonction $y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ pour traduire l'évolution de Ls avant l'arrêt de l'effort sachant qu'à partir de cet instant c'est le modèle de Freund et al. qui décrit le comportement de Ls. Nous obtenons alors le graphique suivant comportant le modèle relatant l'évolution du lactate sanguin durant l'effort et après ainsi que les données moyennes de lactatémie relevées chez nos sujets à chaque instant et leur écart-type.

Figure 63 : Evolution du lactate sanguin pendant et après l'effort



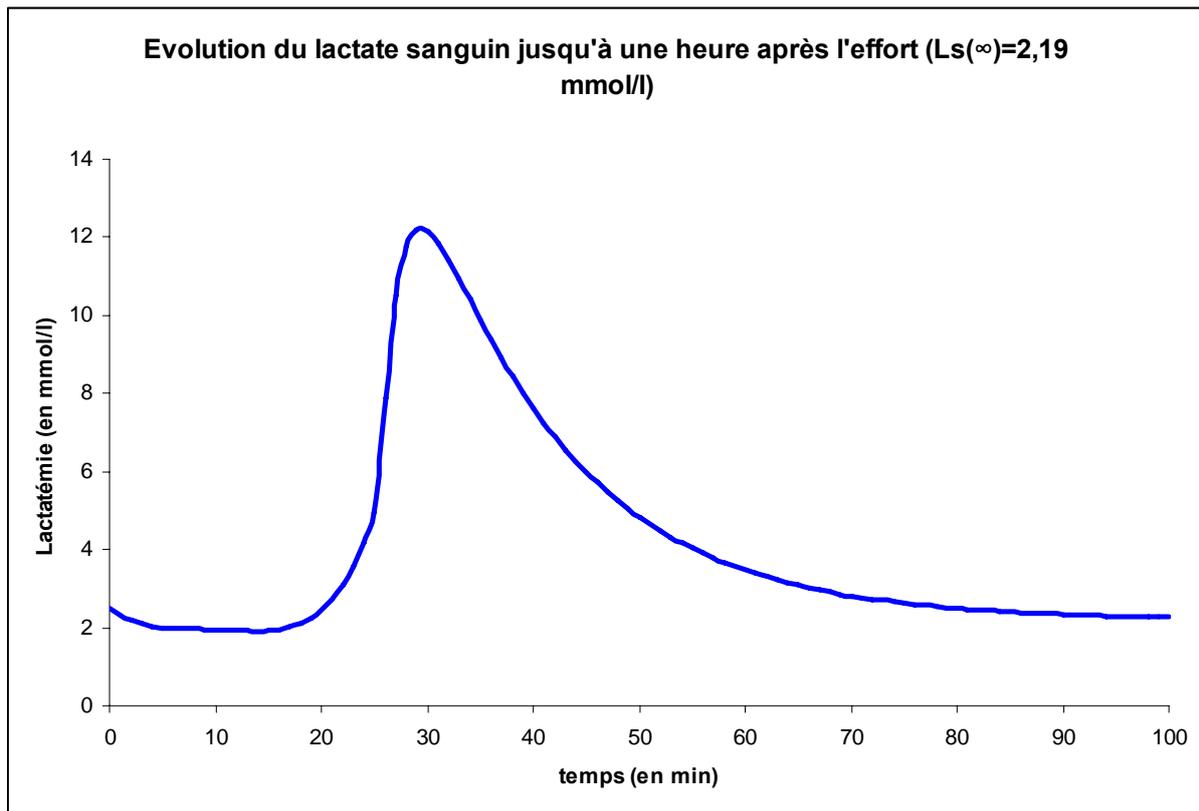
On peut ainsi définir la fonction de l'évolution du lactate sanguin pendant et après un exercice incrémental par palier par deux fonctions définies chacune sur un intervalle avec t_E , le moment de l'arrêt d'exercice en minute :

$$\begin{cases} t \in [0; t_E[\rightarrow L_s(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4 \\ t \in [t_E; \infty[\rightarrow L_s(t) = L_s(t_E) + A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t}) \end{cases}$$

où $L_s(t_E)$ est la concentration de lactate sanguin au moment de l'arrêt de l'effort.

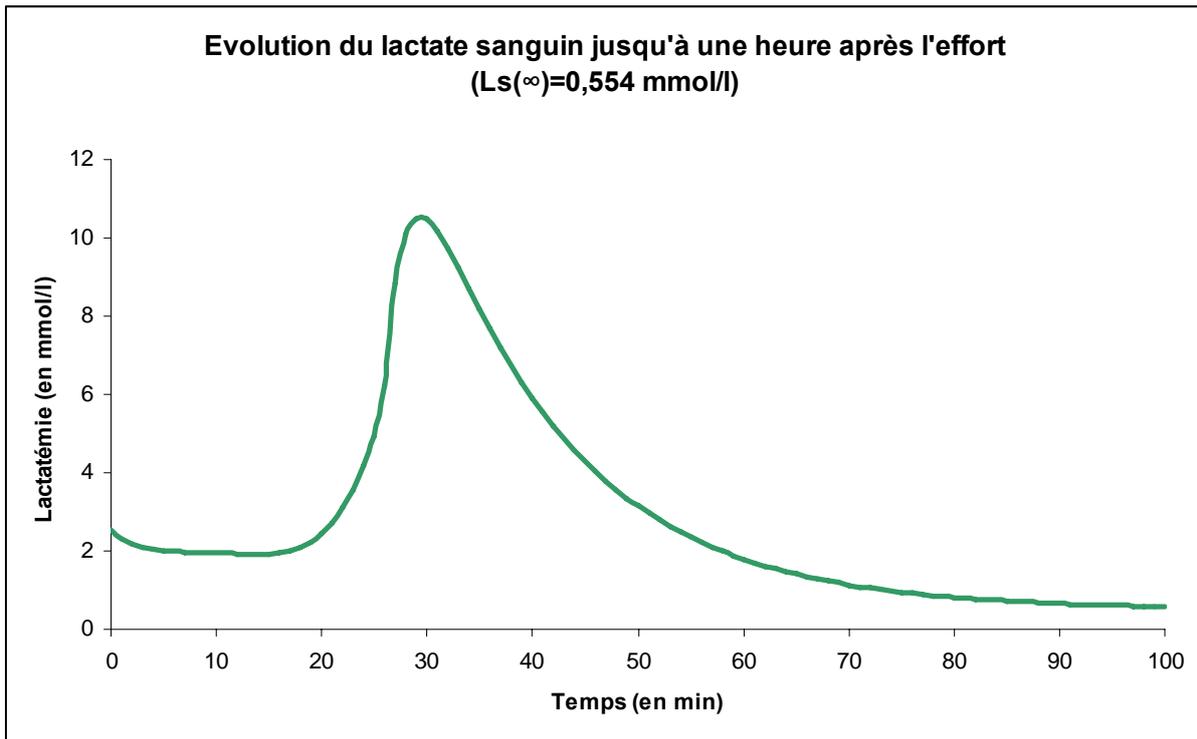
Lorsque nous faisons la simulation à l'aide de notre modèle avec ModelMaker jusqu'à 1 heure après le moment de l'arrêt d'exercice, afin d'avoir un aperçu de l'évolution du lactate sanguin lors de la récupération, on obtient le graphique suivant :

Figure 64 : Simulation de l'évolution du lactate sanguin durant la phase de récupération



Ce graphique montre l'évolution du lactate sanguin avec $L_s(\infty) = 2,19$ mmol/l ce qui correspond à la moyenne obtenue lors du premier prélèvement chez nos sujets. Le terme $L_s(\infty)$ correspond dans le modèle de Freund et al. (1981) à la concentration de lactate sanguin au repos d'où l'utilisation du symbole (∞). Dans les relevés dont nous disposons, nous n'avons la concentration de lactate sanguin qu'à partir du début de l'exercice hors plusieurs auteurs ont montré que celui-ci augmente immédiatement après le début de l'exercice (Wilmore et al. (1994)). De ce fait, pour simuler un retour correct au niveau basal, nous avons repris la valeur de $L_s(\infty)$ de l'application numérique proposée par Freund et Zouloumian correspondant à un niveau basal de lactate sanguin observé dans le cadre de leur étude de l'ordre de 0,554 mmol/l. La simulation obtenue avec ModelMaker nous propose un graphique avec une déflexion plus prononcée correspondant à cette valeur définit en tant que valeur basale observée en moyenne.

Figure 65 : Simulation de l'évolution du lactate sanguin durant la phase de récupération avec un niveau basal de l'ordre de 0,554 mmol/l



On peut donc constater que cette évolution (Figure 65) semble plus correspondre à un retour au niveau basal pour le lactate sanguin à l'issue de ce test incrémental sachant que la valeur de départ de cette courbe correspondant au lactate sanguin enregistré après deux minutes d'exercices.

Chapitre V – Discussion Générale

Dans notre première étude, nous avons décrit deux fonctions discriminantes permettant de différencier une population de 112 cyclistes classés entre la 250^{ème} et la 3000^{ème} place du classement français établi à partir des résultats obtenus lors de la saison 2004. Les fonctions issues de cette étude permettent de discriminer entre trois niveaux :

- National (protocole d'entraînement de quatre séances hebdomadaires pour un volume de 10 à 12 heures)
- Régional (3 séances hebdomadaires pour un total de 10 heures)
- Départemental (5h30 à 6 heures d'entraînement par semaine réparties en 3 séances)

Chaque sujet effectuait un test incrémental jusqu'à épuisement après un échauffement de 10 à 15 minutes sur ergocycle. Les variables recueillies sont anthropométriques (âge, masse corporelle, taille), physiologiques (consommation d'oxygène, rejet de CO₂, fréquence cardiaque, lactatémie), et physiques (vitesse, puissance, développement, cadence). Les procédures de sélection de variables du logiciel SAS[®] (Cary, USA) ont permis d'obtenir une fonction discriminante linéaire au « seuil lactique » (F1) et une fonction discriminante quadratique à la « $\dot{V}O_{2max}$ » (F2) pour discriminer les niveaux. Pour les données au « seuil lactique », nous avons retenu pour chaque cycliste, la valeur la plus proche de 4 mmol.l⁻¹. Il s'agit de la valeur la plus proche du seuil lactique 2 selon la terminologie employée par la société française de Médecine du sport suite à l'étude de Vallier et al. (2000), le seuil lactique 1 étant une première cassure de la cinétique du lactate par rapport à sa valeur de repos et le seuil lactique 2 une seconde rupture beaucoup plus brutale que pour le seuil lactique 1.

Tableau 50 : Variables des fonctions discriminantes et taux d'erreur

Fonctions	Variables	Taux d'erreur
F1	Age, Taille, Lactatémie, Puissance	31,25%
F2	Age, Lactatémie, Consommation maximale d'oxygène, Développement	31,13%

Note : F1 est la fonction discriminante linéaire au « seuil lactique » et F2 la fonction discriminante quadratique obtenu à la « $\dot{V}O_{2max}$ ».

Au « seuil lactique », l'âge, la concentration de lactate, la taille et la puissance permettent d'évaluer le niveau. A la « $\dot{V}O_{2max}$ », l'âge intervient dans la discrimination, associée à la

mesure de la consommation maximale d'oxygène par l'organisme entier, à la concentration de lactate à cet instant ainsi qu'à la cadence de pédalage proposée par le sujet. Leone et al. (1998), lorsqu'ils ont étudié les paramètres anthropométriques et biomoteurs de 93 athlètes masculins provenant de quatre disciplines (tennis, patinage artistique, cyclisme et gymnastique) ont obtenu trois fonctions discriminantes (FD1, FD2 et FD3) permettant de différencier ces athlètes en fonction du sport pratiqué avec les variables qu'ils ont relevées. Ces variables correspondent pour chaque athlète à l'âge, la masse, la taille, les diamètres épicondyliens du coude et du genou, les circonférences du biceps et du mollet, la somme de six plis adipeux, l'amplitude musculoarticulaire mesurée par un test de flexion du tronc, les rapports force-endurance des membres supérieurs et inférieurs mesurés par des épreuves de « pompes » et d'« accroupissements lancés », et puissance aérobie maximale (PAM).

Les coefficients standardisés de chacune des fonctions linéaires discriminantes fournis par SPSS (Statistical Package for Social Science, SPSS Inc, Chicago, USA) leurs ont permis d'obtenir les contributions relatives des diverses variables (Norusis. (1993)) (Tableau 51). Le coefficient standardisé est obtenu en effectuant une transformation centrée réduite pour chaque variable, *i.e* de façon à ce que la moyenne soit égale à 0 et sa variance égale à 1. Notons que plus le coefficient standardisé est élevé (en valeur absolue), plus grande est la contribution de cette variable dans la fonction discriminante afin de différencier les sports

Tableau 51 : Coefficients standardisés pour chacune des trois fonctions discriminantes de Leone et al. (1998)

Variables	Coefficients standardisés		
	FD1	FD2	FD3
Âge (ans)	0,391	-0,248	0,427
Masse (kg)	0,941	-1,594	-2,471
Taille (cm)	0,671	0,990	-1,808
Coude (cm)	0,073	1,288	-0,597
Genou (cm)	-0,064	-0,118	0,821
Biceps (cm)	-1,488	-0,279	-0,110
Mollet (cm)	-0,098	0,100	0,265
∑Plis (mm)	0,756	0,528	0,262
Pompes (nombre)	-0,214	0,781	-0,355
Accroupissements lancés (nombre)	-0,147	-0,073	0,419
Flexion du tronc (cm)	-0,544	0,290	0,189
PAM (mL/kg/min)	0,494	-0,592	-0,463

Note : Coude, Genou : Diamètres épicondyliens du coude et du genou ; Biceps, Mollet : circonférences du biceps et du mollet ; ∑Plis : somme de six plis adipeux (poitrine, abdomen, sous-scapulaire, triceps, supraspinal et mollet) ; PAM : puissance aérobie maximale.

Ensuite, avec les coefficients non standardisés, ils pouvaient calculer directement avec les valeurs des variables relevées, les scores discriminants pour chacun des sujets. Le score obtenu pour chaque fonction discriminante permet d'affecter l'individu à un sport en retenant le score le plus élevé comme critère d'attribution.

Tableau 52 : Coefficients non standardisés pour chacune des trois fonctions discriminantes

Variables	Coefficients non standardisés		
	FD1	FD2	FD3
Âge (ans)	0,027	-0,171	0,295
Masse (kg)	0,087	-0,147	-0,227
Taille (cm)	0,064	0,095	0,174
Coude (cm)	0,163	2,863	-1,328
Genou (cm)	-0,108	-0,197	1,369
Biceps (cm)	-0,489	-0,092	-0,036
Mollet (cm)	-0,036	0,037	0,098
∑Plis (mm)	0,055	0,038	0,019
Pompes (nbre)	-0,016	0,059	-0,027
Accroupissements lancés (nbre)	-0,001	0,000	0,015
Flexion du tronc (cm)	-0,076	-0,040	0,026
PAM (mL/kg/min)	0,106	-0,127	-0,099
Constante	-5,550	-16,746	-22,926

Note : Coude, Genou : Diamètres épicondyliens du coude et du genou ; Biceps, Mollet : circonférences du biceps et du mollet ; ∑Plis : somme de six plis adipeux (poitrine, abdomen, sous-scapulaire, triceps, supraspinal et mollet) ; PAM : puissance aérobie maximale (Leone et al. (1998)).

Enfin, pour savoir à quel sport correspond chaque fonction discriminante, ils avaient utilisé les estimations des valeurs moyennes de groupes (Tableau 53). Pour chaque fonction discriminante, des valeurs moyennes opposées entre groupes indiquent la présence d'une différenciation entre ces derniers. De plus, pour affecter un sujet à un groupe à l'aide de la fonction discriminante ayant le score le plus élevé, on choisit le groupe dont la valeur moyenne est la plus proche de ce score.

Tableau 53 : Estimation des valeurs moyennes des groupes

Sports	FD1	FD2	FD3
Tennis	1,2241	0,9526	-0,1117
Patinage	-0,0430	-0,5167	0,9795
Cyclisme	0,8483	-1,3326	-0,5402
Gymnastique	-3,5176	0,2929	-0,2551

De ce fait, leurs résultats indiquent que les fonctions discriminantes FD2 et FD3 mettent en relief les différences entre les cyclistes et les joueurs de tennis et entre les cyclistes et les patineurs artistiques respectivement alors que la fonction discriminante FD1 reflète les différences entre les gymnastes et les athlètes des trois autres groupes.

Entre les cyclistes et les joueurs de tennis, les variables anthropométriques illustrant le mieux cette différence sont le diamètre épicondylien du coude et la masse des athlètes, et sur le plan biomoteur, la puissance aérobie maximale et la force-endurance des membres supérieurs (évaluée par la réalisation de « pompes »).

Entre les cyclistes et les patineurs artistiques, les variables discriminantes sont la masse, la taille, le diamètre épicondylien du coude et du genou, la puissance aérobie maximale et enfin la force-endurance des membres inférieurs (évaluée par un exercice consistant à enchaîner accroupissement puis saut).

La comparaison des résultats de Leone et al. (1998) avec ceux de notre analyse discriminante signale la présence de deux variables communes aux deux analyses. Il s'agit de la taille et de la puissance (Tableau 54)

Tableau 54 : Variables étudiées et variables discriminantes, comparaison avec l'étude de Leone et al. (1998)

Etude de Leone et al. (1998)	Notre étude
Âge (années)	Âge (années)
● Masse (kg)	Masse (kg)
● Taille (cm)	Taille (cm) ●
● PAM (mL/kg/min)	Puissance (Watts) ●
● Genou (cm)	Vitesse (km/h)
Biceps (cm)	Développement (m) ●
Mollet (cm)	Cadence (rpm)
∑Plis (mm)	VCO ₂ (ml/min)
● Pompes (nbre)	$\dot{V}O_2$ (ml/min) ●
● Accroupissements lancés (nbre)	Fréquence cardiaque (bpm)
Flexion du tronc (cm)	Lactatémie (mmol/l) ●
● Coude (cm)	

Note : Coude, Genou : Diamètres épicondyliens du coude et du genou ; Biceps, Mollet : circonférences du biceps et du mollet ; ∑Plis : somme de six plis adipeux (poitrine, abdomen, sous-scapulaire, triceps, supraspinal et mollet) ; PAM : puissance aérobie maximale (Leone et al. (1998)). ● représente les variables discriminantes dans chaque étude

On retrouve donc deux variables communes entre l'analyse de Leone et al. (1998) et nos résultats qui sont la taille des sujets et la puissance développée par ces derniers. De plus, la puissance aérobie maximale (PAM) de leur étude a été évaluée sur tapis roulant alors que dans notre travail, cette puissance a été obtenue sur ergocycle et est exprimée en watts. La puissance aérobie maximale correspondant à un effort à 100 % de la $\dot{V}O_2$ max, nous pouvons également envisager que la consommation maximale d'oxygène, présente en tant que variable discriminante dans nos résultats, témoigne de la même notion que la puissance aérobie maximale (PAM), facteur discriminant dans le modèle de Leone et al. (1998). Cependant, leur modèle prend en compte pour chaque fonction discriminante toutes les variables y compris celles qui ne semblent pas influencer le choix du groupe d'appartenance, *i.e* celles qui ne semblent pas être des variables discriminantes. Le notre en revanche, à l'aide des procédures de sélection de variables de SAS nous a permis d'obtenir un sous ensemble de variables composé uniquement de celles qui ont un pouvoir discriminant significatif pour les groupes que l'on cherche à étudier. D'ailleurs, le taux de bien classés qu'ils ont obtenu pour l'ensemble de leurs groupes se situe à environ 60 % tandis que dans notre étude, nous avons

63 % de bien classés au « seuil lactique » et 68 % à la « $\dot{V}O_2$ max ». Par contre, la mesure de variables sensiblement similaires à celles de l'étude de Leone et al. (1998) telles que les diamètres épicondyliens du coude et du genou en tant qu'indices de robustesse osseuse ou encore les circonférences du biceps et du mollet comme indices de muscularité pourrait nous permettre d'affiner nos modèles.

Belluye et al. (2001) affirmaient que pour maximiser la performance du cycliste, il fallait une optimisation du réglage complet du cycle permettant un transfert optimal de la force sur la pédale ((Hintzy et al. (1999)). Ils indiquaient également que la hauteur de selle et la longueur des manivelles dépendent de la morphologie du cycliste. Toutefois, Hintzy et al.(2005) attestaient qu'une longueur de manivelles de 16,5 à 17,5 cm (pour les cyclistes ayant des grands membres inférieurs) contre une longueur de 15 cm (pour les cyclistes ayant de petits membres inférieurs) entraîne une amélioration de la puissance maximale développée lors d'un sprint. Ceci, compte tenu principalement d'une meilleure application des forces motrices (Inbar et al. (1983)). De ce fait, la longueur des membres inférieurs semble influencer la puissance maximale développée malgré un réglage potentiellement correct du cycle. Le fait alors de retrouver la taille de notre fonction discriminante au « seuil lactique » semble correspondre à la longueur des membres qui pourrait intervenir dans une approche biomécanique pour affecter la performance.

La présence de la concentration de lactate dans notre fonction discriminante au « seuil lactique », malgré la faible étendue des données relevées (de 3 à 4,8 mmol.l⁻¹), s'explique par le fait que cette variable est statistiquement significative ($p < 0,05$) pour influencer la fonction discriminante (F1). Il se trouve que les procédures de sélection de variables de SAS ne sélectionnent les variables que par rapport à leurs caractères discriminants en s'assurant que le modèle dans sa totalité reste significatif ($p < 0,05$). Ainsi, même si l'étendue d'une variable peut paraître étroite, son étendue ne reflète pas son pouvoir discriminant. Par ailleurs, nous savons que le lactate produit par l'organisme durant l'effort, est réutilisé au cours de l'exercice et oxydé, mais une partie s'accumule dans le sang et/ou les muscles. La lactatémie est le témoin de l'échange entre le lactate musculaire et le lactate sanguin. Du fait, que cette accumulation entraîne, lors d'exercices intenses, une diminution du pH sanguin perturbant la contraction musculaire et le fonctionnement des systèmes énergétiques (Grappe. (2005)), il s'en suit une sensation de fatigue périphérique. Cette sensation est perçue par le cycliste qui peut adopter une cadence de pédalage considérée subjectivement comme moins pénible. Nos

fonctions discriminantes (F1 et F2) intègrent la concentration de lactate sanguin parmi les paramètres participant à la différenciation des groupes. En étudiant 13 cyclistes entraînés masculins, Mattern et al. (2001) avaient constaté qu'après 3 stratégies de départ différentes d'une durée de quatre minutes, les différences de valeurs de lactatémie observées pouvaient avoir réduit la capacité de travail du muscle actif, réduisant ainsi la performance. Ainsi, la présence de la concentration de lactate sanguin dans nos fonctions discriminantes est sans doute le reflet du protocole d'entraînement suivi par chaque athlète (national, régional, et départemental avec des volumes hebdomadaires de 10 à 12h, de 10h, et de 5h30 à 6h respectivement)

La présence de l'âge dans nos fonctions discriminantes semble décrire une certaine maturité de la part du cycliste imputable aux différents niveaux étudiés. On peut penser que l'âge caractérise l'aspect psychologique de la performance sportive. Dans le sens où nous pouvons supposer qu'elle conditionne la volonté du sportif dans la réalisation de l'exercice au delà de ses aptitudes physiques.

A la « $\dot{V}O_2 \text{ max}$ », le développement intervient en tant que variable discriminante. Etant donné qu'il peut être associé à la vitesse de pédalage (Hauswirth et al. (1999)), il traduit une variable relative au déplacement du cycliste. Cette notion de déplacement opère dans la réalisation de la performance et donc dans la différenciation des niveaux puisque dans cette optique, le cycliste doit optimiser son déplacement (Belli et al. (2002)). Le développement semble alors représenter la locomotion dans notre discrimination des niveaux de performance.

La dernière variable à intervenir dans la fonction discriminante au « seuil lactique » est la puissance. Le terme puissance rappelle la performance car on a tendance à dire, pour être le plus performant, il faut être le plus puissant. Toutefois, la présence de la puissance développée par le sujet induit, comme le développement, un aspect biomécanique de l'approche de la performance.

En conclusion, nos modèles décrivent des paramètres anthropométriques, physiques, et physiologiques discriminant les trois niveaux sportifs étudiés. Ces modèles permettent d'affecter au sujet pour lequel on dispose de ces variables, le protocole d'entraînement le plus approprié pour optimiser sa performance, excluant la prise en compte de paramètres issus d'autres domaines d'applications (psychologique, tactique,...) et influençant également la réalisation d'une performance.

Dans notre seconde étude, nous avons obtenu, pour 213 cyclistes professionnels âgés de 23 ± 4 ans, les concentrations de plusieurs hormones avant et après un exercice incrémental par paliers de 50 Watts. Ces hormones sont, la testostérone (fraction libre et totale), l'hormone folliculostimulante (FSH), l'hormone lutéinisante (LH), la prolactine, le cortisol et l'insuline .

Toutes les hormones relevées présentent des différences significatives entre les prélèvements d'avant et après l'exercice ($4,42 \pm 1,48$ ng/ml vs $6,11 \pm 1,92$ ng/ml pour la testostérone totale, $16,57 \pm 6,11$ ng/ml vs $24,36 \pm 8,2$ ng/ml pour la testostérone libre, $2,67 \pm 1,15$ UI/l vs $3,31 \pm 2,08$ UI/l pour la LH, $4,61 \pm 2,07$ UI/l vs $5,9 \pm 2,78$ UI/l pour la FSH, $6,97 \pm 3,94$ mg/l vs $9,41 \pm 5,89$ mg/l pour la prolactine, $23,44 \pm 13,76$ mU/l vs $14,2 \pm 9,33$ mU/l pour l'insuline, et $379,64 \pm 115,87$ nmol/l vs $441,51 \pm 142,99$ nmol/l pour le cortisol, $p < 0,001$). On observe :

- une augmentation de la concentration en réponse à cet exercice incrémental pour la testostérone libre, la testostérone totale, la FSH, la LH, la prolactine et le cortisol
- une diminution consécutive à l'exercice pour l'insuline.

Il faut savoir que dans ce domaine, les résultats des études sont assez contradictoires (Tableau 55).

Tableau 55 : Etudes relatant les réponses hormonales à l'exercice

Auteurs	Sujets Etudiés	Augmentation	Stagnation	Diminution
Vodel et al. (1985)	10 sujets masculins non entraînés (exercice de 45 minutes à 50 % $\dot{V}O_2$ max)	Testostérone libre, Testostérone totale	Prolactine, FSH, LH	---
Urhausen et al. (1998)	17 athlètes surentraînés (exercice bref à 10 % au dessus de la puissance du seuil anaérobie)	ACTH, GH	---	Cortisol, Insuline
Wilmore et al. (1994)	Réponse à l'exercice, sujets non entraînés	GH, TSH, ACTH, Prolactine, Testostérone, Insuline, Cortisol	FSH, LH	---
Bouassida et al. (2004)	12 femmes et 5 hommes physiquement actifs (exercice supra-maximal de 45 secondes à 120 % de PMA)	Cortisol	Leptine, Insuline	---
Notre étude	213 cyclistes professionnels (exercice à puissance constante de 60 minutes)	Testostérone totale, Testostérone libre, LH, FSH, Prolactine, Cortisol	----	Insuline

Vogel et al. (1985) avaient noté en étudiant 10 sujets non entraînés, des augmentations significatives pour la testostérone totale et la testostérone libre pendant les 15 premières minutes d'exercice tandis qu'aucune évolution significative n'était constatée pour la prolactine, la FSH et la LH. Leurs résultats sont similaires à ceux obtenus par Wilmore et al. (1994) pour la FSH, la LH et la testostérone. Nonobstant, pour la prolactine, les résultats sont contraires. De plus, tandis que certains auteurs (Crielaard et al. (1985)) ne trouvaient aucune variation des concentrations de prolactine, d'autres (Mougin et al. (1987) ; Keizer et al. (1987)) obtenaient des augmentations significatives de la prolactine en réponse à l'effort. Bouassida et al. (2004) ont étudié les effets d'un exercice supra-maximal de 45 secondes à

120 % de la puissance maximale aérobie sur les concentrations de leptine, d'insuline et de cortisol. Ils ont effectué ce protocole sur douze femmes et cinq hommes physiquement actifs et ont obtenu une augmentation significative pour le cortisol ($p < 0,05$) mais pas de variations significatives pour la leptine et le cortisol. Cependant, ils ont observé une concentration de leptine significativement supérieure ($p < 0,001$) chez les femmes à l'issue de l'exercice. L'ensemble des études portant sur les réponses hormonales à l'exercice montre qu'elles sont dépendantes de l'entraînement du sujet et de l'exercice pratiqué.

La mise en relation des concentrations hormonales avec les paramètres physiques (âge, Masse Corporelle, taille) et physiologiques (puissance maximale aérobie, ventilation maximale, consommation maximale d'oxygène, fréquence cardiaque maximale, puissance maximale au seuil anaérobie, ventilation anaérobie, consommation d'oxygène anaérobie, et fréquence cardiaque anaérobie) a permis de pouvoir observer pour chaque hormone les influences significatives sur les paramètres relevés chez ces cyclistes professionnels. C'est ainsi que d'après nos résultats, les cyclistes qui présentent les plus petites concentrations de testostérone totale semblent fournir une puissance maximale aérobie supérieure à celle des cyclistes qui ont des concentrations de testostérone dans la norme ou élevées. Ces sujets semblent également présenter les fréquences cardiaques les plus basses et la ventilation maximale la plus faible. On observe les mêmes caractéristiques pour les cyclistes qui ont les concentrations de testostérone libre les plus basses au repos. De plus les sujets qui ont de faibles concentrations de testostérone libre au repos ont également un Masse Corporelle moins élevé que ceux qui ont des concentrations de testostérone libre plus importantes. Les cyclistes avec des concentrations de testostérone libre les plus faibles après l'effort semblent présenter aussi des fréquences cardiaques plus basses et une ventilation maximale plus faible. Pour l'hormone lutéinisante (LH), les sujets avec les plus petites concentrations semblent être les plus âgés alors que pour l'hormone folliculostimulante (FSH), c'est plutôt ceux qui ont des concentrations élevées qui semblent les plus âgés. Les sujets avec les concentrations de FSH les plus élevées sont aussi ceux pour lesquels on remarque les valeurs de consommation d'oxygène les plus fortes alors que pour les concentrations les plus faibles, on voit une ventilation maximale anaérobie plus basse. Pour les concentrations de prolactine, il semble que plus elles sont faibles au repos et plus basses sont la consommation d'oxygène, les fréquences cardiaques et la ventilation observées chez les cyclistes professionnels. Au niveau de l'insuline, les sujets ayant les concentrations les plus faibles au repos semblent être les plus âgés mais présentent les fréquences cardiaques les moins élevées. Ils présentent

également une puissance maximale supérieure à celle des cyclistes avec des concentrations d'insuline plus fortes. Les sujets qui ont les concentrations d'insuline les plus élevées après l'effort sont de taille significativement plus petite que les individus qui ont les concentrations d'insuline les plus élevées avant l'effort. Enfin, les cyclistes avec les concentrations de cortisol les plus basses au repos sont ceux pour lesquels on observe les ventilations les plus élevées et les fréquences cardiaques les plus faibles. Ceux qui ont une concentration de cortisol faible après l'effort ont également une puissance maximale anaérobie plus faible tandis que ceux qui ont une concentration plus forte ont une ventilation maximale plus faible.

Par la suite, nous avons utilisé toutes les variables obtenues pour déterminer des modèles de régressions multiples et ainsi expliquer les puissances observées. A l'aide des procédures de sélection de variables disponibles dans SAS, nous avons obtenu les modèles suivants :

Tableau 56 : Modèles de régression pour la puissance

$$\text{PMA (W)} = 1,67 \text{ Taille (cm)} + 0,7 \text{ W Ana (W)} + 0,57 \text{ Vent Ana (l/min)} - 0,88 \text{ FC Ana (bpm)} - 0,75 \text{ Testo libre avant (ng/ml)}$$

$$\text{W Ana (W)} = 2,21 \text{ Age (années)} + 0,74 \text{ } \dot{V}O_2\text{Max (ml/min/kg)} + 0,43 \text{ PMA (W)} + 0,43 \text{ Vent Ana (l/min)} - 2,66 \text{ LH av effort (UI/l)} + 2,23 \text{ Prolactine av effort (mg/l)}$$

Note : PMA correspond à la puissance maximale aérobie ; W Ana : la puissance maximale au seuil anaérobie ; Vent Ana : la ventilation au seuil anaérobie ; FC Ana : la fréquence cardiaque au seuil anaérobie ; LH av effort : concentration de l'hormone lutéinisante avant l'effort ; Testo libre avant : Concentration de testostérone libre avant l'effort ; Prolactine av effort : Concentration de prolactine avant l'effort.

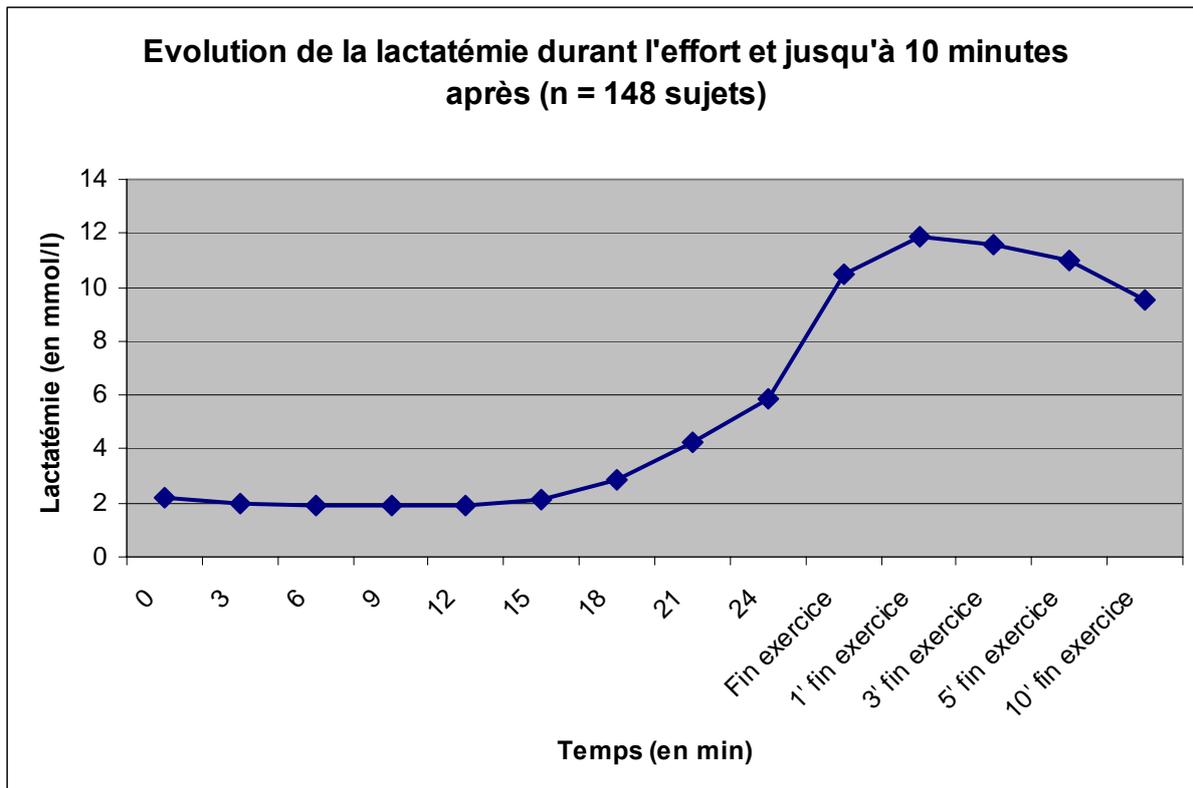
Pour ces modèles, les coefficients de détermination sont respectivement $r^2 = 0,9966$ pour le premier et $r^2 = 0,9968$ pour le second, et ils sont significatifs ($p < 0,001$). Dans chacun de ces modèles, toutes les variables ont chacune une influence significative sur la puissance ($p < 0,05$). Toutes les vérifications des hypothèses concernant la validité de ces modèles ont été vérifiées point par point afin d'obtenir un modèle qui soit le plus efficace et le plus valide possible pour expliquer les variables relatives à la puissance.

On retrouve des paramètres communs à notre première étude comme l'âge, la taille et la consommation maximale d'oxygène. Perrey et al. (2003), en étudiant 12 triathlètes entraînés lors d'un contre la montre de 30 min réalisé en laboratoire, ont obtenu une corrélation étroite ($r^2 = 0,88$) entre la consommation maximale d'oxygène et la puissance (le notre ne décrit pas une relation puissance-consommation d'oxygène mais une relation entre la puissance et toutes les autres variables qui l'influence). Perrey et al. (2003) ont observé également une augmentation et une stabilisation progressive des lactates ainsi qu'une augmentation continue et progressive de la ventilation impliquée dans le maintien de l'équilibre acido-basique. Ces résultats ont été confirmés par Gros Lambert et al. (2004). La ventilation apparaît dans nos modèles de régressions pour décrire cette puissance développée et cela va dans le sens des résultats de Schneider et al. (1997), ayant étudié la relation linéaire entre le débit de dioxyde de carbone et la ventilation, et qui avaient constaté que l'accroissement de ces paramètres favorisait la production d'énergie étant donné que la ventilation est destinée à éliminer le dioxyde de carbone produit en excès à l'exercice. C'est pourquoi son influence se retrouve dans l'explication de la puissance. La réalisation d'une performance, induisant un certain nombre d'adaptations cardiovasculaires qui concernent entre autre la fréquence cardiaque, l'un des facteurs qui conditionnent le débit cardiaque et représente un bon index de l'intensité d'exercice (Wilmore et al. 1994), il paraît alors logique que son effet sur la puissance dans notre modèle de régression soit très significatif ($p < 0,0001$). Nos modèles de régression mettent aussi en évidence trois hormones dans l'explication de la puissance. Il s'agit de la testostérone libre, de l'hormone lutéïnisante, et de la prolactine, toutes trois avant l'effort. Étant donné que la testostérone est une hormone anabolisante, elle stimule les mécanismes de synthèse cellulaire et ainsi est impliquée dans le principe de performance. Il semble alors cohérent de la retrouver parmi les variables explicatives de la performance. De plus, l'hormone lutéïnisante stimule la sécrétion de testostérone par les testicules ce qui lui confère un lien également avec la réalisation de la performance. Pour finir, la prolactine agit aussi sur la sécrétion de testostérone et si sa réponse à l'exercice est source de controverse, elle présente dans notre cas une augmentation significative à l'exercice et sa concentration au repos agit en tant que variable explicative pour définir la puissance.

Du fait de l'importance de la lactatémie dans la réalisation de la performance, nous avons cherché à modéliser son comportement durant et après un effort conduisant à l'épuisement. Nous voulions obtenir une cinétique qui soit propre à une population de cyclistes professionnels.

Ainsi dans cette dernière partie, nous avons étudié l'évolution de la lactatémie chez 218 cyclistes professionnels ayant effectué un test incrémental par palier de 50 W toutes les trois minutes. Nous avons relevé à la deuxième minute de chaque palier la concentration de lactate sanguin de chaque sujet ainsi que la concentration de lactate à la fin de l'épreuve et 1, 3, 5 et 10 minutes après celle-ci. Ce test avait été effectué au laboratoire et la moyenne de la lactatémie obtenue à chaque palier nous fournissait le graphique suivant décrivant l'évolution de cette concentration.

Figure 66 : Evolution de la lactatémie chez des cyclistes professionnels



Etant donné que tous les sujets ne se sont pas arrêtés au même palier, nous avons décidé de sélectionner le palier le plus élevé dans lequel nous disposons du plus grand nombre de sujets et il s'agit de 400 W. 148 cyclistes se sont arrêtés à ce palier et nous avons procédé à l'interpolation des points (à l'aide du logiciel CurveExpert[®]) pour établir un modèle décrivant l'évolution de cette lactatémie durant ce test incrémental que nous avons couplé au modèle de Freund et al. (1981a, b, c, d) afin de décrire toute l'évolution de la lactatémie chez une population de cyclistes professionnels durant un test incrémental par palier de 50 W et pendant la période de récupération qui suit. Nous avons ainsi obtenu un modèle qui se décompose en deux parties, une partie allant du début d'exercice jusqu'à l'arrêt

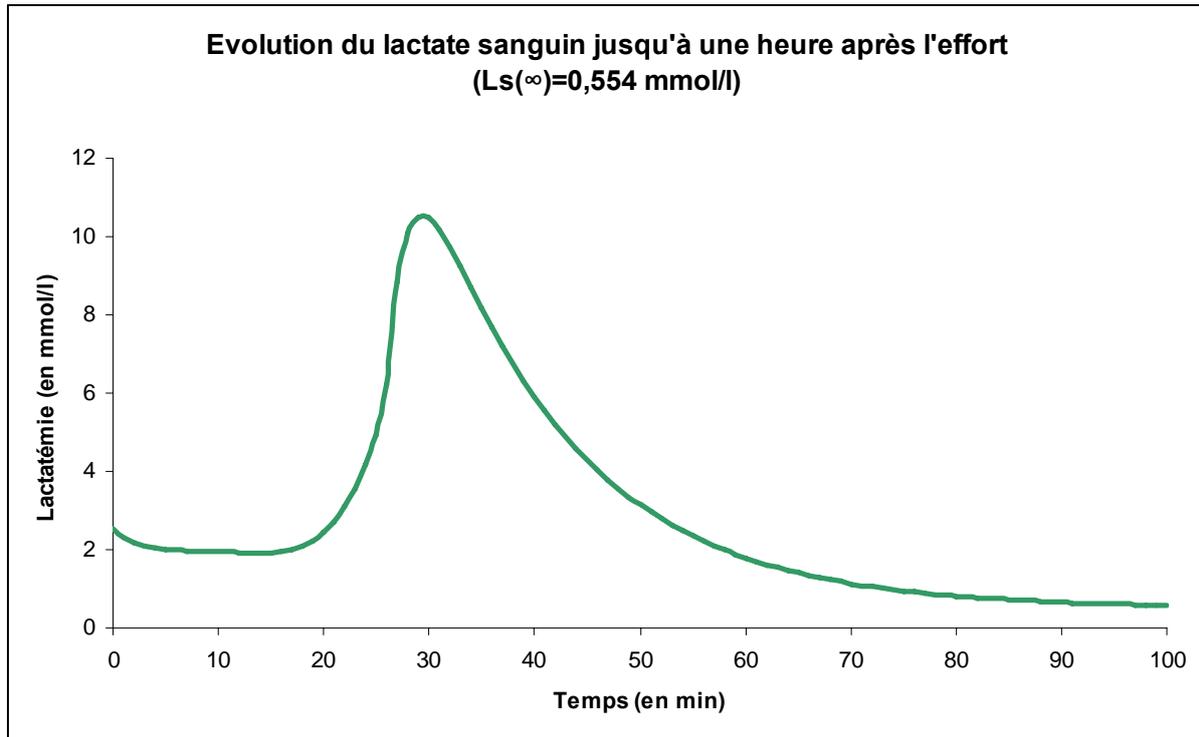
de l'exercice et une partie définissant cette évolution à partir de l'arrêt de l'exercice en utilisant l'approche bicompartimentale de Freund et al. Nous avons couplé ces deux fonctions dans le logiciel Model Maker 4[®]. Le modèle décrivant alors l'évolution de la lactatémie est donc :

$$\begin{cases} t \in [0; t_E[\rightarrow L_s(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4 \\ t \in [t_E; \infty[\rightarrow L_s(t) = L_s(t_E) + A_1(1 - e^{-\gamma_1 t}) + A_2(1 - e^{-\gamma_2 t}) \end{cases}$$

avec t_E , le moment de l'arrêt d'exercice en minute et $L_s(t_E)$ la concentration de lactate sanguin au moment de l'arrêt de l'effort.

Les deux parties de ce modèle décrivent l'évolution du lactate sanguin durant toute la durée de l'effort et pendant la phase de récupération. La première partie traduit l'évolution jusqu'à l'arrêt de l'effort issu de notre interpolation alors que la deuxième équation de ce modèle provient de celui de Freund et al. (1981) et permet de pouvoir simuler le temps nécessaire pour retrouver des valeurs de concentrations basales pour le lactate sanguin. Lors de notre expérimentation, nous avons relevés les valeurs de lactate sanguin durant la récupération jusqu'à 10 minutes après l'arrêt de l'effort. Or, sur le graphique décrivant l'évolution de notre population, on peut constater que la concentration de lactate après 10 minutes de repos est loin d'être revenue au niveau de la concentration observée après deux minutes d'effort et donc en l'occurrence loin de revenir à un niveau basal. Avec le modèle que nous avons obtenu, nous pouvons à l'aide de Modelmaker simuler le comportement de cette concentration dans le temps et ainsi observer son évolution. La simulation de l'évolution de la lactatémie avec environ 1 heure de récupération pour nos cyclistes professionnels est décrite par la Figure 67. Il semble alors qu'après un peu plus de 35 minutes de récupération, on assiste à un retour au niveau basal.

Figure 67 : Modèle avec évolution et retour à une valeur basale de lactatémie pour des cyclistes professionnels



Perspectives

Dans le cadre de notre analyse discriminante, afin d'affiner notre modèle, nous pourrions comme Leone et al. (1998) intégrer des variables plus spécifiques relatives aux cyclistes tels des mesures concernant la longueur des membres inférieurs étant donné qu'il s'agit d'un bras de levier. Ceci pourrait permettre de faire entrer d'avantage de critères identifiés comme influençant le caractère spécifique du sport pratiqué et aussi la performance afin d'être plus précis au niveau de la discrimination. Dresser un portrait psychologique pourrait aussi par la prise en compte de cet aspect permettre l'amélioration du modèle. Cependant, il est difficile de pouvoir envisager l'intégration de certains paramètres comme les conditions météo lorsqu'on effectue les tests en laboratoire. C'est pour cela que l'utilisation de tests de terrain peut également être une voie à envisager pour effectuer une discrimination plus proche des réalités de pratique.

L'utilisation d'analyses discriminantes dans d'autres pratiques sportives serait un moyen de pouvoir effectuer des comparaisons, on pourrait aussi entreprendre le couplage de ces données pour plus de diversification au niveau des résultats (c'est-à-dire explorer d'avantages des différences entre les pratiques). Un travail de discrimination en fonction de sexe permettrait d'explorer également les variables capables d'identifier cette différence. Bouassida et al. (2004) avait obtenu d'ailleurs que la production de leptine était insensible à des sollicitations énergétiques brèves et intenses, mais variait selon la composition corporelle, via des facteurs liés au sexe. Dans cet esprit, il serait intéressant de pouvoir comparer les réponses hormonales à un même type d'exercice que celui de notre protocole pour des athlètes féminines. Il faudrait aussi étudier d'avantages d'hormones afin d'être le plus complet possible.

Pour le modèle compartimental, nous ne disposons que du lactate sanguin dans le cadre de cette étude, pour obtenir un modèle pour complet pour les cyclistes, ne devrions mesurer également la concentration de lactate dans les muscles sollicités. Nous pourrions utiliser l'échange entre compartiment pour être plus précis dans l'évolution de la lactatémie et d'autres substrats de l'organisme durant l'exercice et la période de récupération. Ces associations de variables permettraient d'obtenir des modélisations des phénomènes induits par l'exercice d'autant plus détaillés.

Bibliographie

Amann M, Subudhi A W, Foster C. Predictive validity of ventilatory and lactate thresholds for cycling time trial performance. *Scand J Med Sci Sports* 2006; 16 (1): 27-34.

Atkinson G, Reilly T. Circadian variation in sports performance. *Sports Med* 1996; 21 (4): 292-312.

Barstow T J, Jones A M, Nguyen P H, Casaburi R. Influence of muscle fibre type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 1996; 81 (4): 1642-1650.

Bassett D R, Flohr J, Duey W J, Howley E T, Pein R L. Metabolic responses to drafting during front crawl swimming. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 1991; 23 (6): 744-747.

Beauvillier D. Programmes d'application SAS pour l'analyse des données. SMG Editions, Trois rivières, Québec; 1995

Beaver W L, Wasserman K, Whipp B J. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology* 1986; 60 (6): 2020-2027.

Beelen A, Sargeant A J, Wijkhuizen F. Measurement of directional force and power during human submaximal and maximal isokinetic exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1994; 68(2): 177-181.

Belli A, Hintzy F. Influence of pedalling rate on energy cost of cycling in humans. *Eur J Appl Physiol* 2002; 88 (1-2): 158-162.

Belluye N, Cid M. Approche biomécanique du cyclisme moderne, données de la littérature. *Science & Sports* 2001; 16 (2): 71-87.

Bentley D J, Libicz S, Jouglu A, Coste O, Manetta J, Chamari K, Millet G P. The effects of exercise intensity or drafting during swimming on subsequent cycling performance in triathletes. *J Sci Med Sport* 2007; 10 (4): 234-243.

Bentley D J, McNaughton L R, Thompson D, Vleck V E, Batterham A M. Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 2001; 33 (12): 2077-2081.

Bentley D J, Millet G P, Vleck V E, McNaughton L R. Specific aspects of contemporary triathlon: implications for physiological analysis and performance. *Sports Med* 2002; 32 (6): 345-359.

Bentley D J, Wilson G J, Davie A J, Zhou S. Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 1998; 38 (3): 201-207.

Billat V, Beillot J, Jan J, Rochcongar P, Carré F. Gender effect on the relationship of time limit at 100% $\dot{V}O_2$ max with other bioenergetics characteristics. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 1996; 28 (8): 1049-1055.

Billat V, Bocquet V. Analyse bioénergétique du nouveau record du monde féminin de marathon. *Science & Sports* 1999; 14: 180-2.

Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux J C, Koralsztein J P. Time to exhaustion at 100% of velocity at $\dot{V}O_2$ max and modelling of the time limit/velocity relationship in elite long distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1994; 69 (3): 271-273.

Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux J C, Koralsztein J P. Reproducibility of running time to exhaustion at $\dot{V}O_2$ max in sub-elite runners. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 1994a; 26: 254-257.

Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux J C, Koralsztein J P. Speed and time to exhaustion at $\dot{V}O_2$ max contribution to long distance performance in sub-elite runners. *Science et Motricité* 1995; 27: 40-50.

Billat V L, Richard R, Binsse V M, Koralsztein J P, Haouzi P. The $\dot{V}O_2$ slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue. *Journal of Applied Physiology* 1998; 85 (6): 2118-2124.

Bishop D, Maxwell N S. Effects of active warm up on thermoregulation and intermittent-sprint performance in hot conditions. *J Sci Med Sport* 2007; In press, Corrected proof:

Blondel N, Billat V, Berthoin S. Relation entre le temps limite de course et l'intensité relative de l'exercice, exprimée en fonction de la vitesse critique et de la vitesse maximale. *Science & Sports* 2000; 15: 242-4.

Bocquet V, Billat V. Modèles mathématiques et physiologiques de la performance humaine. *Science & Sports* 1999; 14 (6): 278-291.

Bocquet V, Blondel N, Billat V. Prédiction des records du monde du 200 mètres et du marathon. *Science & Sports* 2000; 15: 264-6.

Bouassida A, Zalleg D, Zaouali M, Gharbi N, Fekith Y, Richalet J P, Tabka Z. Effets d'une exercice supra-maximal sur les concentrations de la leptine plasmatique. *Science & Sports* 2004; 19 (3): 136-138.

Boussana A, Galy O, Matecki S, Hue O, Ramonatxo M, Varray A, Gallais D L. Influence d'un triathlon courte distance sur la performance des muscles respiratoires. *Science & Sports* 2003; 18 (1): 34-36.

Brooks G A. The lactate shuttle during exercise and recovery. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 1986; 18 (3): 360-368.

Brooks G A. Current concepts in lactate exchange. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 23 (8): 895-906.

Brown D A, Kautz S A, Dairighi C A. Muscle activity patterns altered during pedalling at different body orientations. *Journal of Biomechanics* 1996; 29 (10): 1349-1356.

Burnley M, Doust J H, Carter H, Jones A M. Effects of prior exercise and recovery duration on oxygen uptake kinetics during heavy exercise in humans. 2001; 86: 417-425.

Cabrera M E, Chizeck H J. On the existence of a lactate threshold during incremental exercise: a systems engineering approach. J Appl Physiol 1996; 80 (5): 1819-1828.

Cabrera M E, Saidel G M, Kalhan S C. Role of O₂ in regulation of lactate dynamics during hypoxia: mathematical model and analysis. Ann Biomed Eng 1998; 26 (1): 1-27.

Cabrera M E, Saidel G M, Kalhan S C. Lactate metabolism during exercise: analysis by an integrative systems model. Am J Physiol Regulatory Integrative Comp Physiol 1999; 277 (5): 1522-1536.

Cafarelli E, Flint F. The role of massage in preparation for and recovery from exercise. Sports Med 1992; 14 (1): 1-9.

Carnevale T J, Gaesser G A. Effects of pedalling speed on the power-duration relationship for high-intensity exercise. Med Sci Sports Exerc 1991; 23 (2): 242-246.

Cavanagh P R, Sanderson D J. Science of cycling. Champaign Human Kinetics 1996: 91-122.

Cazorla G. Colloque de Mérygnac: Tests de terrain pour déterminer la vitesse aérobie maximale (VAM). Revue de l'AEFA 1992; 123: 18-34.

Chambers J M, Cleveland W S, Kleiner B, Tukey P A. Graphical methods for data analysis. Wadsworth International Group, Belmont, CA; 1983

Chatard J C, Chollet D, Millet G. Performance and drag during drafting swimming in highly trained triathletes. Medicine and Science In Sports and Exercise 1998; 30 (8): 1276-1280.

Cheng B, Kuipers H, Snyder A C, Jeukendrup A, Hesselink M. A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds. Int J Sports Med 1992; 13: 518-522.

Chollet D, Hue O, Auclair F, Millet G, Chatard J C. The effects of drafting on stroking variations during swimming in elite male triathletes. *European Journal of Applied Physiology* 2000; 82 (5-6): 413-417.

Coast J R, Welch H G. Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology* 1985; 53 (4): 339-342.

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

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

Crielaard J M, Reuter A M, Vrindts Y, Franchimont P. Prolactin and muscular exercise, role of the endorphinergic system. *Sports Med* 1985; 59 (6): 314-322.

Dalton B, McNaughton L, Davoren B. Circadian rhythms have no effect on cycling performance. *Int J Sports Med* 1997; 18 (7): 538-542.

Danziger L, Elmergreen G L. Mathematical models for endocrine systems. *Bulletin of Mathematical Biology* 1957; 19 (1): 9-18.

Dariani S, Keshavarz M, Parviz M, Raoufy M R, Gharibzadeh S. Modeling force-velocity relation in skeletal muscle isotonic contraction using an artificial neural network. *Biosystems* 2007; 90 (2): 529-534.

Davis J A, Frank M H, Whipp B J, Wasserman K. Anaerobic threshold alterations caused by endurance training in middle-aged men. *Journal of Applied Physiology* 1979; 46 (6): 1039-1046.

Davis R R, Hull M L. Measurement of pedal loading in bicycling: II. Analysis and results. *J Biomech* 1981; 14 (12): 857-872.

Davison R C, Coleman D, Balmer J, Nunn M, Theakson S, Burrows M, Bird S. Assessment of blood lactate: practical evaluation of the Biosen 5030 lactate analyzer. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 2000; 32 (1): 243-247.

Delextrat A, Bernard T, Vercruyssen F, Hausswirth C, Brisswalter J. Influence des caractéristiques de la natation sur la performance lors d'un enchaînement natation-cyclisme. *Science & Sports* 2003; 18 (4): 188-195.

di Prampero P E, Ferretti G. The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respiration Physiology* 1999; 118 (2-3): 103-115.

di Prampero P E. Cyclling on earth, in space, on the moon. *Eur J Appl Physiol* 2000; 82 (5-6): 345-360.

Eclache J P. La détermination du coût énergétique des activités sportives sur le terrain. *Science & Sports* 1988; 3 (4): 291-301.

Ericson M. On the biomechanics of cycling. A study of joint and muscle load during exercise on the bicycle ergometer. *Scand J Rehabil Med* 1986; 16 (Suppl): 1-43.

Ericson M O. Mechanical muscular power output and work during ergometer cycling at different work loads and speeds. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1988; 57 (4): 382-387.

Ericson M O, Bratt A, Nisell R, Arborelius U P, Ekholm J. Power output and work in different muscle groups during ergometer cycling. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1986; 55 (3): 229-235.

Ericson M O, Nisell R. Efficiency of pedal forces during ergometer cycling. *Int J Sports Med* 1988; 9 (2): 118-122.

Ericson M O, Nisell R, Arborelius U P, Ekholm J. Muscular activity during ergometer cycling. *Scand J Rehabil Med* 1985; 17 (2): 53-61.

Faria E W, Parker D L, Faria I E. The science of cycling : physiology and training - part 1. Sports Medecine 2005; 35 (4): 285-312.

Faria E W, Parker D L, Faria I E. The science of cycling : factors affecting performance - part 2. Sports Medecine 2005; 35 (4): 313-337.

Faria I, Sjojaard G, Bonde-Petersen F. Oxygen cost during different pedalling speeds for constant power output. J Sports Med Phys Fitness 1982; 22 (3): 295-299.

Faria I E. Applied physiology of cycling. Sports Med 1984; 1 (3): 187-204.

Forsyth J J, Reilly T. Circadian rhythms in blood lactate concentration during incremental ergometer rowing. Eur J Appl Physiol 2004; 92 (1-2): 69-74.

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

Fraisse F, Desnus B, Handschuh R, Jousselein E, Strady M, Thomaidis M. La consommation d'oxygène des sportifs de haut niveau de moins de 20 ans. Science & Sports 1991; 6 (1): 25-35.

Francaux M A, Jacqmin P A, Sturbois X G. Simple kinetic model for study of lactate metabolic adaptation to exercise in sportsmen routine evaluation. Arch Int Physiol Biochim Biophys 1989; 97 (3): 235-245.

Freund H, Oyono-Enguelle S, Heitza A, Marbach J, Ott C, Zouloumian P, Lampert E. Work rate-dependent lactate kinetics after exercise in humans. Journal of Applied Physiology 1986; 61: 932-939.

Freund H, Zouloumian P. Lactate after exercise in man : I. Evolution kinetics in arterial blood. European Journal of Applied Physiology 1981; 46 (2): 121-133.

Freund H, Zouloumian P. Lactate after exercise in man : IV. Physiological observations and model predictions. European Journal of Applied Physiology 1981; 46 (2): 161-176.

Fritzsche R G, Switzer T W, Hodgkinson B J, Lee S H, Martin J C, Coyle E F. Water and carbohydrate ingestion during prolonged exercise increase maximal neuromuscular power. *Journal of Applied Physiology* 2000; 88 (2): 730-737.

Fukuba Y. Application of modeling to lactate kinetics in exercise. *Ann Physiol Anthropol* 1990; 9 (2): 203-211.

Fukuba Y, Walsh M L, Cameron B J, Morton R H, Kenny C T C, Banister E W. Lactate modeling and its application to endurance training. *J Therm Biol* 1993; 18 (5-6): 617-622.

Gmada N, Bouhlef E, Mrizak I, Debabi H, Jabrallah M B, Tabka Z, Feki Y, Amri M. Effect of combined active recovery from supramaximal exercise on blood lactate, disappearance in trained and untrained man. *Int J Sports Med* 2005; 26 (10): 874-879.

Gnehm P, Reichenbach S. De l'influence de la position aérodynamique sur le pédalage et le métabolisme des coureurs cyclistes. *Macolin* 1995; 7: 9-11.

Gonzalez H, Hull M L. Multivariate optimization of cycling biomechanics. *Journal of Biomechanics* 1989; 22 (11-12): 1151-1161.

Grappe F. Cyclisme et optimisation de la performance. De Boeck Université, Bruxelles; 2005

Grego F, Vallier J M, Basset F, Brisswalter J. Influence du statut hydrique sur la variation des paramètres physiologiques et biomécaniques lors d'un exercice de pédalage de longue durée. *Science & Sports* 2004; 19 (3): 124-129.

Gregor R J, Broker J P, Ryan M M. The biomechanics of cycling. *Exerc Sport Sci Rev* 1991; 19: 127-168.

Guezennec C Y, Vallier J M, Bigard A X, Durey A. Increase in energy cost of running at the end of a triathlon. *European Journal of Applied Physiology* 1996; 73 (5): 440-445.

Hargreaves M, Dillo P, Angus D, Febbraio M. Effect of fluid ingestion on muscle metabolism during prolonged exercise. *Journal of Applied Physiology* 1996; 80 (1): 363-366.

Hausswirth C, Brisswalter J. Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée : étude des paramètres d'influence. *Science & Sports* 1999; 14 (2): 59-70.

Hausswirth C, Lehenaff D, Dreano P, Savonen K. Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 1999; 31 (4): 599-604.

Hausswirth C, Vallier J M, Lehenaff D, Brisswalter J, Smith D, Millet G, Dreano P. Effect of two drafting modalities in cycling on running performance. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 2001; 33 (3): 485-492.

Hawley J A, Noakes T D. Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology* 1992; 65 (1): 79-83.

Heil D P, Wilcox A R, Quinn C M. Cardiorespiratory responses to seat-tube angle variation during steady-state cycling. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 1995; 27 (5): 730-735.

Hemmings B J. Physiological, psychological and performance effects of massage therapy in sport: a review of the literature. *Phys Ther Sport* 2001; 2 (4): 165-170.

Heugas A M, Nummela A, Amorim M A, Billat V. Multidimensional analysis of metabolism contributions involved in running track tests. *Journal of Science and Medicine in Sport* 2007; 10: 280-287.

Hintzy F, Belli A, Grappe F, Rouillon J D. Effet de l'utilisation de pédales automatiques sur les caractéristiques mécaniques mesurées lors de sprints sur cycloergomètre non isocinétique. *Science & Sports* 1999; 14 (3): 137-144.

Hintzy F, Gros Lambert A, Dugué B, Rouillon J D, Belli A. Does endurance or sprint training influence the perception of the optimal pedalling rate during submaximal cycling exercise? *J Sports Med* 2001; 22 (7): 513-516.

Hoogeveen A R, Schep G. The plasma lactate response to exercise and endurance performance: relationships en elite triathletes. *Int J Sports Med* 1997; 18 (7): 526-530.

Hug F, Bendahan D, Savin B, Cozzone P, Grélot L. Caractéristiques physiques et physiologiques de cyclistes professionnels. *Science & Sports* 2003; 18: 212-215.

Hull M L, Jorge M. A method fo biomechanical analysis of bicycle pedalling. *J Biomech* 1985; 18 (9): 631-644.

Katz A, Sahlin K. Role of oxygen in regulation of glycolysis and lactate production in human skeletal muscle. *Exerc Sport Sci Rev* 1990; 18: 1-28.

Keizer H A, Kuipers H, Haan J d, Janssen G M, beckers E, Habets L. Effect of a 3 month endurance training program on metabolic and multiple hormonal responses to exercise. *Int J Sports Med* 1987; 8 (Suppl 3): 154-160.

Klecka W R. Discriminant analysis. Sage Publications Inc, Beverly Hills, USA; 1980

Koppo K, Bouckaert J. The Effect of Prior High-Intensity Cycling Exercise on the $\dot{V}O_2$ Kinetics During High-Intensity Cycling Exercise is Situated at the Additional Slow Component. *Int J Sports Med* 2001; 22 (1): 21-26.

Koppo K, Bouckaert J. The Decrease in the $\dot{V}O_2$ Slow Component Induced by Prior Exercise Does Not Affect the Time to Exhaustion. *International Journal of Sports Medicine* 2002; 23 (4): 262-267.

Kreider R B, Boone T, Thompson W R, Burkes S, Cortes C W. Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 1988; 20 (4): 385-390.

Kruskal W H, Wallis W A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 1952; 47 (260): 583-621.

Lacour J R. Biologie de l'exercice musculaire. Masson, Paris; 1993

Laiche R, Toraa M, Friemel F. Evaluation de $\dot{V}O_2$ max et de VMA, en laboratoire et sur le terrain. *Science & Sports* 1995; 11 (2): 91-95.

Leone M, Larivière G. Caractéristiques anthropométriques et biomotrices d'adolescents athlètes élités de disciplines sportives différentes. *Science & Sports* 1998; 13 (1): 26-33.

Lepers R, Bigard A X, Hausswirth C, Guezennec C Y. Modélisation de l'enchaînement natation-cyclisme d'un triathlon en laboratoire. Influence sur la cinétique de la lactatémie. *Science & Sports* 1995; 10 (3): 131-139.

Lippi L, Montagnana M, Salvagno G L, Franchini M, Guidi G C. Glycaemic control in athletes. *Int J Sports Med* 2008; 29 (1): 7-10.

Longworth J. Psychophysiological effects of slow stroke back massage in normotensive females. *Adv Nurs Sci* 1982; 4 (4): 44-61.

Looney S W. How to use tests for univariate normality to assess multivariate normality. *The American Statistician* 1995; 49 (1): 64-70.

Lucia A, Hoyos J, Chicharro J L. Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33 (8): 1361-1366.

Lucia A, Pardo J, Durantez A, Hoyos J, Chicharro J L. Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med* 1998; 19 (5): 342-348.

Mandengue S H, Miladi I, Bishop D, Temfemo A, Cisse F, Ahmaidi S. Approche méthodologique pour la détermination d'une intensité optimale d'échauffement : équations prédictives. *Science & Sports* 2008; Article In press, Corrected proof:

Marles A, Mucci P, Legrand R, Betbeder D, Prieur F. Effect of prior exercise on the $\dot{V}O_2$ /Work rate relationship during incremental exercise and constant work rate exercise. *Int J Sports Med* 2006; 27 (1): 345-350.

Martin J C, Milliken D L, Cobb J E, McFadden K L, Coggan A R. Validation of a mathematical model for road cycling power. *Journal of Applied Biomechanics* 1998; 14 (3): 276-291.

Mattern C O, Kenefick R W, Kertzer R, Quinn T J. Impact of strategy on cycling performance. *Int J Sports Med* 2001; 22 (5): 350-355.

Messonier L, Freund H, Denis C, Féasson L, Lacour J R. Effects of training on lactate kinetics parameters and their influence on short high-intensity exercise performance. *Int J Sports Med* 2006; 27 (1): 60-66.

Millet G P, Bentley D J. The physiological responses to running after cycling in elite junior and senior triathletes. *Int J Sports Med* 2004; 25 (3): 191-197.

Morison D F. *Multivariate statistical methods*, second edition. McGraw-Hill Book Co., New York, USA; 1976.

Moseley L, Achten J, Martin J C, Jeukendrup A E. No differences in cycling efficiency between world-class and recreational cyclists. *Int J Sports Med* 2004; 25 (5): 374-379.

Mougin F, Henriot M T, Baulay A, Haton D, Berthelay S, Gaillard R C. Plasma levels of beta endorphin, prolactin and gonadotropins in male athletes after an international nordic ski race. *Eur J Appl Physiol* 1988; 57 (4): 425-429.

Olds T, Norton K I, Lowe E L, Olive S, Reay F, Ly S. Modelling road-cycling performance. *Journal of Applied Physiology* 1995; 78 (4): 1596-1611.

Oyono-Enguelle S, Freund H, Lampert E, Lonsdorfer A, Lonsdorfer J. Modeling lactate kinetics during recovery from muscular exercise in humans. 1. Influence of some physiological factors. *Science & Sports* 1993; 8 (3): 181-187.

Oyono-Enguelle S, Freund H, Lampert E, Lonsdorfer J. Lactate et activité physique. *Revue française des laboratoires* 1998; 302: 149-153.

Paccotti P, Minetto M, Terzolo M, Ventura M, Ganzit G P, Borrione P, Termine A, Angeli A. Effects of high-Intensity isokinetic exercise on salivary cortisol in athletes with different training schedules: Relationships to serum cortisol and lactate. *Int J Sports Med* 2005; 26 (9): 747-755.

Pandolf K B, Stroschein L A, Drolet L L, Gonzalez R R, Sawka M N. Prediction modeling of physiological responses and human performance in the heat. *Comput Biol Med* 1986; 16 (5): 319-329.

Patterson R, Moreno M. Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *Med Sci Sports Exerc* 1990; 22 (4): 512-516.

Plato P A, McNulty M, Crunk S M, Ergun A T. Predicting lactate threshold using ventilatory threshold. *Int J Sports Med* 2008; 29 (9): 732-737.

Roecker K, Striegel H, Dickhuth H H. Heart-rate recommendations: transfert between running and cycling exercise? *Int J Sports Med* 2003; 24 (3): 173-178.

Royston J P. An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. *Applied Statistics* 1982; 31 (2): 115-124.

Rundell K W. Effects of drafting during short-track speed skating. *Medicine and Science In Sports and Exercise* 1996; 28 (6): 765-771.

Russell R D, Redmann S M, Ravussin E, Hunter G R, Larson-Meyer D E. Reproducibility of endurance performance on a treadmill using a preloaded time trial. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 2003: 717-724.

Saporta G. Probabilités, analyse de données et statistiques. Editions Technip, Paris, France; 1990

SAS.Institute.Inc. SAS Procedure Guide, version 8. SAS Institute Inc, Cary, NC; 1999

Schneider D A, Berwick J P. VE and VCO₂ remain tightly coupled during incremental cycling performed after a bout of high-intensity exercise. *European Journal of Applied Physiology* 1997; 77 (1): 72-76.

Seabury J J, Adams W C, Ramey M R. Influence of pedalling rate and power output on energy expenditure during bicycle ergometry. *Ergonomics* 1977; 20 (5): 491-498.

Shapiro S S, Wilk M B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 1965; 52 (3/4): 591-611.

Shapiro S S, Wilk M B, Chen H J. A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American Statistical Association* 1968; 63 (324): 1343-1372.

Soudain-Pineau M, Romeur J P, Kispeter Z, Medelli J, Joly P. Analyse de variables permettant la détermination du niveau d'un cycliste. *Science & Sports* 2007; 22 (5): 243-245.

Stringer W, Casburi R, Wasserman K. Acid-base regulation during exercise and recovery in humans. *Journal of Applied Physiology* 1992; 72 (3): 954-961.

Suriano R, Vercruyssen F, Bishop D, Brisswalter J. Variable power output during cycling improves subsequent treadmill run time to exhaustion. *J Sci Med Sport* 2007; 10 (4): 244-251.

Tabachnick B G. SAS for windows workbook for Tabachnick and Fidell Using Multivariate Statistics, 4th edition. Allyn & Bacon, Massachusetts, USA; 2001

Takaishi T, Yamamoto T, Ono T, Ito T, Motitani T. Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30 (3): 442-449.

Tardieu J, Albertini J J, Dicostanzo J, Gauthier J, Gardette B, Lemaire M, Vanuxem P. Les effets d'une exposition répétée à l'oxygène hyperbare (OHB) sur la performance physique du sportif. *Science & Sports* 2004; 19 (6): 301-307.

Too D. Biomechanics of cycling and factors affecting performance. *Sports Med* 1990; 10 (5): 286-302.

Tyurin A. The influence of different forms of massage on the psycho-emotional states of athletes. *Soviet Sports Review* 1986; 21: 126-127.

Urhausen A, Gabriel H H W, Kindermann W. Impaired pituitary hormonal response to exhaustive exercise in overtrained endurance athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30 (3): 407-414.

Vink J M, Vink J M, Groot A S, Kerkhof G A, Boomsma I. Genetic analysis of morningness and eveningness. *Chronobiology International* 2001; 18 (5): 809-822.

Vogel R B, Brooks C A, Ketchum C, Zauner C W, Murray F T. Increase of free and total testosterone during submaximal exercise in normal studies. *Med Sci Sports Exerc* 1985; 17 (1): 119-123.

Watson G, Swensen T. Effects of altering pedal cadence on cycling time-trial performance. *Int J Sports Med* 2006; 27 (4): 296-300.

Weineck J. *Manuel d'entraînement*. Vigot, Paris; 1996

Wheeler G D, Wall S R, Belcastro A N, Cumming D C. Reduced serum testosterone and prolactin levels in male distance runners. *JAMA* 1984; 252 (4): 514-516.

Whipp B J, Ward S A. Determinants and control of breathing during muscular exercise. *Br J Sports Med* 1998; 32 (3): 199-211.

Whyte G, Lumley S, George K, Gates P, Sharma S, Prasad K, McKenna W J. Physiological profile and predictors of cycling performance in ultra-endurance triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 2000; 40 (2): 103-109.

Wilmore J H, Costill D L. *Physiologie du sport et de l'exercice*, 3ième édition. De Boeck Université, Bruxelles; 2006

Yoshihuku Y, Herzog W. Optimal design parameters of bicycle-rider system for maximal muscle power output. *J Biomech* 1990; 23 (10): 1069-1079.

Yoshihuku Y, Herzog W. Maximal muscle power output in cycling: a modelling approach. *J Sports Sci* 1996; 14 (2): 139-157.

Zatsiorski V M. Les qualités physiques du sportif. Document INSEP n°685, Paris; 1966

Zerman A, Cobelli C, Sacca L. A compartmental model of lactate kinetics in humans: role of sites of tracer administration and sampling. *Engineering in Medicine and biology society, Proceedings of the Twelfth Annual International Conference of the IEEE* 1990: 959-960.

Zoladz J A, Rademaker A C, Sargeant A J. Human muscle power generating capability during cycling at different pedalling rates. *Experimental Physiology* 2000; 85 (1): 117-124.

Zouloumian P, Freund H. Lactate after exercise in man : III. Properties of the compartmental model. *European Journal of Applied Physiology* 1981; 46 (2): 149-160.

Zouloumian P, Freund H. Lactate after exercise in man : II. Mathematical Model. *European Journal of Applied Physiology* 1981; 46 (2): 135-147.

Annexes

Annexe 1

Pour qu'un coefficient de régression multiple, par exemple, soit significatif, F calculé doit dépasser F lu dans la table pour le risque d'erreur de 5 % (le seul donné ici); deux catégories de degrés de liberté déterminent F :

- v_1 : nombre de degrés de liberté pour la plus faible des deux variances;
- v_2 : nombre de degrés de liberté pour la plus forte des deux variances.

Pour $\alpha = 0,05$:

$v_1 \rightarrow$										
$v_2 \downarrow$	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	238,9	243,9	249,0	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,41	19,45	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,74	8,64	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,77	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,53	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,84	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,41	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,12	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,23	3,07	2,90	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,74	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	2,95	2,79	2,61	2,40
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,50	2,30
13	4,67	3,80	3,41	3,18	3,02	2,92	2,77	2,60	2,42	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,53	2,35	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,48	2,29	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,24	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,55	2,38	2,19	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,15	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,48	2,31	2,11	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,08	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,42	2,25	2,05	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,40	2,23	2,03	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,38	2,20	2,00	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,18	1,98	1,73
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49	2,34	2,16	1,96	1,71
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,32	2,15	1,95	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,30	2,13	1,93	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,44	2,29	2,12	1,91	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,54	2,43	2,28	2,10	1,90	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,89	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,00	1,79	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,52	2,37	2,25	2,10	1,92	1,70	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,01	1,83	1,61	1,25
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	1,94	1,75	1,52	1,00

Exemple de lecture

Pour $v_1 = 5$, $v_2 = 20$, F calculé doit être supérieur à 2,71 pour que le coefficient de régression soit jugé significatif, avec un risque d'erreur de 5 %.

Annexe 2

Le Cardiopulmonary Exercise CPX/D System de MedGraphics

La consommation d'oxygène et le rejet de CO₂ ont été analysés chez les cyclistes amateurs grâce au Cardiopulmonary Exercise CPX/D System de MedGraphics™ (Medical Graphics Corporation, Minnesota, U.S.A). Il est constitué :

- d'un système d'acquisition et de capteurs rapides de gaz (O₂ et CO₂),
- d'un pneumotachographe léger (Figure 68).



Figure 68 : Image du pneumotachographe MedGraphics™ Cardiopulmonary Exercise CPX/D system

1. Le fonctionnement

L'air est collecté par l'intermédiaire d'un masque facial (Figure 69) et passe dans le pneumotachographe (Figure 68) où sont situés les capteurs de pression différentielle. Le pneumotachographe est relié au masque, lui-même relié au Medgraphics™ Cardiopulmonary Exercise CPX/D System, afin d'analyser la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$, en ml.min⁻¹) et la production de dioxyde de carbone ($\dot{V}CO_2$, en ml.min⁻¹). Le temps de latence est de 0,42 secondes pour l'O₂ et de 0,44 secondes pour le CO₂ entraînant une erreur de 12,1 % pour l'O₂ contre 6,95 % pour le CO₂.



Figure 69 : Masque facial pour le pneumotachographe

2. Le pneumotachographe

Le pneumotachographe pour MedGraphics™ CPX/D System comprend un dispositif d'interruption du débit aérien. Le module de débit comprend deux capteurs de pression afin d'observer la résolution aux bas débits, tout en permettant une mesure des débits importants. Le principe de mesure du MedGraphics™ comporte la mesure de la pression contre une paroi, soit :

$$D^2 = k \times P$$

Avec D : débit (en litre par seconde, L/s), k : constante dépendante de l'équipement et de la densité des gaz, P : pression différentielle (en Pascal, Pa).

Ce système n'est pas affecté par la condensation car il est chauffé par une alimentation indépendante afin d'éliminer l'humidité de l'air expiré. Les turbulences, la viscosité des gaz, ou encore la position ne perturbent pas le système permettant la mesure de débit turbulent. Le dispositif est constitué d'un tube remplaçable (Figure 70) dont la conception permet un gain de temps et élimine les problèmes liés à des appareils plus complexes sachant qu'un remplacement facile implique l'assurance du contrôle des infections après chaque test.



Figure 70 : Tube de pneumotachographe

L'embout buccale du pneumotachographe (Figure 71), relié au masque est changé à chaque effort, puis désinfecté.



Figure 71 : Embout buccale

Les gammes de mesure vont de $\pm 0,02$ à 18 l.min^{-1} , la résolution est de $\pm 10 \text{ ml.sec}^{-1}$, la précision est de $\pm 50 \text{ ml}$ ou 2% de la mesure. Le diamètre est de 35 mm , la longueur de 726 mm , pour un poids de 24 g . L'espace mort, qui correspond au volume d'air contenu dans le tube qui ne participe pas aux échanges gazeux est inférieur à 40 ml et la résistance est de $0,84 \text{ cmH}_2\text{O.l.sec}^{-1}$ à $12 \text{ cmH}_2\text{O.l.sec}^{-1}$. L'étude des échanges gazeux nécessite l'acquisition de trois paramètres principaux : le débit (ou le volume (en litre par seconde, L/s)), les fractions de CO_2 et les fractions d' O_2 .

3. Les capteurs du pneumotachographe

Les capteurs MedGraphics™ sont des capteurs cinétiques. Ils permettent de mesurer la vitesse des gaz. On mesure la pression des gaz heurtant la paroi formée par un T. Cette pression est proportionnelle au carré de la vitesse. Pour ce type de matériel on obtient une mauvaise résolution pour les bas débits, d'où la mise en parallèle de deux capteurs, ce qui améliore la résolution aux bas débits. La linéarité obtenue est d'environ 2% dans la gamme de 0 à 20 l.sec^{-1} .

5. Les analyseurs

Il existe des analyseurs de CO_2 basés sur le principe de l'absorption du rayonnement infra rouge par ce gaz. La mesure est optique et le temps de réponse dépend du système de prélèvement, de la taille et de la position de la chambre de mesure. Les temps de réponse de 0 à 90% vont de 80 à 90 msec . Sa gamme de mesure est de 0 à 10% CO_2 . La précision est de $\pm 0,05 \%$, pour un temps de réponse de 0 à 90% inférieur à 110 msec et un temps de chauffe de 30 min .

L'analyseur d' O_2 est un analyseur à cellule zirconium. Il utilise la mesure de la force électromotrice FEM entre un élément de zirconium chauffé à $700 \text{ }^\circ\text{C}$ situé dans le gaz à

analyser et un élément analogue situé dans un gaz de référence. Il s'agit d'une mesure différentielle. Sa gamme de mesure est de 0 à 100 % O₂. La précision est de ± 0,03 %, pour un temps de réponse de 0 à 90 % inférieur à 80 msec et un temps de chauffe de 30 min.

6. Circuit de prélèvement

Le circuit se base sur un capillaire séchant ou non séchant de diamètre inférieur ou égal à 0,7 mm et d'une longueur de 2,5 m. Le dispositif de régulation de vide permet de conserver une pression constante dans le circuit. Le débit de prélèvement est entre 60 et 80 ml.min⁻¹. Il est fonction de la longueur du capillaire.

7. Calibration

La calibration se réalise entre deux points pour chaque analyseur, par l'intermédiaire d'un gaz étalon. Ce gaz étalon est présenté aux capteurs grâce à une seringue.

8. Technique de calcul

Il s'agit d'un système cycle par cycle. Le calcul de la consommation d'oxygène et du rejet de CO₂ se fait par intégration, des signaux O₂ et CO₂ en fonction du débit, en temps réel et sur un cycle respiratoire. Ce système analyse les fractions inspirées d'oxygène (FiO₂) et de dioxyde de carbone (FiCO₂) ainsi que les valeurs des plateaux. Ceci permet une mesure dans toutes les conditions de pression d'O₂. Néanmoins, il existe une limite liée aux analyseurs dont le temps de réponse ne doit pas excéder 110 msec.

Pour le MedGraphics™ le calcul se fait grâce à une carte interface Wave Form Analyser Medgraphics™ pilotée par un micro-ordinateur. La fréquence d'échantillonnage est de 200 Hz. La liaison est de type RS232. Le calcul de la moyenne est réalisé sur des périodes de 0 seconde à plusieurs minutes et 8 cycles respiratoires sont moyennés.

Annexe 3

Tableau 57 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode de sélection pas à pas pour la variable PMA.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-66,57	0,3103*
Taille	2,02	<0,0001
W Ana	0,69	<0,0001
Vent Ana	0,57	0,0017
FC Ana	-0,83	<0,0001
Testostérone libre avant effort	-0,80	0,0363
$R^2=0,7125$ $p<0,0001$ $Cp=9,39$		

Note : *Ce paramètre n'est pas significatif ($p>0,05$).

Tableau 58 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode d'introduction progressive pour la variable PMA.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-36,98	0,6215*
Poids	0,58	0,4132*
Taille	1,61	0,0152
W Ana	0,68	<0,0001
Vent Ana	0,53	0,0043
FC Ana	-0,78	0,0002
Testostérone libre avant effort	-0,85	0,0286
$R^2=0,7137$ $p<0,0001$ $Cp=10,7$		

Note : *Ces paramètres ne sont pas significatifs ($p>0,05$).

Tableau 59 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode d'élimination progressive pour la variable PMA.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-66,57	0,3103*
Taille	2,02	<0,0001
W Ana	0,69	<0,0001
Vent Ana	0,57	0,0017
FC Ana	-0,83	<0,0001
Testostérone libre avant effort	-0,80	0,0363
$R^2=0,7125$ $p<0,0001$ $Cp=9,39$		

Note : *Ce paramètre n'est pas significatif ($p>0,05$).

Tableau 60 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode du coefficient de détermination ajusté pour la variable PMA.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-30,5	0,6913*
Poids	1,07	0,1239*
Taille	0,87	0,1864*
Vent Max	-0,31	0,0611*
FC Max	1,01	0,0889*
W Ana	0,68	<0,0001
FC Ana	-1,2	0,0161
Vent Ana	0,89	0,0013
Testostérone libre av effort	-1,55	0,0113
Testostérone libre ap effort	0,64	0,1424*
LH ap effort	1,48	0,1233*
FSH av effort	-0,78	0,4330*
Prolactine av effort	-1,13	0,0966*
Insuline av effort	-0,28	0,0780*
$R^2=0,7432$ $p<0,0001$ $Cp=14$		

Note : *Ces paramètres ne sont pas significatifs ($p>0,05$).

Tableau 61 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour la variable PMA.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-89,25	0,1865*
Taille	1,82	<0,0001
Vent Max	-0,29	0,0694*
FC Max	0,9	0,1240*
W Ana	0,65	<0,0001
FC Ana	-1,32	0,0078
Vent Ana	0,95	0,0005
Testostérone libre av effort	-1,49	0,0141
Testostérone libre ap effort	0,72	0,0948*
Insuline av effort	-0,27	0,0808*
$R^2=0,7259$ $p<0,0001$ $Cp=5,75$		

Note : *Ces paramètres ne sont pas significatifs ($p>0,05$).

Tableau 62 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode de sélection pas à pas pour la variable W Ana.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-247,84	<0,0001
Age	2,92	<0,0001
Taille	0,90	0,0088
$\dot{V}O_2$ Max	1,27	0,0001
PMA	0,39	<0,0001
Vent Ana	0,33	0,0250
FC Ana	0,35	0,0490
Prolactine avant	1,73	0,0010
$R^2=0,7526$ $p<0,0001$ $Cp=11,66$		

Tableau 63 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode d'introduction progressive pour la variable W Ana.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-247,84	<0,0001
Age	2,92	<0,0001
Taille	0,90	0,0088
$\dot{V}O_2$ Max	1,27	0,0001
PMA	0,39	<0,0001
Vent Ana	0,33	0,0250
FC Ana	0,35	0,0490
Prolactine avant	1,73	0,0010
$R^2=0,7526$ $p<0,0001$ $Cp=11,66$		

Tableau 64 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode d'élimination progressive pour la variable W Ana

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-195,76	<0,0001
Age	2,93	<0,0001
Poids	1,20	0,0009
$\dot{V}O_2$ Max	1,72	<0,0001
PMA	0,40	<0,0001
FC Ana	0,49	0,0033
Prolactine avant	1,92	0,0005
Cortisol avant	-0,04	0,0178
Cortisol après	0,03	0,0478
$R^2=0,7568$ $p<0,0001$ $Cp=10,92$		

Tableau 65 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode du coefficient de détermination ajusté pour la variable W Ana.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-203,85	<0,0001
Age	3,13	<0,0001
Poids	1,31	0,0005
Vent Max	0,12	0,2136*
$\dot{V}O_2$ Max	1,61	<0,0001
PMA	0,39	<0,0001
FC Ana	0,4	0,0193
Testostérone total ap effort	1,89	0,1281*
Testostérone libre ap effort	-0,48	0,1270*
LH av effort	-2,1	0,1924*
LH ap effort	-1,19	0,1017*
FSH av effort	0,8	0,3035*
Prolactine av effort	1,91	0,0004
Cortisol av effort	-0,05	0,0098
Cortisol ap effort	0,04	0,0086
Insuline av effort	0,3	0,0181
R ² =0,7805 <i>p</i> <0,0001 Cp=16		

Note : *Ces paramètre ne sont pas significatifs ($p > 0,05$).

Tableau 66 : Modèle avec ordonnée à l'origine résultant de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour la variable W Ana.

Variables sélectionnées	Paramètres	Significativité
Constante	-198,5	<0,0001
Age	3,07	<0,0001
Poids	1,3	0,0002
$\dot{V}O_2$ Max	1,85	<0,0001
PMA	0,4	<0,0001
FC Ana	0,41	0,0132
LH av effort	-2,9	0,0254
Prolactine av effort	1,96	0,0003
Cortisol av effort	-0,04	0,0131
Cortisol ap effort	0,03	0,0262
Insuline av effort	0,25	0,0523*
$R^2=0,7648$ $p<0,0001$ Cp=6,79		

Note : *Ce paramètre n'est pas significatif ($p>0,05$).

Annexe 4

Figure 72 : Histogramme des résidus du modèle issu de la méthode pas à pas pour PMA

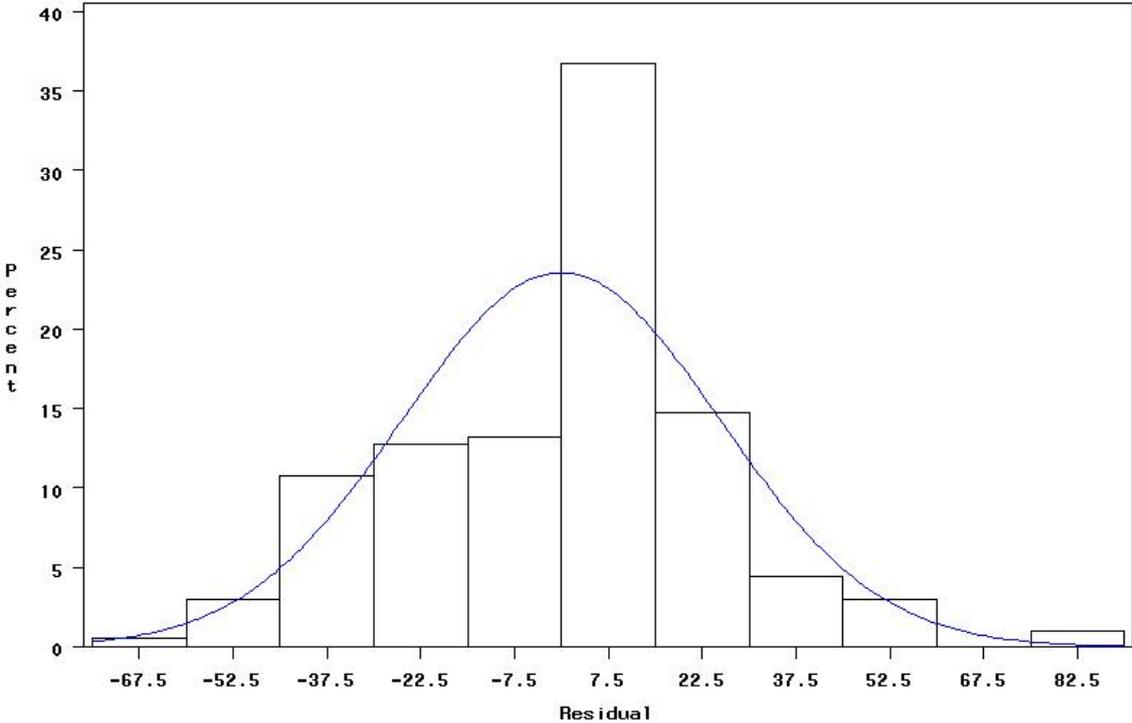


Figure 73 : Histogramme des résidus du modèle issu de la méthode d'introduction progressive pour PMA

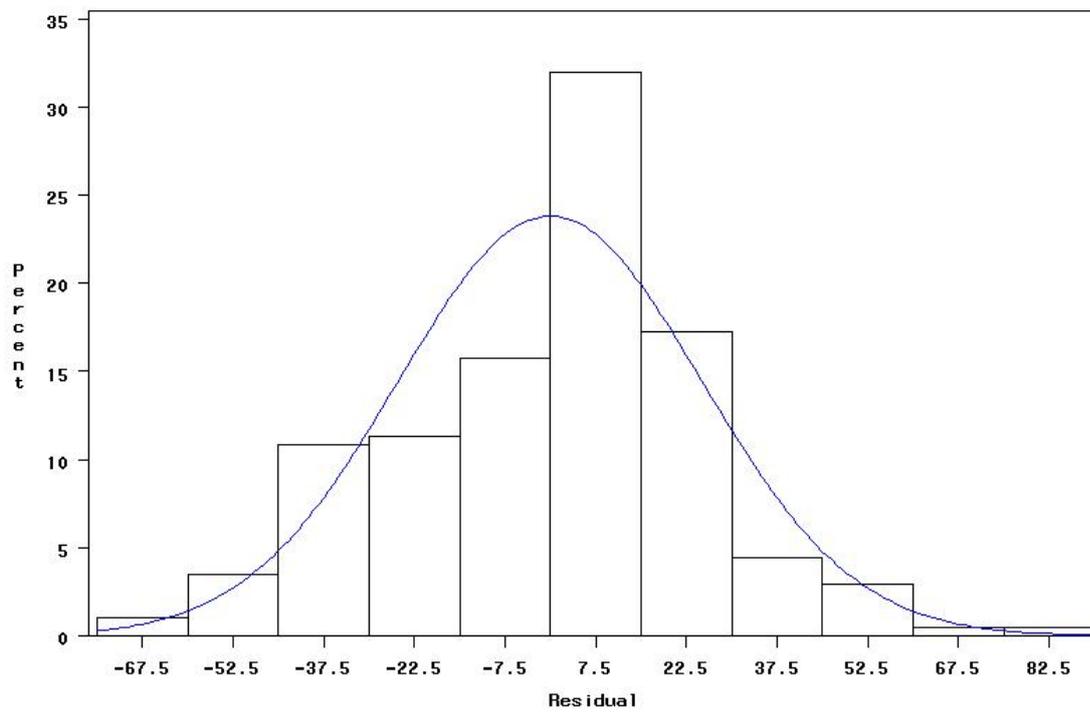
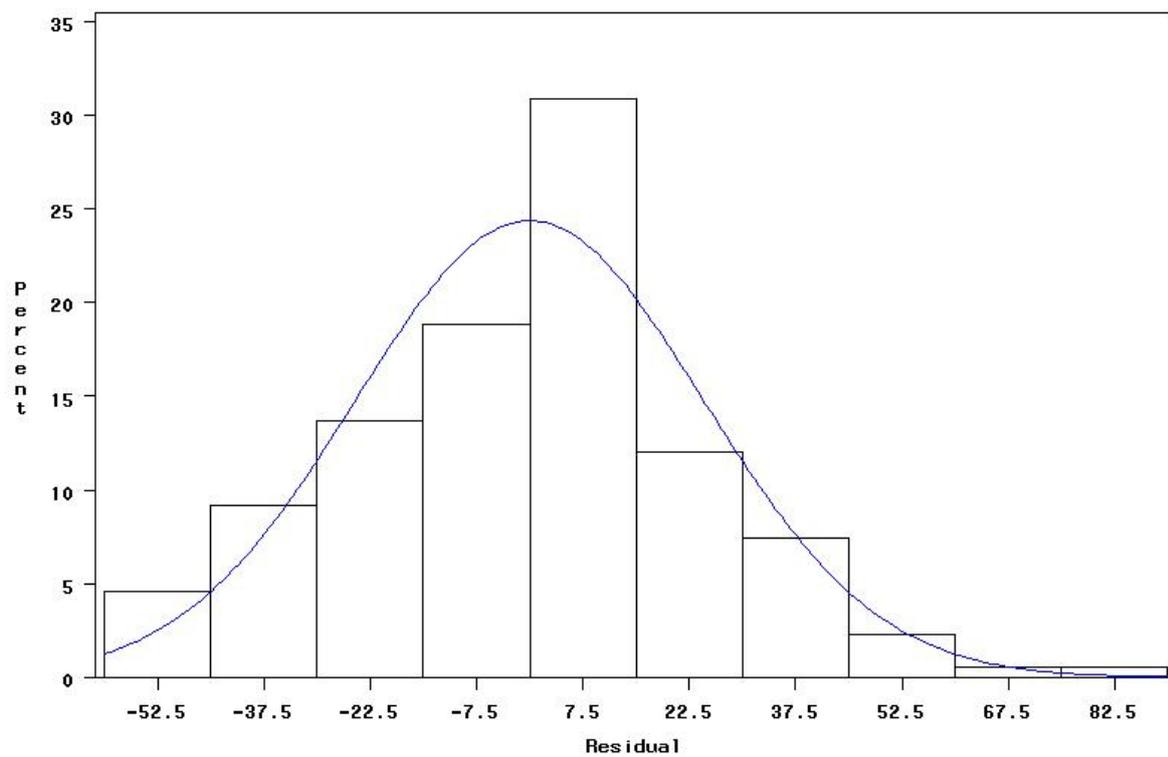


Figure 74 : Histogramme des résidus du modèle issu de la méthode du coefficient Cp de Mallows pour PMA



Annexe 5

Durbin-Watson Five Per Cent Minimal Bound

N	K=0	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	K=6	K=7	K=8	K=9	K=10	K=11	K=12	K=13	K=14	K=15	K=16	K=17	K=18	K=19	K=20	K=21
2	0.012	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
3	0.168	0.006	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
4	0.355	0.105	0.004	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
5	0.478	0.248	0.070	0.002	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
6	0.584	0.358	0.180	0.050	0.002	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
7	0.677	0.462	0.275	0.136	0.037	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
8	0.754	0.556	0.371	0.217	0.106	0.029	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
9	0.820	0.635	0.460	0.303	0.175	0.085	0.023	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
10	0.877	0.706	0.539	0.385	0.251	0.143	0.069	0.019	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
11	0.927	0.768	0.610	0.460	0.326	0.211	0.120	0.058	0.016	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
12	0.972	0.823	0.674	0.530	0.397	0.279	0.180	0.101	0.049	0.013	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
13	1.012	0.872	0.731	0.593	0.464	0.345	0.241	0.154	0.087	0.042	0.011	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
14	1.047	0.916	0.783	0.651	0.525	0.408	0.302	0.210	0.134	0.075	0.036	0.010	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----	----
15	1.079	0.955	0.829	0.704	0.583	0.467	0.361	0.266	0.185	0.118	0.066	0.031	0.008	0.001	----	----	----	----	----	----	----	----
16	1.109	0.992	0.872	0.752	0.635	0.523	0.418	0.322	0.237	0.164	0.104	0.058	0.028	0.007	0.000	----	----	----	----	----	----	----
17	1.136	1.024	0.911	0.797	0.684	0.575	0.472	0.376	0.288	0.211	0.146	0.093	0.052	0.025	0.007	0.000	----	----	----	----	----	----
18	1.160	1.055	0.946	0.837	0.729	0.624	0.523	0.427	0.339	0.260	0.190	0.131	0.083	0.046	0.022	0.006	0.000	----	----	----	----	----
19	1.183	1.082	0.979	0.875	0.771	0.669	0.570	0.476	0.388	0.307	0.235	0.171	0.118	0.075	0.041	0.020	0.005	0.000	----	----	----	----
20	1.204	1.108	1.010	0.910	0.810	0.711	0.615	0.523	0.436	0.354	0.280	0.213	0.156	0.107	0.067	0.037	0.018	0.005	0.000	----	----	----
21	1.224	1.132	1.038	0.942	0.846	0.751	0.657	0.567	0.481	0.400	0.324	0.256	0.195	0.142	0.097	0.061	0.034	0.016	0.004	0.000	----	----
22	1.242	1.154	1.064	0.972	0.879	0.787	0.697	0.609	0.524	0.443	0.368	0.298	0.235	0.178	0.130	0.089	0.056	0.031	0.015	0.004	0.000	----
23	1.259	1.175	1.088	1.000	0.911	0.822	0.734	0.648	0.565	0.485	0.410	0.339	0.274	0.216	0.164	0.119	0.081	0.051	0.028	0.014	0.004	0.000
24	1.275	1.194	1.111	1.026	0.940	0.854	0.769	0.685	0.604	0.525	0.450	0.380	0.314	0.254	0.199	0.151	0.110	0.075	0.047	0.026	0.012	0.003
25	1.290	1.212	1.132	1.050	0.967	0.884	0.802	0.720	0.641	0.563	0.489	0.419	0.353	0.291	0.235	0.184	0.140	0.101	0.069	0.044	0.024	0.011
26	1.304	1.229	1.152	1.073	0.993	0.913	0.833	0.753	0.676	0.600	0.527	0.457	0.390	0.328	0.271	0.218	0.171	0.130	0.094	0.064	0.040	0.022
27	1.318	1.245	1.171	1.094	1.017	0.940	0.862	0.785	0.709	0.635	0.563	0.493	0.427	0.365	0.306	0.252	0.203	0.159	0.120	0.087	0.060	0.037
28	1.330	1.260	1.188	1.115	1.040	0.965	0.889	0.815	0.741	0.668	0.597	0.529	0.463	0.400	0.341	0.286	0.236	0.190	0.148	0.112	0.081	0.055
29	1.342	1.275	1.205	1.134	1.062	0.989	0.916	0.843	0.770	0.699	0.630	0.562	0.497	0.435	0.376	0.320	0.268	0.221	0.177	0.139	0.105	0.076
30	1.354	1.288	1.221	1.152	1.082	1.011	0.940	0.869	0.799	0.729	0.661	0.595	0.530	0.468	0.409	0.353	0.301	0.252	0.207	0.166	0.130	0.098
31	1.365	1.301	1.236	1.169	1.101	1.033	0.964	0.895	0.826	0.758	0.691	0.626	0.562	0.501	0.442	0.386	0.333	0.283	0.237	0.195	0.156	0.122
32	1.375	1.313	1.250	1.185	1.120	1.053	0.986	0.919	0.852	0.785	0.720	0.653	0.593	0.532	0.474	0.418	0.364	0.314	0.267	0.223	0.183	0.147
33	1.385	1.325	1.264	1.201	1.137	1.072	1.007	0.942	0.876	0.811	0.747	0.684	0.623	0.563	0.504	0.449	0.395	0.344	0.297	0.252	0.211	0.173
34	1.394	1.336	1.277	1.216	1.153	1.091	1.027	0.963	0.900	0.836	0.774	0.712	0.651	0.592	0.534	0.479	0.425	0.374	0.326	0.280	0.238	0.199
35	1.403	1.347	1.289	1.230	1.169	1.108	1.046	0.984	0.922	0.860	0.799	0.738	0.678	0.620	0.563	0.508	0.455	0.404	0.355	0.309	0.266	0.225
36	1.412	1.357	1.301	1.243	1.184	1.125	1.064	1.004	0.943	0.883	0.823	0.763	0.705	0.647	0.591	0.536	0.483	0.432	0.384	0.337	0.293	0.252
37	1.420	1.367	1.312	1.256	1.199	1.141	1.082	1.023	0.964	0.905	0.846	0.787	0.730	0.673	0.618	0.564	0.511	0.460	0.412	0.365	0.321	0.279
38	1.428	1.376	1.323	1.268	1.212	1.156	1.099	1.041	0.983	0.925	0.868	0.811	0.754	0.698	0.644	0.590	0.538	0.488	0.439	0.392	0.347	0.305
39	1.436	1.385	1.333	1.280	1.225	1.170	1.114	1.058	1.002	0.945	0.889	0.833	0.778	0.723	0.669	0.616	0.564	0.514	0.466	0.419	0.374	0.331
40	1.443	1.394	1.343	1.291	1.238	1.184	1.130	1.075	1.020	0.965	0.909	0.854	0.800	0.746	0.693	0.641	0.590	0.540	0.492	0.445	0.400	0.357
45	1.476	1.432	1.387	1.341	1.294	1.246	1.197	1.148	1.099	1.049	1.000	0.950	0.900	0.851	0.802	0.753	0.706	0.658	0.612	0.567	0.523	0.480
50	1.504	1.464	1.424	1.382	1.340	1.297	1.253	1.209	1.164	1.120	1.075	1.029	0.984	0.939	0.894	0.849	0.804	0.760	0.717	0.674	0.631	0.590
55	1.528	1.492	1.455	1.417	1.379	1.340	1.300	1.260	1.219	1.179	1.138	1.096	1.055	1.013	0.972	0.930	0.889	0.848	0.807	0.766	0.726	0.687
60	1.549	1.516	1.482	1.447	1.412	1.376	1.340	1.303	1.266	1.229	1.191	1.153	1.115	1.077	1.038	1.000	0.962	0.923	0.885	0.847	0.810	0.772
65	1.568	1.537	1.505	1.474	1.441	1.408	1.375	1.341	1.307	1.272	1.238	1.202	1.167	1.132	1.096	1.061	1.025	0.989	0.953	0.918	0.882	0.847
70	1.584	1.555	1.526	1.497	1.467	1.436	1.405	1.374	1.342	1.310	1.278	1.245	1.213	1.180	1.147	1.113	1.080	1.047	1.013	0.980	0.947	0.914
75	1.599	1.572	1.545	1.517	1.489	1.461	1.432	1.403	1.373	1.344	1.313	1.283	1.253	1.222	1.191	1.160	1.129	1.098	1.066	1.035	1.004	0.972
80	1.612	1.587	1.561	1.536	1.509	1.483	1.456	1.429	1.401	1.373	1.345	1.317	1.288	1.259	1.230	1.201	1.172	1.143	1.113	1.084	1.054	1.025
85	1.624	1.600	1.576	1.552	1.527	1.502	1.477	1.452	1.426	1.400	1.373	1.347	1.320	1.293	1.266	1.238	1.211	1.183	1.155	1.128	1.100	1.072
90	1.635	1.613	1.590	1.567	1.544	1.520	1.497	1.472	1.448	1.423	1.399	1.373	1.348	1.323	1.297	1.271	1.245	1.219	1.193	1.167	1.141	1.114
95	1.645	1.624	1.603	1.581	1.559	1.537	1.514	1.491	1.468	1.445	1.422	1.398	1.374	1.350	1.326	1.301	1.277	1.252	1.227	1.202	1.177	1.152
100	1.654	1.634	1.614	1.593	1.573	1.551	1.530	1.508	1.487	1.465	1.442	1.420	1.397	1.374	1.352	1.328	1.305	1.282	1.258	1.235	1.211	1.187
150	1.720	1.706	1.693	1.679	1.666	1.652	1.638	1.624	1.609	1.595	1.580	1.566	1.551	1.536	1.521	1.506	1.491	1.476	1.461	1.445	1.430	1.414
200	1.759	1.748	1.738	1.728	1.718	1.708	1.697	1.687	1.676	1.666	1.655	1.644	1.633	1.622	1.611	1.600	1.589	1.578	1.567	1.556	1.544	1.533

Durbin-Watson Ninety Five Per Cent Minimal Bound

N	K=0	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	K=6	K=7	K=8	K=9	K=10	K=11	K=12	K=13	K=14	K=15	K=16	K=17	K=18	K=19	K=20	K=21
2	1.988	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3	2.761	0.994	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4	2.871	1.836	0.582	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	2.857	2.178	1.267	0.380	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
6	2.844	2.320	1.655	0.917	0.266	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7	2.828	2.398	1.871	1.283	0.690	0.197	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
8	2.805	2.453	2.008	1.521	1.017	0.537	0.151	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9	2.783	2.483	2.110	1.687	1.251	0.823	0.429	0.120	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
10	2.762	2.501	2.181	1.816	1.427	1.044	0.678	0.350	0.097	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
11	2.742	2.511	2.231	1.913	1.569	1.218	0.881	0.567	0.291	0.080	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
12	2.723	2.516	2.268	1.987	1.682	1.364	1.049	0.752	0.481	0.245	0.068	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
13	2.705	2.518	2.296	2.044	1.771	1.484	1.193	0.911	0.649	0.413	0.210	0.058	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
14	2.688	2.517	2.316	2.090	1.843	1.582	1.316	1.051	0.797	0.565	0.358	0.181	0.050	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
15	2.672	2.515	2.332	2.126	1.902	1.664	1.419	1.172	0.931	0.703	0.497	0.314	0.158	0.043	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
16	2.657	2.512	2.344	2.155	1.950	1.732	1.506	1.276	1.049	0.829	0.624	0.439	0.277	0.139	0.038	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
17	2.644	2.508	2.353	2.179	1.990	1.789	1.580	1.367	1.153	0.944	0.743	0.557	0.391	0.246	0.124	0.034	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18	2.631	2.504	2.359	2.199	2.024	1.838	1.644	1.445	1.244	1.045	0.852	0.669	0.501	0.351	0.220	0.110	0.030	-----	-----	-----	-----	-----
19	2.618	2.499	2.364	2.215	2.053	1.880	1.699	1.513	1.324	1.136	0.951	0.773	0.605	0.452	0.316	0.198	0.099	0.027	-----	-----	-----	-----
20	2.607	2.494	2.368	2.228	2.077	1.916	1.747	1.573	1.395	1.216	1.040	0.868	0.704	0.550	0.410	0.286	0.179	0.090	0.025	-----	-----	-----
21	2.596	2.489	2.370	2.239	2.098	1.947	1.789	1.625	1.457	1.289	1.120	0.955	0.796	0.644	0.502	0.373	0.260	0.162	0.081	0.022	-----	-----
22	2.585	2.484	2.372	2.249	2.116	1.974	1.825	1.671	1.513	1.353	1.193	1.034	0.880	0.731	0.591	0.460	0.341	0.238	0.148	0.074	0.020	-----
23	2.575	2.479	2.373	2.257	2.131	1.998	1.858	1.712	1.563	1.411	1.258	1.107	0.957	0.813	0.674	0.544	0.422	0.313	0.218	0.136	0.068	0.019
24	2.566	2.474	2.373	2.263	2.145	2.019	1.886	1.749	1.607	1.463	1.318	1.172	1.029	0.888	0.753	0.623	0.502	0.389	0.289	0.201	0.125	0.062
25	2.557	2.470	2.373	2.269	2.156	2.037	1.912	1.782	1.647	1.510	1.371	1.232	1.094	0.958	0.826	0.699	0.578	0.465	0.360	0.267	0.185	0.115
26	1.073	1.004	0.934	0.863	0.792	0.722	0.652	0.584	0.518	0.454	0.394	0.336	0.283	0.233	0.189	0.148	0.113	0.083	0.057	0.037	0.022	0.011
27	1.089	1.023	0.955	0.886	0.817	0.749	0.681	0.614	0.549	0.486	0.426	0.368	0.314	0.264	0.218	0.176	0.138	0.105	0.077	0.053	0.034	0.020
28	1.105	1.040	0.974	0.908	0.841	0.774	0.708	0.643	0.579	0.517	0.457	0.400	0.345	0.294	0.247	0.204	0.164	0.129	0.098	0.071	0.050	0.032
29	1.120	1.057	0.993	0.929	0.864	0.798	0.734	0.670	0.607	0.546	0.487	0.430	0.376	0.324	0.276	0.232	0.191	0.154	0.120	0.091	0.067	0.046
30	1.134	1.073	1.011	0.948	0.885	0.822	0.759	0.696	0.635	0.574	0.516	0.460	0.405	0.354	0.305	0.260	0.217	0.179	0.144	0.113	0.086	0.062
31	1.147	1.088	1.028	0.967	0.905	0.844	0.782	0.721	0.661	0.602	0.544	0.488	0.434	0.383	0.334	0.288	0.244	0.205	0.168	0.135	0.106	0.080
32	1.160	1.103	1.044	0.985	0.925	0.865	0.805	0.745	0.686	0.628	0.571	0.516	0.462	0.411	0.362	0.315	0.271	0.230	0.193	0.158	0.127	0.100
33	1.173	1.117	1.060	1.002	0.944	0.885	0.826	0.768	0.710	0.653	0.597	0.542	0.489	0.438	0.389	0.342	0.298	0.256	0.218	0.182	0.149	0.120
34	1.185	1.130	1.075	1.018	0.961	0.904	0.847	0.790	0.733	0.677	0.622	0.568	0.516	0.465	0.416	0.369	0.324	0.282	0.243	0.206	0.172	0.141
35	1.196	1.143	1.089	1.034	0.978	0.923	0.867	0.811	0.755	0.700	0.646	0.593	0.541	0.491	0.442	0.395	0.350	0.308	0.268	0.230	0.195	0.163
36	1.207	1.155	1.102	1.049	0.995	0.940	0.886	0.831	0.777	0.723	0.669	0.617	0.566	0.516	0.467	0.421	0.376	0.333	0.292	0.254	0.218	0.185
37	1.217	1.167	1.116	1.063	1.010	0.957	0.904	0.850	0.797	0.744	0.692	0.640	0.590	0.540	0.492	0.446	0.401	0.358	0.317	0.278	0.241	0.207
38	1.228	1.178	1.128	1.077	1.026	0.974	0.921	0.869	0.817	0.765	0.713	0.663	0.613	0.564	0.516	0.470	0.425	0.382	0.341	0.302	0.265	0.230
39	1.237	1.189	1.140	1.090	1.040	0.989	0.938	0.887	0.836	0.785	0.734	0.684	0.635	0.587	0.540	0.494	0.449	0.406	0.365	0.325	0.288	0.252
40	1.247	1.200	1.152	1.103	1.054	1.004	0.954	0.904	0.854	0.804	0.754	0.705	0.657	0.609	0.562	0.517	0.473	0.430	0.388	0.349	0.311	0.275
45	1.289	1.247	1.204	1.160	1.116	1.071	1.026	0.981	0.936	0.890	0.845	0.800	0.755	0.710	0.666	0.623	0.581	0.539	0.499	0.459	0.421	0.384
50	1.325	1.287	1.248	1.208	1.168	1.128	1.087	1.046	1.004	0.963	0.921	0.880	0.838	0.797	0.756	0.715	0.675	0.636	0.597	0.559	0.521	0.485
55	1.356	1.321	1.286	1.250	1.213	1.176	1.139	1.101	1.063	1.025	0.987	0.948	0.910	0.872	0.833	0.796	0.758	0.721	0.684	0.647	0.611	0.576
60	1.383	1.351	1.319	1.285	1.252	1.218	1.183	1.149	1.114	1.078	1.043	1.008	0.972	0.936	0.901	0.865	0.830	0.795	0.760	0.725	0.691	0.657
65	1.408	1.378	1.348	1.317	1.286	1.254	1.222	1.190	1.158	1.125	1.092	1.059	1.026	0.993	0.960	0.927	0.894	0.861	0.828	0.795	0.762	0.730
70	1.429	1.401	1.373	1.345	1.316	1.286	1.257	1.227	1.197	1.166	1.136	1.105	1.074	1.043	1.012	0.981	0.950	0.919	0.888	0.857	0.826	0.795
75	1.448	1.423	1.396	1.369	1.342	1.315	1.287	1.260	1.231	1.203	1.174	1.146	1.117	1.088	1.058	1.029	1.000	0.971	0.941	0.912	0.883	0.854
80	1.466	1.442	1.417	1.392	1.367	1.341	1.315	1.289	1.262	1.236	1.209	1.182	1.155	1.127	1.100	1.072	1.045	1.017	0.989	0.962	0.934	0.907
85	1.482	1.459	1.436	1.412	1.388	1.364	1.340	1.315	1.290	1.265	1.240	1.214	1.189	1.163	1.137	1.111	1.085	1.059	1.033	1.006	0.980	0.954
90	1.497	1.475	1.453	1.431	1.408	1.385	1.362	1.339	1.315	1.292	1.268	1.244	1.220	1.195	1.171	1.146	1.121	1.097	1.072	1.047	1.022	0.997
95	1.510	1.490	1.469	1.448	1.426	1.405	1.383	1.361	1.338	1.316	1.293	1.271	1.248	1.225	1.201	1.178	1.155	1.131	1.108	1.084	1.060	1.037
100	1.523	1.503	1.483	1.463	1.443	1.422	1.402	1.381	1.359	1.338	1.317	1.295	1.273	1.251	1.229	1.207	1.185	1.162	1.140	1.118	1.095	1.072
150	1.611	1.598	1.585	1.571	1.558	1.544	1.530	1.516	1.502	1.488	1.474	1.460	1.445	1.431	1.416	1.402	1.387	1.372	1.357	1.342	1.327	1.312
200	1.664	1.654	1.644	1.634	1.624	1.613	1.603	1.593	1.582	1.572	1.561	1.551	1.540	1.529	1.519	1.508	1.497	1.486	1.475	1.464	1.453	1.442

Annexe 6 (Articles)



This article was published in an Elsevier journal. The attached copy is furnished to the author for non-commercial research and education use, including for instruction at the author's institution, sharing with colleagues and providing to institution administration.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



ELSEVIER
MASSON

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Science & Sports 22 (2007) 243–245

SCIENCE
& SPORTS

<http://france.elsevier.com/direct/SCISPO/>

Communication brève

Analyse de variables permettant la détermination du niveau d'un cycliste

Analysis of variables allowing the determination of the level of a cyclist

M. Soudain-Pineau^a, J.-P. Romeur^a, Z. Kispeter^a, J. Medelli^b, P. Joly^{a,*}

^aLaboratoire d'analyse des contraintes mécaniques, université de Reims Champagne-Ardenne, campus Moulin de la housse, 51100 Reims, France

^bUnité de biologie de l'effort et de médecine du sport, CHU d'Amiens, place Victor-Pauchet, 80000 Amiens, France

Reçu le 20 octobre 2006 ; accepté le 20 juin 2007

Disponible sur internet le 10 août 2007

Résumé

Objectifs. – Le but de ce travail est de définir un modèle mathématique permettant de prévoir le niveau d'un cycliste.

Méthodes. – Cent six cyclistes ont été classés en fonction de leur niveau et certaines de leurs caractéristiques physiologiques ont été mesurées au seuil (4 mmol de lactate) et aux valeurs maximales de leur débit d'oxygène.

Résultats. – Au seuil, la puissance, la lactatémie, l'âge et la taille permettent de prévoir le niveau avec un taux d'erreur de 27 % ; aux valeurs maximales, les critères sont alors le développement, le débit en oxygène, la lactatémie et l'âge (taux d'erreur de 31 %).

Conclusion. – Ces résultats indiquent que notre modèle mathématique permet de prévoir le niveau de ces athlètes.

© 2007 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Aims. – We aimed to define a mathematical model allowing to foresee the level of a cyclist.

Methods. – One hundred (and) six cyclists were classified according to their level and some of their physiological characteristics were measured with the threshold (4 mmol of lactate) and with the maximum values of their oxygen flow.

Results. – To the threshold, power, lactatemy, age and size allow to foresee the level with an error rate of 27% ; to the maximum values, the criteria are development, flow in oxygen, lactatemy and age (error rate of 31%).

Conclusion. – These results indicate that our mathematical model allows to envisage the level.

© 2007 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Niveau ; Caractéristiques ; Cyclisme ; Performance

Keywords: Level; Characteristics; Cycling; Performance

1. Introduction

Nous avons recherché un modèle mathématique prédictif permettant de déterminer (ou de confirmer) le niveau compétitif de l'athlète, en étudiant sur une population de 106 cyclistes répartis en trois groupes de niveau différent, les relations qui pourraient exister entre les mesures anthropométriques, cardiovasculaires, respiratoires, ventilatoires et énergétiques, mesures qui sont classiquement évaluées lors du suivi médical d'un

athlète et les caractéristiques biomécaniques (notamment puissance et/ou développement).

2. Matériels et méthodes

Les 106 sujets pratiquent tous le cyclisme depuis au moins quatre ans, et leur niveau de hiérarchie sportive se situe entre la 250^e et la 3000^e place du classement de la Fédération française de cyclisme. Ces 106 cyclistes ont été répartis en trois groupes (gp) : le gp 1 ($n = 24$) correspond au niveau national (10 à 12 heures d'entraînement – quatre séances hebdomadaires) ; le gp 2 ($n = 57$) correspond au niveau régional (trois entraîne-

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : philippe.joly@univ-reims.fr (P. Joly).

ments par semaine pour un total de dix heures) et le gp 3 ($n = 25$) correspond au niveau départemental (5 à 6 heures 30 d'entraînement – trois séances par semaine). Après avoir donné leur consentement éclairé et après un examen clinique complet, les sujets subissent jusqu'à épuisement, une incrémentation de puissance par paliers de trois minutes, sur ergocycle (Orion Pro Training 7016[®]) entrecoupés d'une pause d'une minute durant laquelle est réalisé un prélèvement sanguin. Les gaz expirés sont transmis à un ergospiromètre (Medgraphics Cardiopulmonary Exercise System CPX/D[®]). La fréquence cardiaque est enregistrée par télémétrie (SCOP LIVE 6 de CPX[®]). Les lactates sont analysés à partir d'un échantillon sanguin (10 μ l) [Microzym SGI[®]]. La majorité des calculs a été effectuée avec le logiciel SAS[®] (SAS institute Inc. Cary, NC, États-Unis.).

3. Résultats

Le Tableau 1 présente l'ensemble des données des trois groupes de cyclistes au « seuil lactique » (4 mM Lact) et au maximum de leur $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2\max}$) et les différences significatives observées entre les résultats sont indiquées ($p < 0,05$). Nous avons recherché s'il existait une relation entre ces variables et le niveau des athlètes (ce qui correspond à leur appartenance à un groupe donné : gp 1, 2 ou 3). La méthode de sélection pas à pas et la méthode d'introduction progressive permettent, en utilisant les variables vitesse, lactatémie et âge, de déterminer le niveau de l'athlète avec une marge d'erreur de 32,14 et de 26,42 % respectivement au « seuil » et au « max » (Tableau 2). En éliminant les athlètes mal « classés » lors de la première étude, la fonction discriminante la plus valide (au seuil) contient alors quatre variables : Âge, lactatémie (La), Taille et puissance (P). Le reclassement de l'ensemble de notre population ($n = 106$) présente un taux d'erreur de 27 %. En utilisant les valeurs au « max », les variables qui composent la fonction discriminante la plus valide sont les suivantes : La, Âge, $\dot{V}O_2$ et développement (Dev). On obtient un taux d'erreur pour ce modèle de 31 %, valeur qui est plus élevée que celle

Tableau 2

Coefficients de la fonction discriminante quadratique au « seuil »

Groupe	Variables	La	Âge	Taille	P
1	La	-2,7097			
	Âge	0,0318	-0,0711		
	Taille	-0,0217	-0,0187	-0,0256	
	P	0,0086	-0,0001	0,0010	-0,0005
	Pente ^a	23,4228	9,8428	9,6695	-0,1226
	Constante ^b				-1016,9797
2	La	-2,3423			
	Âge	0,0600	-0,0732		
	Taille	-0,0146	-0,0107	-0,0181	
	P	0,0075	0,0033	0,0009	-0,0006
	Pente ^a	17,0155	4,7405	6,5231	-0,2558
	Constante ^b				-634,8672
3	La	-3,6118			
	Âge	-0,0098	-0,2107		
	Taille	-0,0814	0,0050	-0,0177	
	P	0,0096	0,0036	0,0008	-0,0003
	Pente ^a	54,1102	3,8208	6,3725	-0,3520
	Constante ^b				-671,86

^a Pente de la fonction.

^b Constante de la fonction. Ce qui donne par exemple la fonction discriminante quadratique pour le groupe 1 (X étant l'ensemble des variables) : $f(X|1) = -2,7097 La^2 + 0,0318 \text{ Âge} \cdot La + \dots -0,0711 \text{ Âge}^2 + \dots -0,0256 \text{ Taille}^2 \dots -0,0005 P^2 - 0,1226 P - 1016,9797$. Les mêmes calculs sont faits pour chaque groupe et les trois fonctions donnent la probabilité d'appartenance d'après $\pi(j|X) = \frac{\pi_j f(X|j)}{\pi_1 f(X|1) + \pi_2 f(X|2) + \pi_3 f(X|3)}$.

obtenue avant reclassement, néanmoins ce modèle est plus significatif en termes de validité.

La Tableau 2 présente les coefficients de la fonction discriminante quadratique pour chaque groupe au « seuil ». Le même genre de tableau est réalisable avec les valeurs au « max ».

La probabilité, a posteriori, d'appartenir au j^{e} groupe (dans notre cas gr 1, 2 ou 3 ; avec π_1, π_2 et π_3 les probabilités a priori d'être dans chacun de ces groupes) est donc :

$$\pi(j|X) = \frac{\pi_j f(X|j)}{\pi_1 f(X|1) + \pi_2 f(X|2) + \pi_3 f(X|3)}$$

Au final, pour chaque individu, nous obtenons trois valeurs et la probabilité maximale donne le groupe d'appartenance.

Tableau 1

Statistiques descriptives des données physiques, physiologiques et anthropométriques mesurées durant l'épreuve

Variables	Au Seuil				A $\dot{V}O_{2\max}$			
	Groupe 1 Nombre = 24	Groupe 2 Nombre = 58	Groupe 3 Nombre = 29	p^a	Groupe 1 Nombre = 24	Groupe 2 Nombre = 57	Groupe 3 Nombre = 25	p^a
Âge (années)	23 \pm 3	20 \pm 3	17 \pm 2	< 0,0001	23 \pm 3	20 \pm 3	17 \pm 2	< 0,0001
Poids Corporel (kg)	70 \pm 7	67 \pm 7	64 \pm 9	0,0083	70 \pm 7	67 \pm 7	64 \pm 9	0,0083
Taille (cm)	179 \pm 5	178 \pm 6	176 \pm 6	0,2788	179 \pm 5	178 \pm 6	176 \pm 6	0,2788
V (km/h)	39,5 \pm 1,8	37,0 \pm 2,0	36,0 \pm 3,0	< 0,0001	43,8 \pm 1,0	41,8 \pm 1,2	40,0 \pm 1,9	< 0,0001
P (Watts)	284,7 \pm 33,7	240,3 \pm 37,3	222,8 \pm 53,1	< 0,0001	376,6 \pm 29,5	332,5 \pm 31,1	295,9 \pm 39,8	< 0,0001
Dev (m)	7,4 \pm 0,5	6,9 \pm 0,7	6,6 \pm 0,8	0,0002	8,2 \pm 0,5	7,7 \pm 0,5	7,4 \pm 0,7	< 0,0001
Cad (rpm)	91,6 \pm 4,5	93,0 \pm 5,7	93,4 \pm 6,7	0,7096	92,2 \pm 4,6	93,2 \pm 4,9	93,0 \pm 6,8	0,5875
$\dot{V}CO_2$ (ml/min)	3,8 \pm 0,5	3,4 \pm 0,5	3,2 \pm 0,5	0,0003	4,8 \pm 0,6	4,4 \pm 0,6	4,2 \pm 0,5	0,0004
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	3,7 \pm 0,5	3,3 \pm 0,4	3,1 \pm 0,5	0,0002	4,3 \pm 0,5	3,9 \pm 0,4	3,7 \pm 0,4	0,0006
FC (bpm)	171,8 \pm 11,6	170,1 \pm 12,0	174,2 \pm 13,1	0,3849	192,1 \pm 8,7	193,1 \pm 8,8	193,6 \pm 9,2	0,7700
La (mmol/l)	4,1 \pm 0,4	3,8 \pm 0,5	4,1 \pm 0,4	0,0192	10,5 \pm 2,5	11,1 \pm 2,4	9,4 \pm 3,3	0,0315

^a Test de Kruskal-Wallis, lorsque p est inférieure au seuil $\alpha = 0,05$, il y a une différence entre les trois groupes.

4. Discussion

Au « seuil lactique », avec un taux d'erreur de 27 %, il est possible en laboratoire de prédire, au sein d'un groupe hétérogène, le niveau d'un athlète âgé de 16 à 25 ans en évaluant les marqueurs suivant (P, La, Âge et Taille). Il est à remarquer que jusqu'au seuil, la lactatémie intervient alors comme une constante dans ce modèle. Au « max », la performance semble être dépendante de $\dot{V}O_2$, La, Dev et Âge. Par ailleurs, ce modèle ne prend en compte que des conditions rencontrées lors d'une épreuve « classique » en laboratoire. Ainsi, sur le terrain, la performance dépend aussi des caractéristiques aérodynamiques de l'athlète [3]; cependant, cette notion reste à moduler : en effet, P et les caractéristiques aérodynamiques (surface frontale notamment) sont des variables dépendantes et notre modèle les intègre au moins partiellement. Il en est de même pour la typologie musculaire et le pourcentage de capillarisation du muscle [1], le statut hormonal et la masse grasseuse [2] qui ne sont pas pris en compte, ainsi que l'aspect génétique, l'aspect psy-

chologique [2], l'altitude et les conditions environnementales [4].

5. Conclusion

Si le modèle mathématique que nous avons utilisé dans cette étude permet un classement des cyclistes relativement satisfaisant, il n'en demeure pas moins perfectible par la prise en compte d'autres variables et/ou l'utilisation d'autres méthodes d'analyses.

Références

- [1] Bosquet L, Leger L, Legros P. Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med* 2002;32:675–700.
- [2] Faria EW, Parker DL, Faria IE. The science of cycling: factors affecting performance – part 2. *Sports Med* 2005;35:313–37.
- [3] Olds T. Mathematical model of cycling performance. *J Appl Physiol* 1993; 75:730–7.
- [4] Peronnet F, Bouissou P, Perrault H, Ricci J. The one hour cycling record at sea level and at altitude. *Cycling Sci* 1991;3 (16-22).



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



ELSEVIER
MASSON

Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com



Science & Sports 23 (2008) 292–298



<http://france.elsevier.com/direct/SCISPO/>

Article original

Cinétique de la consommation d'oxygène chez le cycliste amateur

Oxygen uptake kinetics of amateur cyclist

J.-P. Romeur^a, J. Lounana^b, M. Soudain-Pineau^a, J. Medelli^b, P. Joly^{a,*}

^a E.A. n° 3304, LRC-CEA, laboratoire d'analyse des contraintes mécaniques, campus Moulin-de-la-Housse, université de Reims–Champagne-Ardenne, 51100 Reims, France

^b Unité de biologie de l'effort et de médecine du sport, CHU d'Amiens, place Victor-Pauchet, 80000 Amiens, France

Reçu le 15 février 2008 ; accepté le 7 mars 2008

Disponible sur Internet le 20 mai 2008

Résumé

Objectif. – Examiner la relation puissance–consommation d'oxygène chez des cyclistes amateurs avant et après le seuil « anaérobie » fixé arbitrairement à la puissance correspondant à une lactatémie de 4 mmol/l.

Matériels et méthodes. – Une population de 109 sujets est subdivisée en quatre groupes (âge, spécialité, catégorie, période d'évaluation). Chaque sujet effectue un test incrémental maximal (50 W par palier de trois minutes) sur cycloergomètre. Les gaz expirés sont collectés grâce à un masque facial et recueillis par méthode cycle par cycle. Les valeurs moyennes du débit en oxygène de la dernière minute de chaque palier sont retenues pour construire et calculer les équations de régression.

Résultats. – L'échantillon total, comme tous les autres, présente une valeur de pente après le seuil significativement inférieure à celle avant le seuil ($p < 0,001$), objectivant une déflexion du débit en oxygène et donc une absence de linéarité. Pour le niveau, la pente et l'intercept avant le seuil sont significativement inférieurs pour les nationaux versus régionaux. Pour la spécialité, la pente après le seuil est significativement inférieure pour les vététistes versus route. L'étude des pentes avant et après le seuil apporte donc des critères supplémentaires de discrimination par rapports à ceux classiquement utilisés.

© 2008 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Aims. – Study was to analyze the relationship between oxygen uptake and power output in amateur cyclists before and after threshold corresponding to a blood lactate concentration of 4 mmol/l.

Methods. – We evaluated 109 subjects and they were divided according to age, cycling speciality, level and period. Each subject performed an incremental exercise test (50 W per 3 min) until exhaustion on an electromagnetically braked cycloergometer. Gas exchange data were continuously analyzed and recorded using an automated breath by breath system. Mean values of oxygen uptake were taken during the last minute of each stage in order to build and calculate the regression equations.

Results. – The total sample presents an oxygen–kinetic deflection after lactate threshold, with the slope before threshold significantly higher ($P < 0.001$) than the slope after threshold. This indicates an absence of linearity. Considering the level, the slope and intercept before threshold of the national group presented significantly lower values than regional cyclists. For speciality, the slope before threshold is significantly lower in mountain bike group compared to road. Slope's analyse before and after lactate threshold could present complementary criteria for a good discrimination in comparison with classic concepts used during an incremental exhaustive test.

© 2008 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Puissance ; Consommation d'oxygène ; Lactate ; Cyclisme

Keywords: Power; Oxygen uptake; Lactate; Cycling

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : philippe.joly@univ-reims.fr (P. Joly).

1. Introduction

Depuis les travaux d'Astrand et Rhyming [1], la relation entre la puissance développée (P) et la consommation d'oxygène est classiquement considérée comme étant linéaire et décrite comme telle dans divers ouvrages de référence sur la physiologie de l'exercice musculaire [2,15]. Cependant, cette notion de linéarité a été remise en question par différents auteurs [5,6,9,10,13,14,16,17]. En effet, selon ces auteurs, au-delà du seuil « anaérobie » (LT), le débit en oxygène (VO_2) serait supérieur à celui théoriquement attendu. D'autres auteurs, en revanche, ont mis en évidence, au-delà du seuil « anaérobie » [3,11] ou du seuil ventilatoire [12], une déflexion de la cinétique de la consommation d'oxygène.

Parmi les multiples facteurs, de nature technique ou méthodologique, pouvant expliquer les divergences de la littérature sur la réalité de la linéarité ou le sens de sa rupture, le nombre de sujets relativement réduit au niveau des échantillons étudiés ($n = 5-26$) a retenu notre attention. Disposant d'un échantillon de participants plus consistant ($n = 109$), notre travail a donc eu pour but d'examiner la relation puissance- VO_2 chez des cyclistes amateurs répartis en fonction de l'âge, la catégorie et la spécialité. En outre, notre étude prend en compte un éventuel effet de la période de la saison sportive au cours de laquelle chaque test a été réalisé.

2. Matériel et méthode

2.1. Population

Notre population est composée de 109 sujets ($21 \pm 4,7$ ans ; $67 \pm 8,3$ kg ; $177,7 \pm 6,5$ cm). Tous pratiquent le cyclisme au moins depuis quatre ans. Leur niveau sportif, établi à partir des résultats obtenus la saison précédente, se situe entre la cinquième et la trois millièmes place au classement de la Fédération française de cyclisme (FFC).

Pour examiner un effet éventuel de l'âge, les sujets sont arbitrairement répartis en trois groupes : 15–17 ans ($n = 33$), 18–22 ans ($n = 33$) et supérieur à 22 ans ($n = 43$). L'effet éventuel de la spécialité est recherché en séparant les cyclistes sur route ($n = 95$) des cyclistes de vélo tout-terrain ou VTT ($n = 14$). Enfin, le niveau de compétition est pris en compte en étudiant les sujets en suivant un groupe de niveau « national » ($n = 44$) et un autre de niveau « régional » ($n = 65$). Les cyclistes de niveau « national » s'entraînent régulièrement à raison de dix à 12 heures par semaine, réparties en quatre séances hebdomadaires et les cyclistes de niveau « régional » à raison de trois entraînements par semaine pour un total de dix heures.

La période compétitive (*on*) s'étale de mars à septembre, au cours de laquelle les cyclistes s'entraînent et effectuent 30 à 40 compétitions de 60 à 100 km en moyenne. Après un mois de cessation complète d'activité, la période hors compétition (*off*) s'étale de novembre à février au cours de laquelle les sujets reprennent progressivement l'entraînement.

Les données anthropométriques des sujets en répartissant à chaque fois notre population en fonction de l'une des caractéristiques (ex : spécialité, âge, ...) sont précisées dans le Tableau 1.

Tableau 1

Valeurs moyennes (\pm écart-type) des paramètres anthropométriques en fonction de chaque groupe de sujets

	Âge (années)	Masse (kg)	Taille (cm)
Échantillon total ($n = 109$)	$21,0 \pm 4,7$	$67,0 \pm 8,3$	$177,7 \pm 6,5$
Âge (ans)			
G15–17 ($n = 33$)	$16,0 \pm 0,8^a$	$63,6 \pm 9,5^a$	$176,1 \pm 8,2$
G18–22 ($n = 33$)	$19,4 \pm 1,4$	$67,3 \pm 7,2$	$178,7 \pm 5,0$
G > 22 ($n = 43$)	$26,5 \pm 1,9$	$69,4 \pm 7,3$	$178,1 \pm 5,8$
Spécialité			
Route ($n = 95$)	$20,4 \pm 4,5^b$	$66,8 \pm 8,4$	$177,5 \pm 6,8$
VTT ($n = 14$)	$25,1 \pm 3,7$	$68,6 \pm 7,1$	$178,6 \pm 3,6$
Niveau			
National ($n = 44$)	$23,2 \pm 4,1^b$	$68,2 \pm 5,2$	$179,6 \pm 4,6^b$
Régional ($n = 65$)	$19,6 \pm 4,5$	$66,2 \pm 9,8$	$176,3 \pm 7,2$
Période			
<i>On</i> ($n = 33$)	$20,5 \pm 4,4$	$67,1 \pm 6,5$	$178,1 \pm 5,8$
<i>Off</i> ($n = 76$)	$21,3 \pm 4,8$	$66,9 \pm 9,0$	$177,5 \pm 6,8$

Les résultats marqués de l'un de ces symboles diffèrent significativement ($p < 0,05$).

^a En revanche si cette hypothèse n'est pas vérifiée pour l'une de ces populations nous avons utilisé le test de Kruskal-Wallis.

^b Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, nous avons utilisé le test de Mann-Whitney.

2.2. Protocole

Tous les sujets ont été évalués dans le cadre du suivi médical obligatoire imposé par la FFC après avoir donné leur consentement personnel éclairé. Tous étaient familiarisés avec les protocoles et le matériel utilisé pour cette étude.

Dès leur arrivée au laboratoire, les sujets sont pesés et mesurés avec des méthodes classiques. Après un examen clinique complet permettant d'éliminer une éventuelle contre-indication médicale, un électrocardiogramme (ECG) est réalisé au repos avant d'effectuer un test d'effort maximal sur ergocycle. Les sujets ont été préalablement invités de s'abstenir de tout effort physique vigoureux au cours des 24 heures précédant le test, de la prise d'excitants (café, tabac, alcool) ou de médicaments et de consommer leur dernier repas au moins trois heures avant le début du test.

Le test d'effort est réalisé sur un cycloergomètre à frein électromagnétique de type Orion Pro Training 7016[®] (Toulouse, France), équipé des propres pédales du sujet. L'ensemble de ses constituants (selle, guidon, cadre) est réglable pour s'adapter aux caractéristiques morphologiques du sujet. Le logiciel intégré prend en compte la vitesse de pédalage (Cad, en rpm) et le développement (Dev, en m). La puissance (P , watt) et la vitesse (V , km/h) sont ainsi calculées à partir des données précédentes.

Les gaz expirés sont collectés par l'intermédiaire d'un masque facial relié à un pneumotachographe calibré avec une seringue de 31 et recueillis par méthode cycle par cycle sur CPX/D System de MedGraphics[®] (St Paul, MN), préalablement calibré à l'aide d'un gaz étalon MSR[®] (5 % CO_2 , 12 % O_2 , BAL N_2).

La mesure de la fréquence cardiaque (FC) est réalisée à l'aide d'un cardiofréquencemètre (Polar® M31™, Kempele, Finland) et couplée à un enregistrement électrocardiographique (CASE™, G.E. Medical system®) avec visualisation continue de 12 dérivations ECG (SCOP LIVE 6 de CPX®, St Paul, MN).

Les lactates sont dosés à l'aide d'un appareil Microzym SGI® préalablement étalonné avant chaque analyse par deux solutions témoins de lactate à des concentrations de 0,67 mmol/l et 13,3 mmol/l (Laboratoire Espace Médical, Toulouse). La mesure s'effectue à partir d'un échantillon sanguin de 10 µl prélevé au lobule de l'oreille préalablement chauffé à l'aide d'une pommade réulsive à la capsicaïne (Hemade® Biolyon Oxoid™).

Après cinq minutes d'échauffement à 50 W, les sujets subissent une incrémentation de puissance à une cadence imposée de 90 rpm, par paliers de 50 W toutes les trois minutes entrecoupée d'une pause d'une minute durant laquelle est réalisé un prélèvement sanguin. Le test se termine dès lors que le sujet ne peut plus maintenir cette cadence ou à l'épuisement du sujet.

Pour notre étude, les paramètres suivants ont été retenus : puissance (P , en watt), consommation d'oxygène (VO_2 par l/min), rejet de gaz carbonique (VCO_2 , l/min), quotient respiratoire (RER), fréquence cardiaque (FC, bpm) et lactatémie (La, mmol/l).

La consommation maximale d'oxygène correspond à la plus haute valeur atteinte par le sujet au cours du test. Il est à noter que tous les tests ont répondu aux critères d'exhaustivité [7] : RER > 1,05 ; $FC_{max} \pm 10$ bpm = FC_{max} théorique ($220 - \text{âge}$) ; [La] de fin de test supérieure ou égale à 8 mmol/l. Le seuil « anaérobie » (LT) a été fixé arbitrairement à la puissance correspondant à une lactatémie de 4 mmol/l.

Les valeurs moyennes de la consommation d'oxygène lors de la dernière minute de chaque palier ont été retenues pour

construire les régressions en fonction de la puissance (régression globale, régressions avant et après LT) et calculer les équations correspondantes.

2.3. Analyse statistique

Toutes les statistiques descriptives (moyennes et écart-types) et analytiques sont calculées au moyen d'un logiciel informatique (StatView 5®, SAS, États-Unis). La comparaison des groupes en ce qui concerne l'effet de l'âge est effectuée au moyen d'une Anova lorsque chaque groupe d'âge respecte l'hypothèse de normalité et dans le cas contraire (si l'un des trois groupes ne respecte pas cette hypothèse) au moyen d'un test de Kruskal-Wallis. Pour les autres effets (spécialité, niveau et période), étant donné qu'il y a deux groupes à comparer dans chaque cas, cette comparaison a été faite avec un test t de Student dans les cas où l'hypothèse de normalité est respectée, sinon le test non paramétrique de Mann-Whitney est préféré. Les valeurs moyennes des paramètres de régression, avant et après le seuil, sont comparées au moyen du test de Wilcoxon (utilisé lorsque les valeurs sont appariées mais pas suivant la loi normale). Le seuil de significativité statistique est fixé pour tous les tests à 5 %.

3. Résultats

3.1. Données anthropométriques

Dans le Tableau 1, on observe que le groupe G15-17 est de masse significativement inférieure aux deux autres groupes (avec Kruskal-Wallis car concernant la normalité, $p < 0,05$ pour les trois groupes). Les cyclistes du groupe « route » sont significativement plus jeunes que ceux du groupe « VTT »

Tableau 2
Valeurs moyennes (\pm écart-type) des paramètres maximaux pour chaque groupe

	P (watt)	VCO_2 (l/min)	VO_2 (l/min)	FC (bpm)	La (mmol/l)
Échantillon total	359,1 \pm 48,9	4,6 \pm 0,6	4,2 \pm 0,5	192,1 \pm 8,8	9,8 \pm 2,5
Âge (ans)					
G15–17	320,7 \pm 42,3 ^b	4,2 \pm 0,7 ^a	3,9 \pm 0,5 ^a	195,0 \pm 7,5	10,7 \pm 2,7 ^a
G18–22	365,9 \pm 41,8	4,7 \pm 0,5	4,4 \pm 0,5	190,5 \pm 10,7	9,8 \pm 2,6
G > 22	383,2 \pm 40,7	4,7 \pm 0,5	4,4 \pm 0,4	191,0 \pm 7,8	8,5 \pm 2,5
Spécialité					
Route	354,4 \pm 49,7 ^c	4,5 \pm 0,6	4,2 \pm 0,5	192,2 \pm 9,2	9,7 \pm 2,7
VTT	390,4 \pm 28,2	4,8 \pm 0,4	4,4 \pm 0,4	191,0 \pm 5,4	8,9 \pm 2,7
Niveau					
National	391,1 \pm 37,5 ^d	4,8 \pm 0,5 ^c	4,5 \pm 0,4 ^c	189,6 \pm 8,2 ^d	7,7 \pm 2,1 ^d
Régional	337,4 \pm 43,7	4,4 \pm 0,7	4,0 \pm 0,5	193,7 \pm 8,9	10,8 \pm 2,3
Période					
On	368,0 \pm 38,3	4,7 \pm 0,6	4,4 \pm 0,5 ^c	191,0 \pm 8,4	9,4 \pm 2,0
Off	355,2 \pm 52,6	4,5 \pm 0,6	4,1 \pm 0,5	192,6 \pm 9,0	9,6 \pm 3,0

Les résultats marqués de l'un de ces symboles diffèrent significativement ($p < 0,05$).

^a Lorsque nous comparons trois populations, nous utilisons une Anova lorsque l'hypothèse de normalité est vérifiée.

^b En revanche si cette hypothèse n'est pas vérifiée pour l'une de ces populations nous avons utilisé le test de Kruskal-Wallis.

^c Lors de la comparaison de deux groupes et lorsque l'hypothèse de normalité est vérifiée, nous avons utilisé le test t de Student.

^d Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, nous avons utilisé le test de Mann-Whitney.

Tableau 3
Valeurs moyennes (\pm écart-type) des paramètres au seuil pour chaque groupe

	<i>P</i> (watt)	VCO ₂ (l/min)	VO ₂ (l/min)	FC (bpm)
Échantillon Total	265,6 \pm 53,2	3,5 \pm 0,6	3,5 \pm 0,6	171,5 \pm 10,6
Âge (ans)				
G15–17	228,5 \pm 42,3 ^b	3,3 \pm 0,5 ^a	3,2 \pm 0,5 ^a	174,1 \pm 9,6
G18–22	275,8 \pm 55,2	3,7 \pm 0,6	3,6 \pm 0,6	170,4 \pm 10,6
G > 22	286,2 \pm 44,6	3,7 \pm 0,5	3,6 \pm 0,5	170,3 \pm 11,2
Spécialité				
Route	262,0 \pm 54,3	3,5 \pm 0,6	3,4 \pm 0,6	171,6 \pm 11,0
VTT	289,7 \pm 37,7	3,7 \pm 0,4	3,7 \pm 0,4	170,8 \pm 8,1
Niveau				
National	307,9 \pm 30,7 ^c	3,9 \pm 0,5 ^d	3,8 \pm 0,5 ^c	171,5 \pm 9,3
Régional	236,9 \pm 45,5	3,3 \pm 0,5	3,3 \pm 0,5	171,5 \pm 11,4
Période				
On	281,6 \pm 40,5 ^d	3,8 \pm 0,5 ^c	3,7 \pm 0,5 ^d	172,6 \pm 8,0
Off	258,6 \pm 56,6	3,4 \pm 0,6	3,4 \pm 0,6	171,0 \pm 11,5

Les résultats marqués de l'un de ces symboles diffèrent significativement ($p < 0,05$).

^a Lorsque nous comparons trois populations, nous utilisons une Anova lorsque l'hypothèse de normalité est vérifiée.

^b En revanche si cette hypothèse n'est pas vérifiée pour l'une de ces populations nous avons utilisé le test de Kruskal-Wallis.

^c Lors de la comparaison de deux groupes et lorsque l'hypothèse de normalité est vérifiée, nous avons utilisé le test *t* de Student.

^d Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, nous avons utilisé le test de Mann-Whitney.

d'après le résultat du test de Mann-Whitney utilisé ici du fait que le groupe « route » ne soit pas distribué normalement ($p < 0,0001$). Les cyclistes de niveau « national » sont significativement plus âgés et plus grands que leurs homologues de niveau « régional » (utilisation du test de Mann-Whitney, car $p < 0,01$ concernant le test de normalité de ces deux populations pour cette variable). Aucune différence concernant l'âge, la masse et la taille n'est observée en fonction de la période.

3.2. Paramètres maximaux

Le Tableau 2 présente l'ensemble des valeurs maximales. Concernant l'ensemble de l'échantillon, les critères d'exhaustivité sont remplis : RER = $1,09 \pm 0,1$; FC_{max} = $192,1 \pm 8,8$ bpm ; La = $9,8 \pm 2,5$ mmol/l. Pour les groupes d'âge, G15–17 présente les valeurs significativement les plus basses de *P*, VO₂ et VCO₂, tandis que le groupe le plus âgé présente les valeurs de lactate significativement les plus basses sachant que nous avons utilisé le test de Kruskal-Wallis pour la variable *P*, car le groupe le plus âgé ne respecte pas l'hypothèse de normalité ($p = 0,0052$) pour cette variable. Concernant la spécialité, *P* est significativement supérieure pour les VTT. Pour le niveau, les régionaux présentent des valeurs significativement inférieures de *P*, VO₂ et VCO₂ et des valeurs significativement supérieures de FC et de La. Pour les variables *P*, FC et La, les différences ont été évaluées au moyen d'un test de Mann-Whitney, car le groupe des nationaux n'est pas distribué selon l'hypothèse de normalité pour la variable *P* ($p = 0,018$) et la variable FC ($p = 0,0141$). La variable lactate, pour le groupe des régionaux, n'est pas normalement distribuée ($p = 0,0419$). La consommation d'oxygène est significativement supérieure à la période *on* par rapport à la période *off*.

3.3. Paramètres physiologiques enregistrés au seuil « anaérobie »

Le Tableau 3 présente les résultats des paramètres physiologiques enregistrés au seuil « anaérobie » fixé à un taux de lactate de 4 mmol/l. Pour les groupes d'âge, G15–17 présente les valeurs significativement les plus basses pour *P*, VO₂ et VCO₂. Concernant la variable *P*, nous avons utilisé le test de Kruskal-Wallis, car le groupe le plus âgé n'est pas distribué normalement ($p = 0,091$). Pour le niveau, les nationaux présentent les valeurs significativement les plus hautes pour *P*, VO₂ et VCO₂ (pour VCO₂, la distribution des nationaux ne suit pas la loi normale, car $p = 0,0424$ d'où l'utilisation du test de Mann-Whitney alors que pour les variables *P* et VO₂, la comparaison a été faite à l'aide d'un test *t* de Student). Enfin, classé suivant les périodes, les valeurs de *P*, VCO₂ et VO₂ de la période compétitive (période *on*) sont significativement supérieures à celles de la période *off*. Les variables *P* et VO₂ ont fait l'objet d'un test de Mann-Whitney, car la variable *P* du groupe en période hors compétition ne respecte pas l'hypothèse de normalité ($p = 0,0208$), tout comme la variable VO₂ du groupe en période compétitive ($p = 0,0326$). Pour l'échantillon total, le RER est égal à un et *P* représente 71,3 % de *P*_{max}, la valeur de VO₂ se chiffre à 82,4 % de VO_{2max}, celle de VCO₂ à 77,4 % de VCO_{2max} et celle de FC à 89,3 % de FC_{max}.

3.4. Cinétique de la consommation d'oxygène

Le Tableau 4 présente les valeurs des pentes. Que ce soit pour l'échantillon total et quel que soit le groupe étudié, la valeur de la pente après le seuil est significativement inférieure à celle observée avant le seuil ($p < 0,001$), tel qu'illustré dans la Fig. 1. Pour la spécialité, la pente après est significativement

Tableau 4
Valeurs moyennes (\pm écart-type) des pentes et des R^2 pour chaque groupe

Groupes	Pente avant seuil	R^2 avant seuil	Pente après seuil	R^2 après le seuil
Échantillon total	1,057 \pm 0,117	0,992 \pm 0,007	0,800 \pm 0,305	0,9010 \pm 0,12
Âge (ans)				
G15–17	1,081 \pm 0,119	0,991 \pm 0,009	0,776 \pm 0,272	0,879 \pm 0,133
G18–22	1,059 \pm 0,109	0,992 \pm 0,007	0,849 \pm 0,344	0,914 \pm 0,115
G >22	1,038 \pm 0,120	0,994 \pm 0,005	0,782 \pm 0,300	0,908 \pm 0,107
Spécialité				
Route	1,060 \pm 0,118	0,992 \pm 0,007	0,824 \pm 0,307	0,897 \pm 0,121
VTT	1,042 \pm 0,109	0,992 \pm 0,006	0,645 \pm 0,250*	0,932 \pm 0,089
Niveau				
National	1,025 \pm 0,110*	0,992 \pm 0,006	0,836 \pm 0,369	0,909 \pm 0,125
Régional	1,079 \pm 0,117	0,993 \pm 0,007	0,776 \pm 0,253	0,896 \pm 0,113
Période				
On	1,083 \pm 0,100	0,990 \pm 0,008	0,829 \pm 0,313	0,887 \pm 0,126
Off	1,046 \pm 0,122	0,993 \pm 0,006	0,787 \pm 0,302	0,907 \pm 0,114

Toutes les pentes sont significativement différentes entre avant et après quels que soient les groupes ($p < 0,001$); * : différence significative à l'intérieur de chaque groupe ($p < 0,001$).

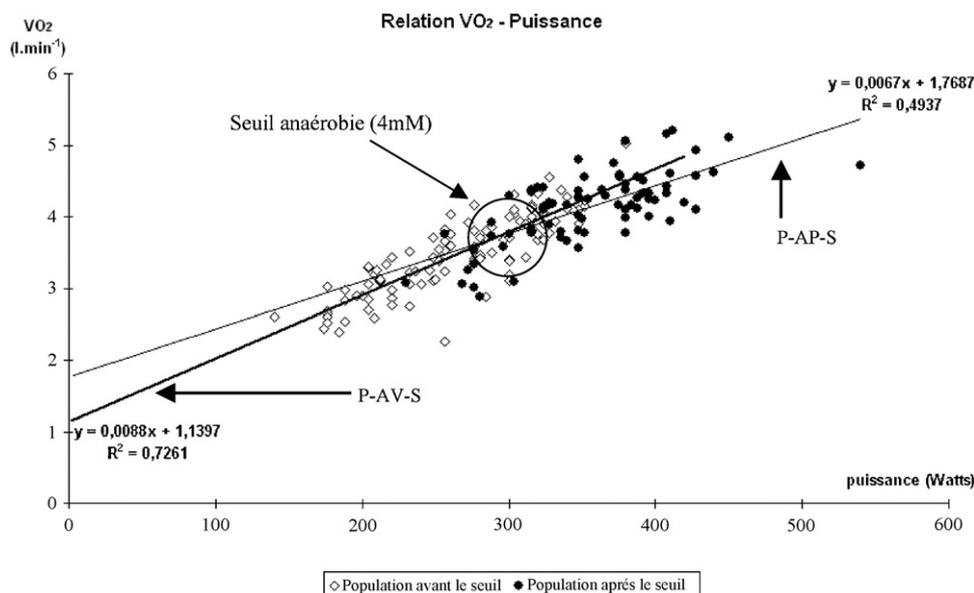


Fig. 1. Représentation schématique des courbes de tendance pour l'échantillon total.
P-AV-S : pente avant le seuil ; P-AP-S : pente après le seuil.

inférieure pour le groupe VTT par rapport au groupe « route ». En ce qui concerne le niveau, la pente avant des nationaux est significativement inférieure à celle des régionaux.

D'un point de vue qualitatif et pour être précis, si l'examen de l'ensemble de l'échantillon montre majoritairement une diminution de la pente après le seuil chez 77 % des sujets, il existe cependant une augmentation de celle-ci chez 23 % des sujets explorés.

4. Discussion

Le but de notre étude a été de se focaliser sur une population sportive ciblée, constituée de cyclistes amateurs et d'étudier, dans des conditions de mesure standardisées, l'influence pos-

sible de différents facteurs (âge, spécialité, niveau, moment de la saison) sur l'allure de la cinétique de la consommation d'oxygène.

Dans ce travail portant sur une population totale de 109 sujets, on observe au-delà du seuil « anaérobie » fixé arbitrairement à 4 mmol/l, un infléchissement de la consommation d'oxygène par rapport aux valeurs attendues dans le cadre de la relation linéaire puissance- VO_2 , que ce soit pour l'ensemble de la population ou pour les différents sous-groupes étudiés.

Ce résultat est donc en accord avec les études de Lucia et al. [11,12] sur ergocyclomètres et de Bickham et al. [3] sur tapis roulant, ces auteurs ayant montré également une déflexion de la consommation d'oxygène au-delà du seuil « anaérobie » ou du seuil ventilatoire.

En revanche, nos résultats et ceux de Lucia et al. [11,12] et de Bickham et al. [3] sont en contradiction avec de nombreux auteurs qui ont objectivé, à l'inverse, un excès de consommation d'oxygène [5,9,10,13,16–18].

Cette divergence dans le sens de la rupture de la linéarité pourrait s'expliquer par la disparité des protocoles utilisés et par la nature des populations étudiées dans la littérature.

Ainsi, parmi ces études, huit ont été réalisées sur cycloergomètre [5,10–13,16–18] et deux sur tapis roulant [3,9]. Par ailleurs, la consommation d'oxygène a été analysée soit par chambre de mélange [5], soit par sac de Douglas [9,13] ou le plus souvent par la méthode du cycle par cycle [3,10–12,16–18].

Deux études ont été réalisées sur des cyclistes professionnels [11,12], une sur des coureurs à pied entraînés [3], les sept autres sur des sujets non entraînés [5,9,10,13,16–18].

Enfin, à l'exception de l'étude de Zoladz et al. [17] portant sur 26 sujets, toutes les autres comportent des effectifs relativement restreints compris entre cinq et 12 sujets [3,5,9,10,11–13,16,18].

Notre étude porte sur divers échantillons répartis selon l'âge (G15–17 ans, G18–22 ans et G > 22 ans) la spécialité (route et VTT), le niveau de pratique (national et régional) et la période de la saison sportive au cours de laquelle le test a été effectué (*on* et *off*). L'ensemble de l'échantillon et tous les sous-groupes montrent une déflexion significative de la cinétique de la consommation de l'oxygène au-delà du seuil « anaérobie » (Cf. Tableau 4). Cette réponse constante permettrait d'exclure l'influence de l'âge, de la spécialité, du niveau de pratique et de la période de la saison sportive sur ce phénomène.

Bien que nos résultats aient été observés chez des sujets amateurs, ils sont en accord avec les conclusions de Lucia et al. [11,12] sur des cyclistes professionnels et celles de Bickham et al. [3] chez les coureurs à pied bien entraînés.

Cependant, les résultats de notre étude pourraient être biaisés par le fait que nous avons basé notre droite de régression sur le seuil à 4 mmol/l, largement supérieur aux seuils « anaérobie » et ventilatoire utilisés par les autres auteurs. Nous avons étudié cette éventualité à partir du seuil « anaérobie » (élévation de 0,5 mmol/l au-dessus de la valeur de repos) et les résultats (non illustrés) se sont révélés strictement identiques.

On ne peut également écarter l'argumentation de Jeukendrup [8] selon laquelle l'utilisation du Medgraphics® serait responsable de la déflexion, puisque selon Gore et al. [4] cet appareillage sous-estimerait la consommation d'oxygène de 10 à 12 % entre 100 et 300 W. On serait tenté de penser que toutes les études objectivant une déflexion de la cinétique de la consommation d'oxygène ont été réalisées sur Medgraphics®, cependant Lucia et al. [12] ont observé le même type de résultats sur un appareillage différent (Sensormedic®). De même, dans notre étude il convient de remarquer que 23 % des sujets présentent une augmentation de la cinétique de la consommation d'oxygène après le seuil. Cette différence des cinétiques observée chez nos sujets et la différence avec les autres études décrivant un excès de VO₂ sur des sujets non entraînés pourraient donc être en rapport avec le niveau d'entraînement initial des sujets.

Si la déflexion est un profil constant au sein de la population étudiée et dont l'explication physiologique reste à préciser, les différences individuelles de pente constitueraient-elles des facteurs discriminants dans l'évaluation des sujets ? Dans notre étude, les différences au niveau des pentes avant et après le seuil ne concernent que le groupe niveau et le groupe spécialité. Pour le niveau, on remarque que, par rapport aux régionaux, les nationaux ont une pente ($1,025 \pm 0,110$ versus $1,079 \pm 0,117$) et un intercept ($0,651 \pm 0,183$ versus $0,725 \pm 0,165$) avant le seuil, significativement inférieurs. Ces données, couplées avec les valeurs maximales et au seuil, semblent montrer un meilleur coût énergétique des nationaux. Pour la spécialité, on remarque que, par rapport aux routiers, les VTT ont une pente ($0,645 \pm 0,250$ versus $0,824 \pm 0,307$) significativement inférieure après le seuil, alors que pente avant, intercept avant, paramètres maximaux et paramètres au seuil ne sont pas significativement différents. Il semble donc que les routiers mettent en jeu leur filière aérobie par utilisation plus importante des filières lipidiques après le seuil. Il est à préciser que l'étude de covariance a éliminé toute influence de l'âge sur ces résultats.

Au total, il ressort de notre étude que, chez des cyclistes amateurs, la cinétique de la consommation d'oxygène n'est pas linéaire. Elle présente au-delà du seuil anaérobie une déflexion, quels que soient l'âge, le niveau, la spécialité, la période de compétition. Par ailleurs, l'étude des pentes avant et après le seuil anaérobie peut apporter des critères supplémentaires de discrimination, par rapport aux concepts classiques analysés au cours de tests d'effort.

Références

- [1] Astrand PO, Rhyning I. A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work. *J Appl Physiol* 1954;7(2):218–21.
- [2] Astrand PO, Rodahl K. Précis de physiologie de l'exercice physique. 4^e ed Paris: Masson; 1994.
- [3] Bickham DC, Gibbons C, Le Rossignol PF. VO₂ is attenuated above the lactate threshold in endurance-trained runners. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36(2):297–301.
- [4] Gore CJ, Clark RJ, Shipp NJ, Van der Ploeg GE, Withers RT. CPX/D underestimates VO₂ in athletes compared with an automated Douglas bag system. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35(8):1341–7.
- [5] Green S, Dawson BT. The oxygen uptake-power regression in cyclists and untrained men: implications for the accumulated oxygen deficit. *Eur J Appl Physiol* 1995;70(4):351–9.
- [6] Hansen JE, Casaburi R, Cooper DM, Wasserman K. Oxygen uptake as related to work rate increment during cycle ergometer exercise. *Eur J Physiol* 1988;57(2):140–5.
- [7] Howley ET, Bassett Jr DR, Welch HG. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27(9):1292–301.
- [8] Jeukendrup A. Are world-class cyclists really more muscular efficient. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35(7):1238–9.
- [9] Jones AM, Carter H, Doust JH. A disproportionate increase in VO₂ coincident with lactate threshold during treadmill exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31(9):1299–306.
- [10] Londree BR, Moffitt-Gernstenberger J, Padfield JA, Lottman D. Oxygen consumption of cycle ergometry is nonlinear related to work rate and pedal rate. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29(6):775–80.
- [11] Lucia A, Hoyos J, Santalla A, Perez M, Chicharro JL. Kinetics of VO₂ in professional cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34(2):320–5.
- [12] Lucia A, Hoyos J, Santalla A, Perez M, Chicharro J. Curvilinear VO₂: power output relationship in a ramp test in professional cyclists: pos-

- sible association with blood hemoglobin concentration. *Jpn J Physiol* 2002;52(1):95–103.
- [13] Pedersen PK, Sorensen JB, Jensen K, Johansen L, Levin K. Muscle fiber type distribution and nonlinear $\dot{V}O_2$ -power output relationship in cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34(4):655–61.
- [14] Whipp BJ. Exercise bioenergetics and gas exchange. In: Leff AR, editor. *Cardio-pulmonary exercise testing*. Orlando: Grune and Straton; 1986. p. 1–21.
- [15] Wilmore JH, Costill DL. *Physiologie du sport et de l'exercice physique*. 2^e ed Louvain-la-neuve: De Boeck université; 2002.
- [16] Zoladz JA, Rademaker AC, Sargeant AJ. Non-linear relationship between O_2 uptake and power output at high intensities of exercise in humans. *J Physiol* 1995;488(1):211–7.
- [17] Zoladz JA, Duba K, Majerczak J. Oxygen uptake does not increase linearly at high power outputs during incremental exercise test in humans. *Eur J Appl Physiol* 1998;77(5):445–51.
- [18] Zoladz JA, Szkutnik Z, Majerczak J, Duba K. Detection of point in oxygen uptake during an incremental exercise test using recursive residuals: relationship to the plasma lactate accumulation and blood acid base balance. *Eur J Appl Physiol* 1998;78(4):369–77.

Résumé

Tout d'abord, nous avons étudié une population de 112 cyclistes réparties en trois niveaux amateurs. Ces sujets ont réalisé un test incrémental par palier de trois minutes. Des variables anthropométriques ainsi que physiologiques et physiques ont été étudiées à deux moments, au seuil lactique et au maximum de la $\dot{V}O_2$ pour chaque individu. Nous avons utilisé l'analyse discriminante pour obtenir au seuil lactique une fonction discriminante linéaire et à $\dot{V}O_{2\max}$ une fonction discriminante quadratique composées des variables les plus discriminantes.

Ensuite, pour 213 cyclistes professionnels, nous avons les valeurs de plusieurs hormones avant et après un test incrémental. Nous disposions également de paramètres physiques et physiologiques pour chaque athlète. Nous avons étudié le comportement de ces hormones et l'influence des paramètres physiques et physiologiques sur les valeurs « hors normes ». La régression multiple a permis d'établir un modèle linéaire composé des paramètres les plus significatifs expliquant la puissance. Il s'agit des variables : Taille, Ventilation anaérobie, Fréquence cardiaque anaérobie, Testostérone libre avant effort, Âge, LH avant effort, Prolactine avant effort et $\dot{V}O_{2\max}$.

Enfin l'étude de la lactatémie prélevée lors d'un exercice incrémental et jusqu'à 10 minutes après l'effort chez une population de cyclistes professionnels a permis, avec l'aide d'un modèle existant, de modéliser le comportement du lactate sanguin. Cette fonction décrivant l'évolution du lactate sanguin pendant toute la durée de l'effort permet d'effectuer une simulation sur le retour à un niveau basal.

Mots clés : analyse discriminante, régression multiple, modélisation, performance, cyclisme, physiologie de l'exercice, réponse hormonal.

Abstract

First, we studied a population of 112 cyclists divided into three levels amateurs. These subjects carried out an incremental test by three minute old stage. Anthropometric variables like physiological and physical were studied at two times, at the lactic threshold and at the maximum of the $\dot{V}O_2$ for each individual. We used discriminant analysis to obtain with the lactic threshold a linear discriminant function and in $\dot{V}O_{2\max}$ a quadratic discriminant function made up of the most significant variables.

Then, for 213 professional cyclists, we had the values of several hormones before and after an incremental test. We also had physical and physiological parameters for each athlete. We studied the behavior of these hormones and the impact of the physical and physiological parameters on the expected values. The multiple regression analysis allowed to establish a linear model made up of the most significant parameters explaining the power

Finally, the study of the lactatemy taken at an incremental exercise and for 10 minutes after exercise for a population of professional cyclists allowed, using an existing model, to modeling the blood lactate reaction. This function describing the blood lactate evolution throughout all exercise duration allow to carry out a simulation on the return to a basal level.

Key words: discriminant analysis, multiple regression, modelling, performance, cycling, physiology, hormonal response.