

2m11.3378.6

Université de Montréal

Prédiction du %FCmax lors d'efforts à intensité constante

par

Chamseddine Guinoubi

Département de kinésiologie

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

Juillet, 2005

©, Chamseddine Guinoubi, 2005



GV

201

U54

2006

V. 005

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

Prediction du %FCmax lors d'efforts à intensité constante

présenté par :

Chamseddine Guinoubi

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Jean Marc Lavoie
Président rapporteur

Luc Léger
Directeur de recherche

François Péronnet
Membre de jury

Mémoire accepté le :

SOMMAIRE

Connaître le %FCmax correspondant au %VO₂max ou à %vVO₂max est utile pour bien doser l'intensité de l'entraînement. Or les études précédentes ont établi cette relation lors d'efforts triangulaires alors que les athlètes s'entraînent au moyen d'efforts à charge constante caractérisés par des phénomènes de dérive de FC et VO₂ dérivent. L'objet de ce mémoire est donc d'étudier la relation %FCmax - %vVO₂max lors d'efforts d'intensité constante réalisés à différentes intensités. Il comprend deux parties, une revue bibliographique et une étude expérimentale.

Dans la revue de littérature, on décrit le fonctionnement des systèmes cardiovasculaire et respiratoire ainsi que les facteurs qui les influencent. On discute aussi de quelques méthodes de dosage de l'intensité.

Dans la deuxième partie constituée d'une étude expérimentale, on décrit comment évolue %FCmax en fonction de la durée et de l'intensité d'efforts à charge constante; l'intensité est exprimée en fonction de la vitesse atteinte à VO₂max (%vVO₂max) et quatre intensités sont retenues: 60, 70, 80 et 90 %vVO₂max. vVO₂max était préalablement déterminée lors d'une épreuve progressive. L'étude avait aussi pour but de développer des équations permettant de prédire l'évolution de %FCmax en fonction du temps et de l'intensité. Les variables indépendantes de ces équations étaient le temps, l'intensité, le niveau d'endurance (temps limite à 80 ou 90%vVO₂max), le VO₂max et la courbe étalon %FCmax/%VO₂max du test triangulaire, la variable dépendante est %FCmax. Des sujets endurants (n=10) et non-endurants (n=15) ayant 25,4 ± 7,25 ans (moyenne ± écart type) et un VO₂max de 55,6 ± 8,1 ml kg⁻¹ min⁻¹ ont participé à l'étude.

Les équations individuelles développées, avec valeurs de r entre 0,974 et 0,993 et de Syx, entre 1,2 et 1,9 ml kg⁻¹ min⁻¹, selon les sujets, sont plus valides que les équations collectives (une seule équation pour tous les sujets) avec des valeurs de r entre 0,81 à 0,89 et de Syx, entre 4,1 et 5,3 ml kg⁻¹ min⁻¹. Seuls les modèles individuels sont suffisamment exacts pour des applications individuelles alors que les modèles collectifs sont utiles pour décrire l'évolution moyenne de %FCmax en fonction du temps, de l'intensité et du niveau d'endurance. Nos résultats ont aussi montré que le tLim 90% est le meilleur indicateur d'endurance.

Mots clefs: fréquence cardiaque, VO₂, intensité, modèles de prédiction, dérive

SUMMARY

Knowing %HRmax corresponding to %VO₂max is very useful for training applications. However previous studies established equivalences from multistage tests whereas endurance athletes usually train at constant speeds for long periods of time.

This master thesis includes two parts, a bibliographical review and an experimental study.

In the review of literature, the cardiovascular and respiratory systems as well as the factors that influence them, are described. Methods of setting training intensity are also described

The experimental study is an attempt to predict %HRmax while running at constant speeds of 60, 70, 80 and 90% of VO₂max speed (vVO₂max) measured with a previous multistage test. Independent variables were time, intensity, endurance level (limit time at 80 or 90 %vVO₂max), VO₂max, and the multistage %HRmax/%VO₂max calibration curve. Endurance trained (n=10) and untrained (n=15) subjects of 25.4±7.25 year old (mean ± SD) and VO₂max of 55,6±8,1 ml kg⁻¹ min⁻¹ participated in the study.

Individual models were more accurate with r values of 0.974-0.993 and Syx of 1.2-1.95 ml kg⁻¹ min⁻¹. Collective models follow with r values of 0.81-0.89 and Syx of 4.1-5.3 ml kg⁻¹ min⁻¹. Only individual models are accurate enough for individual applications while collective models best describe average evolution of %HRmax as a function of time, intensity and endurance level. Besides time and intensity (%vVO₂max), tLim at 90 %vVO₂max, proves to be the best single predictor.

Key words: heart rate, VO₂, intensity, prediction models, drift

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	iii
SUMMARY	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	xi
DEDICACE	xii
REMERCIEMENTS	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
REVUE DE LITTÉRATURE.....	2
ADAPTATIONS CARDIO-RESPIRATOIRES LORS D'EXERCICES DE	
LONGUE DURÉE	2
I. Introduction	3
II. Le système cardiovasculaire	4
II.1. Adaptations cardiovasculaires au cours de l'effort prolongé	4
II.1.1 Adaptations générales au cours de l'exercice prolongé.....	5
II.1.2 Adaptations cardiovasculaires au cours d'un effort avec sollicitation	
des membres inférieurs.....	5
II.1.3 Adaptations cardiovasculaires au cours d'un effort avec sollicitation	
des membres inférieurs et supérieur	6
II.1.4 Adaptations cardiovasculaires on fonction de la position de l'exercice	7
II.1.5 Entraînement et système cardiovasculaire	8

II. 2 Effets de la température et du niveau de l'hydratation sur les adaptations cardiovasculaires.....	9
II.2.1 Effet climatique et réaction du système cardiovasculaire.....	9
II.2.1.a. Réactions cardiovasculaires dans un environnement chaud	10
II .2.1.b. Effets de la production de chaleur par le corps au cours d'exercice prolongé impact sur le système cardiovasculaire	10
II .2.1.c. Effets du froid sur le système cardiovasculaire.....	11
II .2.1.d. L'entraînement favorise l'adaptation cardiovasculaire face à la chaleur.....	11
II.2.2 Niveau d'hydratation et réaction cardiovasculaire	12
II.3. Phénomène expliquant de la réaction cardiovasculaire pendant l'effort prolongé	13
III. Le phénomène de dérive cardiovasculaire	15
IV. Le système respiratoire	17
IV.1. Réponse respiratoire au cours d'un effort	17
IV.1.1 Réponse respiratoire au cours d'un effort prolongé	17
IV.1.2. Entraînement et système respiratoire.....	17
IV.1.3.Facteurs influençant la réaction respiratoire.....	18
V. Procédures pour le dosage de l'intensité.....	20
VI. Conclusion	23
REFÉRENCES.....	24

PARTIE EXPERIMENTALE.....	32
PREDICTION DU %FC_{max} LORS D'EFFORT A INTENSITE CONSTANTE .	
.....	32
I.Introduction	33
II. Méthodologie.....	35
II.1. Sujets.....	35
II.2. Démarche expérimentale.....	35
II.2.1. Tests.....	36
II.2.1.a Test triangulaire.....	36
II.2.1.b Tests rectangulaires.....	36
II.3. Analyse des données.....	36
III. Résultats	38
III.1. Approche individuelle	40
III.2. Approche collective	44
III.3 Approche collective à partir de la fréquence cardiaque prédite de la	
relation %FC =220-Age.....	50
III.4 : Efforts triangulaires et efforts rectangulaires.....	53
III.5 Sensibilité des modèles aux effets systématiques de l'endurance sur les	
valeurs du % FC_{max} prédites.....	54
III.6 Récapitulation générale sur les résultats.....	54
IV Discussion	57
V. Conclusion.....	65
REFÉRENCES.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des sujets	35
Tableau 2. Paramètres des régressions développées pour prédire %FCmax lors d'exercices prolongés continus à différentes intensités	37
Tableau 3 : Équations générales prédisant le %FCmax en fonction du temps et de l'intensité lors d'efforts à intensité constante en tenant compte ou non du degré d'endurance des sujets, de leur VO ₂ max, de leur FCmax réelle ou prédite et du %FCmax correspondant à la même intensité lors d'un test progressif.....	39
Tableau 4 : Régressions individuelles No 1 pour 3 sujets de chaque groupe	40
Tableau 5 : Régressions individuelles No 18 pour 3 sujets de chaque groupe	40
Tableau 6 : Équations collectives (5, 7, 4, 12, 16 et 18) pour toute la population....	45
Tableau 7 : Équations collectives (1, 2, 4, 7, 12, 15 et 18) avec %FC prédite de la relation ($\%FC = 220 - \text{Age}$).	50
Tableau 8. Équations rapportées dans la littérature pour efforts triangulaires sur tapis	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Relation des valeurs prédites et observées pour l'équation 1 sujet 1	41
Figure 2 : Relation des valeurs prédites et observées pour l'équation 18 sujet 1	41
Figure 3 : : Évolution de %FC prédite et observée à 60, 70, 80 et 90 %vVO ₂ max, pour l'équation 1, Sujet 1.....	42
Figure 4 : Évolution de %FC prédite et observée à 60, 70, 80 et 90 %vVO ₂ max, pour l'équation 18, Sujet 1.	43
Figure 5 : Relation entre valeurs prédites et observées pour la meilleure équation 5.45	
Figure 6 : Relation entre valeurs prédites et observées pour la pire équation 18	46
Figure 7 : Équations collectives 5, 7, 4, 12, 16 et 18 pour un seul sujet (1) Les figures démontrent la différence entre l'évolution des valeurs prédites et observées des équations pour une seule personne.	47
Figure 8 : Équation collective 5 pour 6 sujets. Évolution des valeurs prédites et observées pour la meilleure équation pour 6sujets.	48
Figure 9 : Équation collective 18 pour 6 sujets Évolution des valeurs prédites et observées pour la pire équation pour 6sujets.	49
Figure 10 : Relation entre valeurs prédites et observées pour la meilleure équation (Eq 2).	51
Figure 11 : Relation entre valeurs prédites et observées pour la pire équation Eq18	51
Figure 12 : Évolution du %FC prédite et observée pour 4 intensités (60, 70, 80 et 90 %) de vVO ₂ max, pour l'équation (2) sujet (1) avec l'utilisation de la relation (%FC= 220-age).	52
Figure 13 : Évolution du %FC prédite et observée pour 4 intensités (60, 70, 80 et 90 %) de vVO ₂ max, pour l'équation (18) sujet (1) avec l'utilisation de la relation 220-age.....	52
Figure 14 . Prédiction du %FCmax à partir du %vVO ₂ max obtenu lors d'efforts continus progressifs et constant à %vVO ₂ max variés.....	53
Figure 15 : Effet moyen du niveau d'aptitude physique sur les valeurs du %FCmax en fonction de la durée de l'effort à 60 et 80 %vVO ₂ max pour deux sujets fictifs ayant respectivement des tLim à 90 %vVO ₂ max de 10 et 20 minutes en utilisant un modèle d'équation où le niveau athlétique est dichotomiquement pris en compte (Bon=1 et Faible=0, Eq 16).	55
Figure 16 : Effet moyen du niveau d'aptitude physique sur les valeurs du %FCmax en fonction de la durée de l'effort à 60 et 80 %vVO ₂ max pour deux sujets fictifs ayant respectivement des tLim à 90 %vVO ₂ max de 10 et 20 minutes en utilisant un modèle d'équation où la valeur exacte de tLim à 90 %vVO ₂ max est prise en compte (Eq 7).	55
Figure 17 : Valeurs de la corrélation de quelques équations représentatives (Individuelles les 2 première en partant de la gauche, Collectives observés les 6 du milieu, Collectives prédites les 2 dernière a droites.	56
Figure 18 : Valeurs de l'erreur type estimée de quelques équations représentatives (individuelles les 2 première en partant de la gauche, Collectives observés les 6 du milieu, Collectives prédites de la relation les 2 dernière a droites.....	56

Figure 19. Courbes rapportées dans la littérature pour efforts triangulaires sur tapis roulant. Courbe surlignée: présente étude. Courbes en pointillés établies en excluant les valeurs maximales non linéaires.....	59
Figure 20. Courbes collectives obtenues en incluant ou non les valeurs au-dessus de 85 %vVO ₂ max lors du test progressif.....	60
Figure 21. %VO ₂ max ou %vVO ₂ max comme variable indépendante.....	61

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Symboles & abréviations	Signification
E	sujets entraînés
E1 TL 80	sujets considérés comme entraînés pour un temps limite supérieur à 30min à 80 % vVO ₂ max
E1 TL VO₂max	sujets considérés comme entraînés pour un VO ₂ max supérieur à 60 ml kg ⁻¹ min ⁻¹
FC	fréquence cardiaque
FCmax	fréquence cardiaque maximale
%FCmax	pourcentage de fréquence cardiaque maximale
%FCtri	pourcentage de la FCmax lors du test triangulaire
NE	sujets non-entraînés
tLim à 80%	temps limite à 80 % vVO ₂ max
tLim à 90%	temps limite à 90 % vVO ₂ max
VMA	vitesse à VO ₂ max
%VMA	pourcentage de VMA
VO₂max	consommation maximale d'oxygène
%VO₂max	pourcentage VO ₂ max
%vVO₂max	pourcentage de la vitesse à VO ₂ max (= %VMA)

DEDICACE

Aux grands absents : Amor Guinoubi et Ali Bourara

REMERCIEMENTS

Mes plus grands remerciements s'adressent à ma mère, mon père, ma sœur et banoun, ainsi que tout le reste de la famille et les amis en Tunisie, qui par leurs encouragements et leur soutien constant, m'ont permis d'en arriver jusque là.

J'exprime aussi ma plus grande gratitude, mon profond respect à mon professeur, Luc Léger, pour son apport et son grand cœur. Ce fut un honneur de travailler avec un homme pareil.

Je remercie les professeurs du Département de kinésiologie, spécialement ceux qui mon enseigné et je pense plus particulièrement à: François Péronnet, Philippe Gardiner et Louise Béliveau, François Prince, Martin Brochu, Nathalie Folch.

Mes remerciements à mes amis et collègues étudiants pour leur entraide: Karim Toumi, Nabyl Bekraoui, Nicolas Thébaut et Jonathan Tremblay.

Un merci au personnel du secrétariat pour leur gentillesse et leur aide: Chantal Lalande, Lucille Caron, Johanne Roy, Francine Normandeau, Micheline Therrien, Lucie Senneville, et Pierre Beauchamp.

Je tiens à remercier aussi le responsable du laboratoire de physiologie de l'exercice, Arthur long, ainsi que François Lecot, qui m'ont appris à manipuler le matériel du labo.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ce mémoire comprend deux parties, la première est une récapitulation de quelques travaux de recherches sur les adaptations cardiovasculaires et respiratoires ainsi que sur les facteurs qui les influencent au cours de l'effort physique. Cela est important puisque ces deux systèmes ont un impact direct sur le %FCmax et %VO₂max susceptibles d'être maintenus lors d'efforts prolongés, problématique de notre étude expérimentale. Celle-ci, deuxième partie du mémoire, vise à développer des équations pour prédire le %FCmax lors d'efforts prolongés à partir de paramètres tel que le temps, l'intensité et le niveau d'endurance des sujets.

La revue de littérature contient trois parties importantes. La première porte sur le système cardiovasculaire; la deuxième, sur le système respiratoire et la troisième, sur quelques méthodes utilisées pour doser l'intensité de l'effort à l'entraînement.

La partie expérimentale présente trois types de modèles ou approches pour prédire %FCmax lors d'efforts prolongés à intensité constante à partir du temps, de l'intensité, du niveau d'endurance et/ou du VO₂max des sujets et à partir du %FCmax établi lors d'un test triangulaire étalon. Le premier modèle établit des équations communes ou collectives à partir des données de tous les sujets alors que le deuxième modèle porte sur des équations individuelles. Enfin, le troisième modèle utilise la FCmax prédite ($FC_{max} = 220 - AGE$) au lieu de FCmax obtenue en laboratoire lors d'efforts maximaux. La comparaison de ces modèles permet de quantifier la perte ou le gain d'exactitude selon les variables considérées dans chacun de ceux-ci.

Ce travail apporte des éclaircissements qui permettront de mieux doser l'intensité de l'entraînement prolongé.

REVUE DE LITTÉRATURE

ADAPTATIONS CARDIO-RESPIRATOIRES LORS D'EXERCICES DE LONGUE DURÉE

I. Introduction

Les adaptations, circulatoires et respiratoires lors des exercices de longues durées, ont fait l'objet de multiples recherches depuis longtemps déjà (Astrand et al. 1960; Saltin et Stenberg 1964; Ekelund 1967) et plus récemment (Fritzsche et al. 1999 et Gonzalez-Alonso et al. 2000). Ces adaptations et plus particulièrement leurs cinétiques de dérive, permettent de mieux comprendre et doser l'intensité de l'entraînement en endurance.

Dans la plupart des cas, l'intensité d'entraînement est exprimée en fonction de la vitesse de course ou de la fréquence cardiaque associées à un pourcentage de la consommation maximale d'oxygène (%VO₂max). Selon l'American College of Sports Medicine (1978), il est recommandé de situer l'intensité entre 40 et 85 %VO₂max pour une population normale. En revanche, pour les marathonien l'intensité en cours de compétitions se situe entre 68 et 85% du % VO₂max tout en pouvant parfois atteindre 100% (Maron et al. 1976). Sur la base de leur expérience, les entraîneurs pensent que l'intensité de l'entraînement des marathonien, et encore plus des coureurs de demi-fond et de fond court, devrait être plus élevée. La plage proposée par l'ACSM est donc davantage destinée à une population normale, de type plutôt sédentaire. Dans ce genre d'effort, la puissance aérobie et l'endurance aérobie sont les principaux facteurs limitatifs, puisque l'apport énergétique est presque exclusivement fourni par la filière aérobie.

Lors d'un exercice prolongé une multitude de changements surviennent pour faire face aux demandes métaboliques et ainsi favoriser l'adaptation physiologique à l'effort. Parmi ces adaptations, celles du système cardiovasculaire permettent d'approvisionner les muscles actifs en nutriments et en oxygène (O₂). La fréquence cardiaque (FC) permet en général d'en déterminer le niveau de fonctionnement. La contribution du système respiratoire est aussi importante puisque c'est lui qui fournit l'O₂ au système cardiovasculaire.

Sur le plan pratique, on se réfère davantage au % de la fréquence cardiaque maximale (%FCmax) pour doser l'intensité de l'exercice qu'au % de la consommation maximale d'oxygène (% VO₂max) puisque % FCmax, contrairement à %VO₂max, ne demande pas de matériel complexe pour être mesuré. Ces deux paramètres réagissent généralement de la même façon pour des intensités inférieures à 85 % du VO₂max (Rowell et al. 1964; Davies 1968). Toutefois, des modifications peuvent se produire dans l'évolution de FC et du VO₂ au fur et à mesure que l'effort se prolonge, modifications qui se concrétisent généralement par un phénomène de dérive de ces deux paramètres si l'intensité de l'effort est suffisamment élevée.

On va donc tenter de décrire ces phénomènes ainsi que les méthodes utilisées pour doser l'intensité de l'entraînement.

II. Le système cardiovasculaire

II.1. Adaptations cardiovasculaires au cours de l'effort prolongé

De toutes les sollicitations de la vie quotidienne normale, celle de l'exercice dynamique est la plus exigeante pour le système cardiovasculaire. Le stress de l'exercice est aussi utilisé cliniquement pour connaître l'état des malades et de déceler les anomalies qui touchent de près ou de loin le système. Une des fonctions les plus importantes du système cardiovasculaire est d'assurer le transport d'O₂ aux muscles responsables du travail mécanique accompli.

Nous allons maintenant présenter les principales adaptations du système cardiovasculaire pendant l'exercice dynamique et souligner quelques facteurs qui peuvent les influencer.

II.1.1 Adaptations générales au cours de l'exercice prolongé.

Pendant un exercice prolongé, une dérive de plusieurs paramètres est bien documentée. Les changements cardiovasculaires en fonction du temps d'exercice sont résumés par Rowell (1974) qui se réfère à plusieurs études

- Une élévation continue de FC sans changement du débit cardiaque (DC)
- Une chute continue du volume d'éjection systolique (VES)
- Une baisse progressive de la pression artérielle (PA)

De plus, Rowell (1974) ajoute que le VO_2 ainsi que la différence A-V O_2 , s'élève de 5% alors que le volume sanguin diminue de 5 -10 % ou moins pendant les premières minutes de l'exercice sans changement par la suite. Au niveau périphérique, il se produit une vasodilatation ainsi qu'une modification dans la distribution du sang (Ekelund 1967). Selon Rowell (1974), ceci s'explique par

- une vasodilatation progressive des zones actives du corps en raison d'une vasoconstriction splanchnique et rénale.
- une vasodilatation cutanée avec l'augmentation de la température cutanée
- des modifications du volume sanguin veineux au niveau cutané.

Les mécanismes expliquant ces adaptations ainsi que la description qualitative et quantitative du phénomène de dérive seront traités plus en détails dans les sections II.3 et III, respectivement.

II.1.2 Adaptations cardiovasculaires au cours d'un effort avec sollicitation des membres inférieurs

La plupart des études sont réalisées sur les membres inférieurs. Saltin et Stenberg (1964) ont effectué une étude où les sujets s'exercent sur vélo stationnaire pendant 180 min ou jusqu'à l'épuisement à 75 % du VO_{2max} suivi d'une

récupération de 90min, puis d'un un bref effort sous-maximal et d'un travail à VO_2 max. Les résultats montrent une légère baisse du volume sanguin et du VES lorsque l'exercice sous maximal est précédé d'un exercice fatiguant de 180 min par rapport au même exercice réalisé sans exercice préalable. Cependant au cours de l'effort maximal, le VES et le DC sont parfois inchangés et parfois plus élevés qu'en situation normale ce qui montre que la réaction du système cardiovasculaire est plus évidente lors d'un effort prolongé. Ekelund (1967) a effectué une série d'expériences où il a ajusté l'intensité jusqu'à ce que les sujets atteignent une fréquence cardiaque de 170 bats/min pendant une heure et ils ont aussi observé une diminution légère mais significative du VES ainsi que de la pression sanguine.

II.1.3 Adaptations cardiovasculaires au cours d'un effort avec sollicitation des membres inférieurs et supérieur

Existe-t-il des différences au niveau des exigences cardiovasculaires entre un exercice réalisé avec les membres supérieurs et inférieurs? Pimental et al. (1984) ont comparé la réponse physiologique lors du pédalage avec les membres supérieurs et inférieurs. Les sujets effectuaient une épreuve de 60 min à une intensité de 60 % du VO_2 pic respectif des deux types d'effort. Ils ont observé une FC de 26 bat/min plus basse au cours de l'exercice avec les bras. De ce fait les exigences cardiovasculaires sont nettement moins importantes pour le haut du corps que le bas lorsque l'intensité de l'effort est exprimée en pourcentage du VO_2 max respectif des deux types d'efforts. Mais, si l'intensité est exprimée de façon absolu (VO_2 en $L \text{ min}^{-1}$), le travail des bras devient alors plus exigeant (+26 bat/min) puisque réalisé avec une plus petite masse musculaire. Dans l'étude de Nielsen et al. (1984), la comparaison est faite entre un exercice sur ergocycle avec une épreuve de nage. L'intensité est aussi de 60% VO_2 max, mais la durée était supérieure (90min). Après une première phase rapide d'augmentation, FC continue lentement d'augmenter de 13 bat/min en moyenne lors des deux exercices, mais la nage présente des valeurs de 10 bat/min supérieures à celle du vélo stationnaire. Selon les deux dernières études, les exigences de la nage sont supérieures à celles du

pédalage avec les bras et du vélo stationnaire. Ceci peut s'expliquer par le fait que la masse musculaire totale mise en jeu par la natation est plus importante que lors des deux autres exercices puisque en plus des bras et du tronc les jambes exercent aussi un rôle important à la nage. Par conséquent, on peut dire que la masse musculaire mise en jeu tout autant que l'intensité de l'exercice affecte la réponse cardiovasculaire lors d'efforts prolongés.

II.1.4 Adaptations cardiovasculaires en fonction de la position de l'exercice

L'exercice prolongé en position assise provoque une diminution du VES et une augmentation de la FC ainsi qu'une baisse de la circulation sanguine dans les muscles actifs (Fritzsche et al. 1999). Gonzalez-Alonso et al. (1999) ont essayé de déterminer si la réduction du volume sanguin central était amoindrie par l'exercice en position couchée. Ils ont découvert que l'exercice en position couchée réduisait de deux tiers la diminution du VES et d'un tiers, l'augmentation de la FC. Notons que Saltin et Stenberg (1964) de leur côté n'ont pas observé de différence entre les deux positions; un déclin de 18 % du VES est noté dans les deux cas, ce qui paraît contradictoire à l'étude précédente. Gonzalez-Alonso et al. (1999) font remarquer que dans l'étude de Saltin et Stenberg (1964), le DC était maintenu constant lors de l'exercice en position assise, exercice de moindre intensité que dans leur étude. Ces différences sont-elles pour autant suffisantes pour expliquer ces différences? L'étude d' Ekelund et al. (1967) vient aussi en contradiction avec celle de l'équipe de Gonzalez-Alonso puisqu'ils rapportent des diminutions de 37.5 et 58.3 ml pour le volume du cœur par 10 bat/min d'augmentation de la FC pour des exercices à 71 et 67 du %W₁₇₀, en position assise et couchée respectivement.

Il est généralement admis que la circulation sanguine est facilitée en position couchée étant donné que le retour du sang vers la zone centrale s'effectue avec moins de difficulté qu'en position assise. Cela supporte davantage les données présentées par Gonzalez-Alonso et al. (1999). Quand aux deux autres études, plus anciennes, la complexité des mesures des paramètres cardiovasculaires mesurés à

cette époque et l'indisponibilité du matériel sophistiqué d'aujourd'hui, nécessaire à la réalisation de telles études, expliquent peut-être ces divergences.

II.1.5 Entraînement et système cardiovasculaire

L'effet de l'entraînement sur la fonction cardiaque au cours d'un exercice de longue durée a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs en physiologie de l'exercice. Suite à 16 semaines d'entraînement en endurance, Ekblom et al. (1968) ont démontré que la FC a baissé de 26 bat/min au cours de la charge sous maximale alors qu'au maximum, DC augmentait de 8 % dû à une augmentation prononcée du VES puisque FCmax restait inchangée. Dans une étude similaire plus récente avec un entraînement de course et de vélo de 12 semaines, Spina et al. (1992) montrent que VES des sujets non entraînés baisse au cours d'exercice à intensité élevée alors qu'il atteint un plateau suite à l'entraînement. Ils montrent aussi qu'après l'entraînement l'augmentation de DC maximal est due à une augmentation du VES au cours de l'effort sous maximal (c.-à-d. une moindre diminution) et aussi l'absence du déclin du même paramètre au cours de l'effort maximal.

L'effet d'une courte période d'entraînement sur la fonction cardiaque a été examiné par Green et al. (1990) qui ont administré 4 séances d'entraînement incluant les séances l'évaluation pré et post entraînement. L'exercice s'effectuait sur une bicyclette stationnaire avec une intensité similaire à celle des évaluations, c.-à-d. à 65 %VO₂max pour une durée de 120min. L'entraînement montre une augmentation du volume plasmatique de 20 % ainsi qu'une élévation du débit cardiaque et une baisse de la fréquence cardiaque qui peut même contribuer à l'élévation du volume d'éjection systolique en augmentant le temps de remplissage. Ces résultats ont été confirmés par Mier et al. (1997).

En acceptant comme prémisse que l'entraînement procure une meilleure adaptation cardiovasculaire face à l'effort, on a aussi cherché à connaître les prédispositions à l'origine de ces adaptations. Au niveau central, Jensen-Urstad et al. (1998) ont essayé de vérifier pourquoi le VES des sportifs d'endurance est plus élevé que celui des sédentaires. Ils ont découvert que les sujets endurants possèdent une

fraction d'éjection systolique supérieure à celle des sujets sédentaires probablement due à une contractilité supérieure ou à une résistance périphérique plus faible chez les sujets endurants. En plus des adaptations centrales, les athlètes peuvent avoir des adaptations différentes au niveau périphérique. Fritzsche et Coyle (2000) ont essayé de vérifier l'hypothèse que le flux sanguin cutané soit plus élevé chez les sujets entraînés que les non entraînés (différence de 40% pour $VO_2\text{max}$) lors de 3 épreuves de 20min à 50, 70 et 90 % $VO_2\text{pic}$. À intensité relative égale, les sujets entraînés ont une circulation sanguine cutanée plus importante malgré une augmentation similaire de la température cutanée. Au contraire à intensité absolue, les sujets entraînés présentent une augmentation similaire de la circulation cutanée, mais leur température corporelle monte moins que celle des sujets non entraînés. On peut donc dire que l'entraînement permet une meilleure circulation périphérique et favorise la dissipation de la chaleur.

II. 2 Effets de la température et du niveau de l'hydratation sur les adaptations cardiovasculaires

La température est un des facteurs climatiques les plus influents, spécialement pendant l'effort de longue durée. Le système cardiovasculaire doit à la fois transporter l' O_2 au muscle actif et transférer la chaleur produite des zones internes du corps vers la peau. La sudation et le degré d'hydratation jouent un rôle important dans les mécanismes de déperdition de la chaleur.

II.2.1 Effet climatique et réaction du système cardiovasculaire

La chaleur et l'humidité, chacune séparément, influencent la réponse cardiovasculaire au cours de l'exercice. Évidemment à l'autre extrême, le froid aussi peut avoir des répercussions tout aussi importantes mais dans le sens contraire.

II.2.1.a. Réactions cardiovasculaires dans un environnement chaud

L'une des premières études qui a traité des adaptations de l'organisme à un environnement chaud au repos, est celle de Wyndham (1951) qui a observé une baisse aiguë de 3,5 litres.min⁻¹ du DC à 45.5°C à 100% d'humidité ou 29.5°C à température sèche. A l'exercice, Rowell, Marx et al. (1966) ont aussi observé une importante baisse de 1,2 litres.min⁻¹ du DC et du VES à 48.4°C à 100% d'humidité ou 26.6°C à température sèche. Après une période d'acclimatation cependant, Rowell, Kraning et al. (1967) n'ont pas remarqué de changement de DC mais ont tout de même constaté une diminution de la FC de 20 % et une augmentation de VES de 20 % à l'effort. Des résultats similaires furent rapportés par Wyndham, Benade et al. (1968). Contrairement aux résultats précédents, MacDougall, Reddan et al. (1974) ont observé une élévation 4 litres.min⁻¹ du DC au cours des épreuves d'hyperthermie à température du corps (~37 °C); ils ont aussi remarqué une augmentation de la FC et une baisse de VES à l'effort (70% du VO₂max). Une étude récente Gonzalez-Alonso, Teller et al. (1999) ont démontré que le DC et VES baissent avec un exercice réalisé dans un environnement chaud (40-41°C, 17-19 % d'humidité relative) alors que la FC augmente. Les quelques divergences observées s'expliquent peut-être par la méthodologie utilisée pour créer un environnement chaud ainsi que par les températures moins élevées dans l'étude de MacDougall et al. (1974).

En ce qui concerne les nombreux ajustements périphériques, la vasoconstriction cutanée favorise le remplissage du cœur et augmente le VES (Rowell, 1974). Un autre phénomène d'adaptation périphérique est l'augmentation du volume sanguin (Rowell, 1974).

II .2.1.b. Effets de la production de chaleur par le corps au cours d'exercice prolongé impact sur le système cardiovasculaire

Dans ce contexte, Astrand et al. (1960) et Saltin et Hermansen (1966) ont montré qu'une partie de la chaleur produite à l'exercice est retenue par le corps. L'explication qu'ils proposent, c'est que le corps a la capacité de gérer la dissipation de la chaleur produite au cours de l'effort, et ils pensent que ce phénomène est directement lié au $VO_2\text{max}$ ainsi qu'au niveau d'entraînement des sujets. Cette hypothèse a été confirmée par MacDougall et al. (1974), ils ont trouvé que les sujets entraînés qui courent à une vitesse absolue plus importante que ceux qui sont moins entraînés à 70 % $VO_2\text{max}$ présentent une augmentation de chaleur similaire à ceux qui sont moins entraînés. Puisque la sollicitation métabolique des sujets entraînés est plus importante (intensité absolue ou vitesse plus importante), ils devraient produire plus de chaleur ce qui n'est pas le cas. Par conséquent, ils retiennent plus de chaleur que les sujets moins entraînés. MacDougall et al. (1974) précisent aussi que dans le cas d'un exercice prolongé, l'hyperthermie compromet la performance par le déplacement du volume sanguin du centre à la périphérie dans le but de libérer la chaleur, ce qui provoque la chute de VES et du DC. Rowell (1974) confirme cette hypothèse et rajoute le fait que la chaleur peut provoquer une élévation du DC en cas d'exercice léger.

II .2.1.c. Effets du froid sur le système cardiovasculaire.

Les études qui ont examiné la réaction cardiovasculaire suite à une exposition au froid furent réalisées en combinaison avec des conditions de stress thermique. Rowell (1974) a identifié deux types de réponse face au froid. La première est graduelle et consiste en une diminution du DC alors que la deuxième comporte des réactions plus rapides dont une baisse de la FC ainsi qu'une augmentation du VES et du volume sanguin central.

II .2.1.d. L'entraînement favorise l'adaptation cardiovasculaire face à la chaleur

Piwonka et al. (1965) ont montré qu'un exercice intense effectué quotidiennement par des coureurs compétitifs, permet une adaptation quasi totale à la chaleur. L'étude de MacDougall et al. (1974), cité antérieurement, confirme aussi cette capacité accrue d'adaptation à la chaleur chez les sujets entraînés. L'explication de cette adaptation est fournie par l'étude de Gisolfi et Robinson (1969) les auteurs ont montré que par rapport aux sédentaires, les individus entraînés possèdent un volume sanguin plus important pour dissiper la chaleur au niveau cutané alors que leurs muscles peuvent s'exercer avec une circulation de sang réduite.

II.2.2 Niveau d'hydratation et réaction du système cardiovasculaire

Pendant l'effort prolongé, une perte hydrique peut se produire suite à la sudation, et cette situation peut avoir une influence directe sur la fonction cardiovasculaire. De ce fait, la réaction du système cardiovasculaire au cours d'un exercice prolongé n'est pas identique chez un individu hydraté et chez celui qu'il n'est pas. Selon Rowell (1974), deux facteurs sont à l'origine de la réaction cardiovasculaire pendant l'exercice: il y a d'abord la perte hydrique associée à la sudation puis la baisse du volume sanguin dans la circulation centrale au profit des zones périphériques. Les études initiales sur la perte hydrique ont imposé une déshydratation aux sujets avant le début de l'exercice (Nadel et al. 1980; Sawka et al. 1985). Ces études ont montré que l'imposition de la déshydratation avant l'effort provoque une baisse du volume plasmatique, une diminution du flux sanguin cutané, un déclin de la sudation et une augmentation de la température. On a aussi observé une chute du VES ainsi qu'une élévation de la FC.

Par la suite, Hamilton et al. (1991) ont tenté d'étudier l'effet du rétablissement de la perte hydrique sur la baisse du volume d'éjection systolique. Leurs sujets avaient un $VO_2\text{max}$ moyenne autour de $62.3 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ et ont réalisé un exercice de 2h à 70% du $VO_2\text{max}$. Ils ont montré que la prise de liquide au cours de l'effort prévient le déclin du VES. Le DC augmente de 7% entre la 20^{ème} et la 120^{ème} minute. À l'opposé, sans prise de liquide le DC chute de 7%, la fréquence cardiaque

augmente de 5 % entre la 20^{ème} et la 120^{ème} minute ce qui est équivalent à la moitié de l'élévation de l'épreuve sans liquide. Dans les deux situations, les différences cardiovasculaires sont moins importantes en début d'exercice qu'au cours de la deuxième heure. Dans la même problématique et afin d'évaluer le niveau adéquat d'hydratation, Montain et Coyle (1992) ont exercé des sujets pendant 2 heures à 32,7 °c et une humidité relative avoisinant 50 %, à une intensité initiale de 62 % du VO₂max et pouvant atteindre 67.4%. Les sujets répètent le même effort dans 4 conditions : une sans fluide et les autres en compensation de 20, 48 et 81% de la perte en sueur. L'augmentation de la fréquence cardiaque et la diminution du volume d'éjection systolique ainsi que le débit cardiaque sont reliés à la perte d'eau. Selon eux, la déshydratation réduit le volume sanguin total et entraîne une baisse du VES. Au niveau périphérique Gonzalez-Alonso et al. (1998) ont démontré que le flux sanguin est réduit de 13 % au niveau des muscles actifs, ceci est causé par une situation d'exercice avec déshydratation.

II.3. Phénomène expliquant la réaction cardiovasculaire pendant l'effort prolongé

La plupart des études qui ont essayé d'expliquer la réaction cardiovasculaire au cours de l'effort prolongé, ont utilisé des exercices avec imposition de chaleur et des niveaux d'hydratations, car ces derniers ont un rapport direct avec les adaptations du système cardiovasculaire. Une variable qui a suscité l'attention des chercheurs est le VES. Celui-ci présente dans la plus part des cas une diminution au cours de l'effort prolongé, et aussi parce que c'est la réduction de ce paramètre qui est en grande partie responsable de la baisse du DC.

Johnson (1987) a traité cette question des adaptations cardiovasculaires au cours de l'effort prolongé en se référant à plusieurs études. Il a conclu que la vasodilatation cutanée, couplée avec la dilatation veineuse cutanée tend à orienter le volume sanguin vers la peau ce qui provoque une baisse du volume sanguin central et explique la réduction du VES.

Gonzalez-Alonso et al. (1995) ont évalué l'effet de la chute du volume d'éjection systolique sur la pression artérielle, la résistance vasculaire cutanée et la concentration des catécholamines plasmatique au cours d'un exercice prolongé dans une situation de déshydratation d'hyperthermie provoquée. Ce qui est important à retenir de cette étude, c'est que la réduction du VES au cours de la 2^e heure de l'exercice avec déshydratation, n'est pas due à l'augmentation du flux sanguin cutané. Et le fait que les deux paramètres étaient bas en même temps est en contradiction avec l'hypothèse proposée par Johnson (1987).

Fritzsche et al. (1999) ont aussi tenté d'examiner la relation entre le flux sanguin cutané et le volume d'éjection systolique. Les résultats ont montré qu'au cours de l'épreuve où ils ont administré un placebo, la baisse du VES entre 15-55 min n'est pas associée au flux sanguin cutané puisque celui-ci demeure stable pendant toute cette période. De plus même avec l'administration du β bloquant (Atenol) qui prévient l'augmentation de la FC ainsi que le déclin du VES, le flux sanguin cutané reste inchangé. Notons que l'exercice se déroulait dans un environnement neutre ($\sim 18^{\circ}\text{C}$ et $\sim 27\%$). Ces résultats corroborent ceux de Gonzalez-Alonso et al. (1995) indiquant donc que le déclin du VES dépend de l'augmentation de la FC et n'est pas relié au changement de la circulation cutanée.

Le DC qui est le produit de la FC et VES subit une réduction au cours de l'effort prolongé. Gonzalez-Alonso et al. (1997) ont montré que la réduction du DC est le résultat de l'association des deux facteurs, l'hyperthermie et la déshydratation, qui, individuellement ne réduisent pas significativement le DC. En effet, leurs effets individuels étaient similaires avec une réduction du VES de $7 \pm 2\%$ et une augmentation de FC de $5 \pm 1\%$ alors que la double imposition des deux facteurs cause une plus importante baisse du VES 20% associée à une augmentation de $9 \pm 1\%$ de la FC. En conséquence, le DC baisse de $13 \pm 2\%$.

Les changements de la température corporelle sont aussi à l'origine de la réaction cardiovasculaire. Gonzalez-Alonso et al. (2000) ont essayé de déterminer les facteurs reliés à la réduction du VES chez des sujets hydratés et déshydratés dans une ambiance chaude (35°C) et froide (8°C). Ils ont constaté que pour les sujets hydratés, le VES est le même dans un environnement chaud et froid même si

l'élévation du flux sanguin cutané est fort différente. De plus, la réduction du VES plus importante en fonction du degré de déshydratation au chaud et au froid, est intimement liée à la baisse du volume sanguin, à l'augmentation de la température corporelle et à l'élévation de la FC. Ce phénomène a été aussi observée dans une étude précédente du même groupe (Gonzalez-Alonso et al. 1997) alors qu'une augmentation de 1 °C de la température corporelle provoque une élévation de 5% de la FC et une réduction de 7% du VES. Plus récemment, Gonzalez-Alonso et al. (1999) ont aussi démontré que l'augmentation de la FC est fortement corrélée avec l'élévation de la température de 36 °C à 40 °C.

III. Le phénomène de dérive cardiovasculaire.

Au cours d'un exercice dont la durée dépasse 10 min avec une intensité modérée, plusieurs réponses se produisent au niveau cardiovasculaire. Parmi ces réponses on note une baisse du VES et une augmentation parallèle de la FC, ainsi que d'autres réactions comme le maintien du DC et la chute de la pression artérielle moyenne, cette situation caractérise la dérive cardiovasculaire.

Ce phénomène a été remarqué des les années 60 avec par Ekelund (1967) qui a démontré que le VES chute de 15 % durant un exercice prolongé d'intensité modérée. On verra que la dérive de la FC peut varier de 0 à 30 bat/min selon les conditions expérimentales. Par exemple, Ekelund (1967) suggère que l'intensité de l'effort peut influencer l'amplitude de la dérive. Rowell (1974) pense que les changements de la température et ce qu'elle peut engendrer comme modification sur la circulation centrale et cutanée, est le facteur le plus important de cette réaction. Ces phénomènes en question a été généralement observé en course et sur ergocycle tant avec les membres inférieurs que supérieurs (Pimental, Sawka et al. 1984).

A la nage alors que l'augmentation de la température du corps est contrée par l'effet réfrigérant de l'eau, Nielsen et al. (1984a) et (1984b); ont quand même démontré que le phénomène de dérive peut aussi se produire. Ça ne serait donc pas la température en elle-même qui entraîne la dérive. D'autres facteurs peuvent donc

entrer en jeu et leur influence n'est pas négligeable. Il est possible que le déplacement de volume sanguin vers la périphérie qui assure normalement la régulation thermique soit toujours en cause sans toutefois que la température corporelle augmente en raison de l'efficacité accrue de la thermorégulation en milieu aqueux. Contrairement aux études précédentes de Nielsen et al (1976, 1984a et 1984b), Harrison et al. (1990) n'ont pu observer de phénomène de dérive pendant 40 min de nage mais l'intensité relativement faible (90-95 % du seuil anaérobie) peut expliquer ça.

D'autres études (Hamilton, Gonzalez-Alonso et al. 1991; Montain and Coyle 1992; Gonzalez-Alonso, Mora-Rodriguez et al. 1995) ont démontré que l'interprétation de Rowell (1974) n'est pas tout à fait exacte: leurs conclusions montrent que la réduction du VES est en partie causée par la réduction du volume sanguin induit par la déshydratation, et cette réaction se produit au cours d'un exercice avec une production de chaleur. Pour le reste de la réduction elle est attribuable selon eux à une baisse directe du VES dont la cause est l'augmentation de FC. Dans une étude plus récente Coyle et Gonzalez-Alonso (2001) précisent que c'est le temps de remplissage du cœur qui baisse à cause de l'augmentation de la FC.

Il semble que la baisse de la période diastolique peut expliquer la dérive cardiovasculaire. Au cours de l'exercice aérobie le remplissage du cœur dépend essentiellement de la période diastolique qui doit augmenter pour assurer une éjection plus importante, ce qui est considéré comme un défi pour le myocarde puisque la tachycardie induite par l'exercice réduit la durée de la diastole. Dawson et al (2005) ont montré avec des analyses échocardiographiques que la fonction diastolique baisse suite à un exercice de vélo stationnaire de 4 heures. Notant aussi que les athlètes et spécialement ceux des épreuves d'endurance, possèdent des adaptations morphologiques au niveau cardiaque, caractérisées par une dimension diastolique du cœur droit plus importante que chez les sédentaires (Longhurst et al 1981), cette adaptation permet une augmentation du volume de la fin de la diastole au repos et au cours de l'exercice (Di Bello et al 1996).

IV. Le système respiratoire

IV.1. Réponse respiratoire au cours d'un effort.

Au début de l'exercice, la ventilation (VE) présente une augmentation rapide suivie d'une augmentation progressive. Ces deux phases constituent une réponse directe ou indirecte à une demande énergétique accrue. La première est une réaction du cortex moteur qui stimule le centre respiratoire alors que pour la phase progressive, il s'agit de modifications métaboliques engendrées par l'effort. Cette même modification produit des changements de température ainsi que des modifications chimiques au niveau sanguin (Billat, 1998).

IV.1.1 Réponse respiratoire au cours d'un effort prolongé.

La réponse respiratoire est caractérisée par une augmentation rapide du VO_2 au début de l'exercice, ensuite vers la 3^{ème} min, VO_2 devient stable si l'intensité est moyenne ou légère. Dans le cas d'exercice intense, VO_2 continue d'augmenter pour éventuellement atteindre le VO_{2max} (Gaesser et Poole 1996).

Ekelund (1967) a démontré que la pente de cette dérive de VO_2 au cours de l'exercice est relative à l'intensité de l'exercice. Il ajoute aussi le fait que la ventilation alvéolaire subit aussi une augmentation qui concorde aussi avec celle de VO_2 alors que le quotient d'échange respiratoire (QER) baisse durant ce genre d'effort sans doute en raison de l'épuisement graduelle du glycogène et de l'utilisation croissante des lipides. .

IV.1.2. Entraînement et système respiratoire.

Même si le système cardiovasculaire joue un rôle essentiel dans le transport d'oxygène, il ne peut à lui seul expliquer toute l'amélioration en endurance: le

système respiratoire y contribue aussi. Les adaptations les plus importantes touchent la VE et diffusion pulmonaire ainsi que d'autres fonctions, mais ces améliorations sont plus évidentes lors d'effort maximal

Le $VO_2\text{max}$ est généralement considérée comme le témoin clef de l'aptitude cardiorespiratoire. L'effet de l'entraînement sur le $VO_2\text{max}$ est un sujet très étudié et plusieurs ont démontré une amélioration (Ekblom et al. 1968). Par contre, dès que les athlètes se rapprochent de leur potentiel génétique, leur $VO_2\text{max}$ reste relativement stable au cours d'une saison malgré un programme d'entraînement intense et soutenu (Bunc et al. 1987; Barbeau et al. 1993).

IV.1.3.Facteurs influençant la réaction respiratoire

Comme pour le système cardiovasculaire, les adaptations respiratoires pendant l'effort sont aussi sensibles à la chaleur, au niveau d'hydratation. Ekelund (1967) suppose que ces adaptations sont influencées par le système des barorécepteurs ou par l'augmentation des catécholamines dans le sang.

Hagberg et al. (1978) ont montré le rôle de l'utilisation des substrats, joue un rôle dans l'augmentation de la température rectale et la ventilation ainsi que l'élévation lente du VO_2 pendant un exercice à charge constante d'une durée de 20 min. Leurs résultats ont montré que l'augmentation lente est présente à 65 et 80 % du $VO_2\text{max}$. Selon les auteurs de cette étude, l'augmentation de la température (T) pendant ces épreuves montre que le facteur calorifique intervient dans l'accroissement du VO_2 , avec des augmentations de 57 et 103 ml/min pour les intensités de 65 et 80% du $VO_2\text{max}$ respectivement, ce qui représente le 3% du VO_2 total. Les données montrent aussi que le tiers de l'augmentation du VO_2 est attribué à l'élévation de la VE. Le changement dans l'utilisation des substrats indiqué par le QER intervient aussi légèrement dans l'augmentation du VO_2 , mais son implication est moins importante que les deux autres facteurs. Selon cette étude, l'effet des trois derniers facteurs (VE, T et QER) compte pour 60 % de l'augmentation du VO_2 pour l'exercice à 65 % $VO_2\text{max}$ alors que les mêmes facteurs sont responsables de la totalité de l'augmentation pour l'épreuve à 80%.

Dans une autre étude, Kalis et al. (1988) estiment le degré d'intervention de ces facteurs pendant 90 min d'exercice à une intensité de 40 % du VO_2max . Ils ont trouvé que le VO_2 présente une augmentation de 8,1 % pendant l'épreuve avec le placebo, cette élévation n'est pas considérée comme significative mais la faible intensité expliquée peut être cela. Tout de même, les auteurs de cette étude ont attribué cette augmentation aux trois facteurs évoqués dans l'étude précédente: T, VE et QER pour 25% d'augmentation du VO_2 . Dans l'étude de Hagberg et al. (1978), les changements du QER interviennent avec une légère portion dans l'augmentation du VO_2 (5%). Cette différence peut être causée par la différence dans l'intensité ou et la durée des efforts étudiés. Dans cette étude, les changements significatifs au niveau du QER ne sont observés qu'à partir de la 70^{ème} minute alors que l'augmentation de la température rectale compte pour 37 % de l'élévation du VO_2 et que VE augmente de 5.9 %. L'effet des trois variables dans l'augmentation du VO_2 est alors de 70 %. Comparativement à l'étude de Hagberg et al. (1978) qui s'est déroulée à 60 % du VO_2max , celle de Kalis et al. (1988) à 40% du VO_2max présente une augmentation relativement plus importante, mais cette différence peut être aussi attribuée à la durée de l'exercice soit de 90min pour (Kalis et al. 1988) et de 20 min pour Hagberg et al. (1978).

D'un autre côté des auteurs comme Whipp et al. (1982) ont suggéré que l'utilisation d'oxygène par le muscle est le facteur qui affecte le plus la cinétique d' O_2 . A ce propos, Gonzalez-Alonso et al. (1998) ont remarqué que l'utilisation d' O_2 dans les muscles actifs augmente et que même dans le cas de déshydratation qui diminue le flux sanguin, la livraison d' O_2 est maintenue pendant la première heure de l'exercice, ce qui est conforme aux commentaires de Whipp et al. (1982). Hamilton et al. (1991) pensent que le foie est en partie responsable de l'augmentation du VO_2 pendant l'exercice prolongé puisque le métabolisme de ce dernier augmente lors d'un exercice prolongé en état de jeûne et que le fait d'administrer une infusion intraveineuse d'eau et de glucose permet d'éviter cette élévation du VO_2 . Mais cela n'est pas certain puisque l'étude de Coyle et al. (1986) a montré que l'addition du glucose dans le but de maintenir la glycémie à 5mM pendant l'exercice, ne réduit pas l'augmentation du VO_2 .

Westerlind et al. (1992) ont effectué une étude pour démontrer que la détérioration des fibres musculaires, suite à des efforts excentriques en descente, pourrait aussi expliquer l'augmentation du VO_2 , mais ils n'ont pu le montrer. Ainsi avec une intensité d'effort à 40 % $\text{VO}_{2\text{pic}}$, ils ont remarqué que le facteur le plus influant dans l'accroissement du VO_2 , est l'augmentation de FC. La ventilation et la température rectale ont un effet moindre, alors que la détérioration des fibres muscles n'influence pas l'augmentation du VO_2 . Et même dans une étude ultérieure Westerlind et al. (1994) où ils ont augmenté l'intensité et la durée 50% du $\text{VO}_{2\text{max}}$ et 45min, l'augmentation du VO_2 a été plus importante sans que qu'il n'y ait de différence entre l'exercice sur le plat et l'exercice en descente rejetant ainsi une fois de plus le rôle éventuel de la détérioration des fibres musculaires. D'autre part, ils confirment aussi le fait que l'augmentation de la température rectale et musculaire ainsi que l'élévation de la FC influence directement l'augmentation de VO_2 . D'autres travaux seront sûrement utiles pour isoler les facteurs influencent la cinétique du VO_2 et préciser leurs implications.

V. Procédures pour le dosage de l'intensité.

Le souci principal des chercheurs et des entraîneurs est de trouver le facteur qui témoigne le mieux de l'intensité de l'effort au cours de l'entraînement. Comme les systèmes cardiovasculaire et respiratoire subissent des modifications importantes au cours de l'effort, les paramètres affectés comme le VO_2 et la FC, peuvent indiquer le degré de sollicitation métabolique et peuvent donc servir de témoin de l'intensité de l'exercice. D'autre part, des chercheurs se sont intéressés à établir des relations ou des équations facilitant le dosage de l'intensité d'exercice. Par exemple, la formule bien connue pour prédire FC_{max} ($\text{FC}_{\text{max}} = 220 - \text{Age}$), permet de calculer la FC d'entraînement correspondant à tel ou tel % FC_{max} . Plus spécifiquement, il y a aussi les équations permettant de prédire % FC_{max} à partir de % $\text{VO}_{2\text{max}}$ puisque % FC_{max} est plus facile à suivre que % $\text{VO}_{2\text{max}}$ qui requiert des mesures plutôt sophistiquées. Ainsi, Londeree et Ames (1976) ont montré qu'à partir d'une équation de régression ($\% \text{VO}_{2\text{max}} = -40.99 + 1.369 \% \text{FC}_{\text{max}}$) que

74 %FCmax, par exemple, est équivalent à 60 %VO₂max. Cette régression provient de 26 sujets partagés en 3 catégories (condition physique élevée, moyenne, et basse) donnant une corrélation élevée (> 0.93). Les régressions des sous-groupes étaient assez semblables pour justifier leur regroupement. Une équation semblable fut aussi développée en 1991 par Léger et al. (1991) ($\%FC_{max} = 38,35 + 0,634 \% VO_{2max}$), confirmant les équivalences de Londeree et Ames (1976) pour des efforts rectangulaires de 10 min à différentes intensités. Ces équivalences méritent toutefois d'être mises en perspectives. En effet, Barbeau et al. (1993) en étudiant les variations saisonnières de l'entraînement chez des cyclistes élités, n'ont pas observé de changement de VO₂max même si les FC ont diminué. Par contre le coût énergétique à une puissance donnée a diminué aussi permettant ainsi à ces cyclistes de fournir un effort plus long à une intensité donnée. Les auteurs pensent donc que s'entraîner en %VO₂max n'est peut être pas assez sensible et ne change pas nécessairement en fonction de %FCmax, et recommandent plutôt de s'entraîner en %FCmax.

Puisque la relation entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque se présente comme un outil pratique pour doser l'effort, Londeree et al. (1995) ont essayé d'étudier l'évolution du % VO₂max et % FCmax au cours de 6 exercices différents. Leurs résultats montrent que la courbe de régression entre ces deux derniers paramètres est similaire dans le cas d'exercices où le corps est supporté par les jambes comme la course, le ski et le step. Dans le cas d'exercice où les jambes ne soutiennent pas le corps comme le pédalage avec les bras ainsi que le vélo stationnaire la régression n'est pas identique, ce genre d'effort nécessite une équation plus spécifique qui tient compte de la différence du niveau de sollicitation par rapport à un exercice de course. En général, plus la masse musculaire mise en jeu est petite, plus élevée est %FCmax pour un même %VO₂max à la condition que le VO₂max de référence soit la même valeur, c.-à-d. la valeur la plus élevée de toutes les formes d'activités. En effet, Léger et al. (1991) ont trouvé des équivalences semblables sur ergocycle et tapis roulant lorsque le VO₂max respectif de ces deux conditions était considéré dans le calcul de %VO₂max.

Trudeau et al. (1997) ont essayé d'évaluer l'impact de deux méthodes de dosage d'intensité (% VO_2max et % FCmax) avec un exercice effectué sur ergocycle. L'effort dure 60 min avec une charge qui correspond à 58% du VO_2max avec deux protocoles différents. Pour le premier, ils gardent une fréquence cardiaque fixe qui correspond à 58% VO_2max alors que dans le deuxième protocole ils gardent une charge fixe équivalente à 58% VO_2max . Les résultats ont montré qu'avec le protocole a charge constante la fréquence cardiaque a augmenté de 9,9 bat /min entre la 15^{ème} et la 60^{ème} minute alors que pour le protocole a fréquence cardiaque constante ils ont dû baisser la charge de 162.5 à 130 W pour que FC soit maintenue constante.

À partir de ces travaux, on peut déduire que le dosage l'intensité de l'exercice à partir de la relation FC et VO_2 reste une solution possible, puisque les deux paramètres évoluent d'une façon presque similaire. Mais d'autres travaux sont nécessaires afin de vérifier tous les facteurs intervenant dans la relation entre ces deux paramètres, et de les incorporés dans la prescription d'un exercice a fin d'avoir un dosage approprié de l'intensité.

VI. Conclusion

L'aptitude que possède un individu à exécuter un exercice prolongé dépend essentiellement du transport d'O₂, puisque généralement ce genre d'effort ne déroule essentiellement en aérobiose.

Le transport d'O₂ est assuré principalement par le système cardiovasculaire au niveau sanguin tandis qu'au niveau pulmonaire, le système respiratoire assure la fourniture de ce comburant. Indépendamment de l'intensité de l'exercice, les deux systèmes agissent en synergie pour permettre la poursuite de l'effort dans les meilleures conditions métaboliques.

Plusieurs études ont permis d'expliquer les mécanismes de fonctionnement de ces deux systèmes. Les facteurs susceptibles d'influencer ces systèmes pendant l'exercice ont été identifiés. Le dosage de l'intensité de l'exercice est concerné par cette problématique, puisque tout facteur qui influence ces deux systèmes peut être intégré dans les méthodes utilisées pour doser l'intensité de l'effort.

Le raffinement de ces connaissances passe nécessairement par la réalisation d'études additionnelles et plus pertinentes sur le dosage de l'intensité de l'entraînement.

REFÉRENCES

- American College of Sports Medicine (1978). Position statement on the recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining fitness in healthy adults." Med Sci Sports 10(3): vii-x.
- Astrand, I., P. O. Astrand, E. H. Christensen and R. Hedman (1960). "Circulatory and respiratory adaptation to severe muscular work." Acta Physiol Scand 50: 254-8.
- Barbeau, P., O. Serresse and M. R. Boulay (1993). "Using maximal and submaximal aerobic variables to monitor elite cyclists during a season." Med Sci Sports Exerc 25(9): 1062-9.
- Billat V. (1998) " Physiologie et méthodologie de l'entraînement : de la théorie à la pratique" p 261 DeBoeck Université
- Di Bello, V., G. Santoro, L. Talarico C. Di Muro, M. T. Caputo, D. Giorgi, A. Bertini, M. Bianchi and C. Giusti (1996) "Left ventricular function during exercise in athletes and in sedentary men. Med Sci Sports Exerc 28:190-196
- Bunc, V., J. Heller, J. Leso, S. Sprynarova and R. Zdanowicz (1987). "Ventilatory threshold in various groups of highly trained athletes." Int J Sports Med 8(4): 275-80.
- Coyle, E. F., A. R. Coggan, M. K. Hemmert and J. L. Ivy (1986). "Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate." J Appl Physiol 61(1): 165-72.

- Coyle, E. F and Gonzalez-Alonso, J (2001) "Cardiovascular drift during prolonged exercise : new perspective" *Exerc Spots Sci Rev* 29: 88-92
- Davies, C. T. (1968). "Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements." *J Appl Physiol* 24(5): 700-6.
- Dawson, E. A., Shave, R., George, K., Whyte, G., Ball, D., Gaze, D. and Collinson, P. (2005) "Cardiac drift during prolonged exercise with echocardiographic evidence of reduced diastolic function of the heart " *Eur J Appl Physiol* 94: 305-309
- Eklom, B., P. O. Astrand, B. Saltin, J. Stenberg and B. Wallstrom (1968). "Effect of training on circulatory response to exercise." *J Appl Physiol* 24(4): 518-28.
- Ekelund, L. G. (1967). "Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise." *Acta Physiol Scand Suppl* 292: 1-38.
- Ekelund, L. G. (1967). "Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise of moderate intensity in the sitting position." *Acta Physiol Scand* 69(4): 327-40.
- Fritzsche, R. G. and E. F. Coyle (2000). "Cutaneous blood flow during exercise is higher in endurance-trained humans." *J Appl Physiol* 88(2): 738-44.
- Fritzsche, R. G., T. W. Switzer, B. J. Hodgkinson and E. F. Coyle (1999). "Stroke volume decline during prolonged exercise is influenced by the increase in heart rate." *J Appl Physiol* 86(3): 799-805.
- Gaesser, G. A. and D. C. Poole (1996). "The slow component of oxygen uptake kinetics in humans." *Exerc Sport Sci Rev* 24: 35-71.

- Gisolfi, C. and S. Robinson (1969). "Relations between physical training, acclimatization, and heat tolerance." J Appl Physiol **26**(5): 530-4.
- Gonzalez-Alonso, J., J. A. Calbet and B. Nielsen (1998). "Muscle blood flow is reduced with dehydration during prolonged exercise in humans." J Physiol **513 (Pt 3)**: 895-905.
- Gonzalez-Alonso, J., R. Mora-Rodriguez, P. R. Below and E. F. Coyle (1995). "Dehydration reduces cardiac output and increases systemic and cutaneous vascular resistance during exercise." J Appl Physiol **79**(5): 1487-96.
- Gonzalez-Alonso, J., R. Mora-Rodriguez, P. R. Below and E. F. Coyle (1997). "Dehydration markedly impairs cardiovascular function in hyperthermic endurance athletes during exercise." J Appl Physiol **82**(4): 1229-36.
- Gonzalez-Alonso, J., R. Mora-Rodriguez and E. F. Coyle (1999). "Supine exercise restores arterial blood pressure and skin blood flow despite dehydration and hyperthermia." Am J Physiol **277**(2 Pt 2): H576-83.
- Gonzalez-Alonso, J., R. Mora-Rodriguez and E. F. Coyle (2000). "Stroke volume during exercise: interaction of environment and hydration." Am J Physiol Heart Circ Physiol **278**(2): H321-30.
- Gonzalez-Alonso, J., C. Teller, S. L. Andersen, F. B. Jensen, T. Hyldig and B. Nielsen (1999). "Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat." J Appl Physiol **86**(3): 1032-9.
- Green, H. J., L. L. Jones and D. C. Painter (1990). "Effects of short-term training on cardiac function during prolonged exercise." Med Sci Sports Exerc **22**(4): 488-93.

- Hagberg, J. M., J. P. Mullin and F. J. Nagle (1978). "Oxygen consumption during constant-load exercise." J Appl Physiol **45**(3): 381-4.
- Hamilton, M. T., J. Gonzalez-Alonso, S. J. Montain and E. F. Coyle (1991). "Fluid replacement and glucose infusion during exercise prevent cardiovascular drift." J Appl Physiol **71**(3): 871-7.
- Harrison, J., R., B. Dawson, S. Lawrence and B. A. and Blanksdy (1990). "Cardiovascular drift does not occur in prolonged swimming." Journal of Human Movement Studies **19**: 143-150.
- Jensen-Urstad, M., F. Bouvier, M. Nejat, B. Saltin and L. A. Brodin (1998). "Left ventricular function in endurance runners during exercise." Acta Physiol Scand **164**(2): 167-72.
- Johnson, M. J. (1987). "Central and peripheral adjustments to long-term exercise in humans." Can J. Spt. Sci **12**: 84s-88s.
- Kalis, J. K., B. J. Freund, M. J. Joyner, S. M. Jilka, J. Nittolo and J. H. Wilmore (1988). "Effect of beta-blockade on the drift in O₂ consumption during prolonged exercise." J Appl Physiol **64**(2): 753-8.
- Leger, L., A. Gutierrez, D. Choinière and R.-M. Ricart (1991). "La relation %FCmax-%VO₂ max en fonction de l'âge, du sexe et de l'ergomètre." Sciences et Sports **6**: 65.
- Londeree, B. R. and S. A. Ames (1976). "Trend analysis of the % VO₂ max-HR regression." Med Sci Sports **8**(2): 123-5.

- Londeree, B. R., T. R. Thomas, G. Ziogas, T. D. Smith and Q. Zhang (1995). "%VO₂max versus %HRmax regressions for six modes of exercise." Med Sci Sports Exerc **27**(3): 458-61.
- Longhurst J.C., A.R. Kelly, W.J. Gonyea and J.H. Mitchell (1981) " Chronic training with static and dynamic exercise: cardiovascular adaptation, and response to exercise" Circ Res **48** (Suppl): I171-178
- MacDougall, J. D., W. G. Reddan, C. R. Layton and J. A. Dempsey (1974). "Effects of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise." J Appl Physiol **36**(5): 538-44.
- Maron, M. B., S. M. Horvath, J. E. Wilkerson and J. A. Gliner (1976). "Oxygen uptake measurements during competitive marathon running." J Appl Physiol **40**(5): 836-8.
- Mier, C. M., M. A. Domenick and J. H. Wilmore (1997). "Changes in stroke volume with beta-blockade before and after 10 days of exercise training in men and women." J Appl Physiol **83**(5): 1660-5.
- Montain, S. J. and E. F. Coyle (1992). "Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise." J Appl Physiol **73**(4): 1340-50.
- Nadel, E. R., S. M. Fortney and C. B. Wenger (1980). "Effect of hydration state of circulatory and thermal regulations." J Appl Physiol **49**(4): 715-21.
- Nielsen, B. and C. T. Davies (1976). "Temperature regulation during exercise in water and air." Acta Physiol Scand **98**(4): 500-8.

- Nielsen, B., L. B. Rowell and F. Bonde-Petersen (1984). "Cardiovascular responses to heat stress and blood volume displacements during exercise in man." Eur J Appl Physiol Occup Physiol **52**(4): 370-4.
- Nielsen, B., G. Sjogaard and F. Bonde-Petersen (1984). "Cardiovascular, hormonal and body fluid changes during prolonged exercise." Eur J Appl Physiol Occup Physiol **53**(1): 63-70.
- Pimental, N. A., M. N. Sawka, D. S. Billings and L. A. Trad (1984). "Physiological responses to prolonged upper-body exercise." Med Sci Sports Exerc **16**(4): 360-5.
- Piwonka, R. W., S. Robinson, V. L. Gay and R. S. Manalis (1965). "Preacclimatization of men to heat by training." J Appl Physiol **20**(3): 379-83.
- Rowell, L. B. (1974). "Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress." Physiol Rev **54**(1): 75-159.
- Rowell, L. B., K. K. Kraning, 2nd, J. W. Kennedy and T. O. Evans (1967). "Central circulatory responses to work in dry heat before and after acclimatization." J Appl Physiol **22**(3): 509-18.
- Rowell, L. B., H. J. Marx, R. A. Bruce, R. D. Conn and F. Kusumi (1966). "Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise." J Clin Invest **45**(11): 1801-16.
- Rowell, L. B., H. L. Taylor and Y. Wang (1964). "Limitations to Prediction of Maximal Oxygen Intake." J Appl Physiol **19**: 919-27.

- Saltin, B. and L. Hermansen (1966). "Esophageal, rectal, and muscle temperature during exercise." J Appl Physiol **21**(6): 1757-62.
- Saltin, B. and J. Stenberg (1964). "Circulatory Response To Prolonged Severe Exercise." J Appl Physiol **19**: 833-8.
- Sawka, M. N., A. J. Young, R. P. Francesconi, S. R. Muza and K. B. Pandolf (1985). "Thermoregulatory and blood responses during exercise at graded hypohydration levels." J Appl Physiol **59**(5): 1394-401.
- Spina, R. J., T. Ogawa, W. H. Martin, 3rd, A. R. Coggan, J. O. Holloszy and A. A. Ehsani (1992). "Exercise training prevents decline in stroke volume during exercise in young healthy subjects." J Appl Physiol **72**(6): 2458-62.
- Trudeau, F., M. Milot, M. Paré and K. Palourde (1997). "Réponse plasmatique et ajustement de l'intensité d'exercice par la fréquence cardiaque ou la charge de travail." Sciences & Sports **12**: 123-128.
- Westerlind, K. C., W. C. Byrnes, C. Harris and A. R. Wilcox (1994). "Alterations in oxygen consumption during and between bouts of level and downhill running." Med Sci Sports Exerc **26**(9): 1144-52.
- Westerlind, K. C., W. C. Byrnes and R. S. Mazzeo (1992). "A comparison of the oxygen drift in downhill vs. level running." J Appl Physiol **72**(2): 796-800.
- Whipp, B. J., S. A. Ward, N. Lamarra, J. A. Davis and K. Wasserman (1982). "Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise." J Appl Physiol **52**(6): 1506-13.
- Wyndham, C. H. (1951). "Effect of acclimatization on circulatory responses to high environmental temperatures." J Appl Physiol **4**(5): 383-95.

Wyndham, C. H., A. J. Benade, C. G. Williams, N. B. Strydom, A. Goldin and A. J. Heyns (1968). "Changes in central circulation and body fluid spaces during acclimatization to heat." J Appl Physiol **25**(5): 586-93.

PARTIE EXPERIMENTALE

PREDICTION DU %FC_{max} LORS D'EFFORTS A INTENSITE CONSTANTE

I. Introduction

Que notre centre d'intérêt soit la performance sportive, l'évaluation ou l'entretien de la condition physique, il est essentiel de quantifier convenablement les paramètres physiologiques des efforts physiques. Doser correctement l'intensité de l'exercice est primordial pour la normalisation et l'optimisation de l'entraînement et des protocoles d'efforts. Pour des exercices à prédominance cardiovasculaire et aérobie, le pourcentage de consommation maximale d'oxygène ($\%VO_2\text{max}$) auquel se déroule l'effort physique, représente sans doute la façon la plus spécifique d'exprimer l'intensité de l'effort. Cependant, cette approche n'est guère pratique dans le cadre d'un suivi quotidien des efforts en situation d'entraînement sur le terrain vue la complexité et la fréquence des mesures à effectuer.

Par contre, la fréquence cardiaque ou mieux la proportion de la fréquence cardiaque maximale ($\%FC\text{max}$), est reconnue depuis longtemps comme un témoin clef de l'intensité des efforts, de la consommation d'oxygène ou encore du $\%VO_2\text{max}$ auquel se déroulent des efforts. En effet, le $\%FC\text{max}$ est proportionnel au $\%VO_2\text{max}$ (Davis and Convertino 1975). D'autre part, la FC peut être influencée par plusieurs facteurs parmi lesquels nous pouvons citer le niveau d'entraînement, le degré d'hydratation, l'humidité relative ainsi que la température ambiante (Monod, Saint-Saens et al. 1958; Rowell, Taylor et al. 1964). De plus, en ce qui concerne les équations $\%FC\text{max}$ vs $\%VO_2\text{max}$ rapportées dans la littérature (Londeree and Ames 1976; Leger, Gutierrez et al. 1991), elles ont été établies à partir d'efforts progressifs (ou "triangulaires") alors qu'à l'entraînement, on utilise plutôt des efforts prolongés à intensité constante (ou "rectangulaires"), bien que l'on sache qu'il existe une dérive du VO_2 et de la FC en fonction de la durée de l'effort et que l'ampleur de celle-ci dépend de l'intensité de l'effort.

D'une façon plus particulière, on peut se demander si une courbe étalon $\%FC\text{max}$ vs $\%VO_2\text{max}$ établie lors d'un protocole d'effort progressif, est conforme aux valeurs qui prévalent lors d'entraînements types de longue durée à intensité constante quelqu'en soit le moment. On peut s'interroger si les taux de

dérive ($d_{x_{\max}}/d_i$) de FC de VO_2 sont similaires lors d'efforts prolongés continus. On peut aussi se demander si en plus de connaître l'intensité et le moment de l'effort, l'exactitude des équations de prédiction de %FCmax pendant des efforts prolongés à intensité constante, peut être améliorée si l'on tient compte

- 1) du %FCmax observé à un % $VO_{2\max}$ donné durant un test étalon progressif avec paliers courts (~2 min),
- 2) du $VO_{2\max}$ et de la vitesse maximale aérobie (VMA) atteints durant un test étalon progressif avec paliers courts (~2 min),
- 3) du niveau d'endurance déterminé lors d'épreuve de temps limite à 80 et 90% de la vitesse correspondante à la consommation maximale aérobie (%v $VO_{2\max}$)

Par la suite, on peut vérifier si un modèle général basé sur l'ensemble des individus peut donner une image réaliste de %FCmax en fonction du temps et de % $VO_{2\max}$ lors d'efforts prolongés à intensité constante et quantifier la perte d'exactitude par rapport aux modèles étalons individuels. Enfin, on peut aussi calculer la perte d'exactitude de ces modèles de prédiction de %FCmax si on utilise la véritable FCmax des sujets ou une prédiction de celle-ci ($FC_{\max} = 220 - \text{âge}$).

II. Méthodologie

II.1. Sujets

La population utilisée est constituée de 25 sujets dont la majorité sont des étudiants de premier cycle universitaire en kinésiologie, divisée en 2 groupes : sujets entraînés en endurance et sujets moyennement actifs. Le groupe entraîné en endurance comptait plus de trois entraînements par semaine en course, vélo, natation ou les trois ensembles dans le cas des triathlètes (n=10). Le groupe moyennement entraîné comptait 3 entraînements ou moins par semaine (n=15). Concrètement et a posteriori, la différence entre les deux groupes correspond à un temps limite réaliser à 80% de la vitesse correspondante à VO₂max (vVO₂max) inférieur et supérieur à 40min. Les participants à cette étude ont donné leur consentement libre et éclairé.

Tableau 1 : Caractéristiques des sujets.

II.2. Démarche expérimentale

Moyenne ± écart type	Age (an)	Taille (cm)	Poids (kg)	VO ₂ max (ml kg ⁻¹ min ⁻¹)	VMA (km h ⁻¹)	tLim à 80% vVO ₂ max
Total (n=25)	25,4 ±7,25	174,6 ±10,4	70,8 ±11,5	55,6 ±8,1	15,6 ±1,9	38,8 ±13,6
Entraîné (n=10)	30,3 ±9,5	178,3 ±12,2	71 ±14,1	56,2 ±7,6	15,8 ±1,9	51,8 ±9
Non entraîné (n=15)	22,3 ±1,7	172,1 ±8,9	70,3 ±10,2	55,2 ±8,6	15,5 ±1,8	30,6 ±8,7

Les sujets ont effectué 5 tests sur tapis roulant précédés d'une séance de familiarisation pour ceux qui n'étaient pas habitués à la course sur tapis roulant. Toutes les épreuves étaient séparées par au moins une journée de repos. Nous avons demandé aux sujets de n'effectuer aucune séance d'entraînement ou aucun effort physique important, la veille ou le jour même des tests afin de ne pas affecter les résultats de ceux-ci.

II.2.1. Tests

II.2.1.a Test triangulaire

Ce test est exécuté en premier puisqu'il nous permet d'établir les balises des autres tests. Il s'est déroulé sur un tapis roulant à 0% de pente. La vitesse est initialement fixé à 8 km h⁻¹ pendant 2 minutes et augmente ensuite de 1 km h⁻¹ toutes les 2 minutes. Le VO₂ et la FC ont été mesurés de façon continue afin de déterminer VO₂max et FCmax et de tracer la courbe FC/VO₂, et de calculer les vitesses correspondant à 60, 70, 80 et 90 %VO₂max au moyen des régressions individuelles %VO₂max vs Vitesse.

II.2.1.b Tests rectangulaires

Quatre tests rectangulaires à 60, 70, 80 et 90 %vVO₂max ont par la suite été réalisés, et ce dans un ordre aléatoire. À 80 et 90 %, les sujets devaient courir jusqu'à épuisement (tLim80 et tLim90) alors que pour les épreuves à 70 et 60 %vVO₂max, les tests étaient arrêtés au bout de 60 min ou le cas échéant, à épuisement. À 60 et 70 %vVO₂max, le sujet fut déconnecté du système de mesure des gaz expirés entre la 10^e et la 20^e minute et entre la 30^e et 40^e minute d'effort afin de minimiser l'inconfort.

Pour les analyses de gaz, nous avons utilisé le système Moxus (AEI Technologies Applied Electrochemistry 300 William Pitt Way, Pittsburgh, (Pennsylvania USA). Les gaz expirés passent par un circuit ouvert et ils sont analysés en temps quasi réel alors que les résultats obtenus étaient moyennés toutes les 30 secondes.

II.3. Analyse des données

Toutes les données sont traitées à l'aide du logiciel Statistica 6.0 (StatSoft, Tulsa, USA). La régression multiple pas à pas fut utilisée pour établir des modèles

de prédiction de %FCmax en fonction du temps et de l'intensité (%vVO₂max) lors d'efforts prolongés à intensité constante ainsi qu'en fonction ou non d'autres variables complémentaires comme la courbe étalon %FC vs %VO₂max obtenue lors d'un test triangulaire, VO₂max, et tLim à 80% vVO₂max (Tableau 2). Différents modèles de régressions furent établis pour l'ensemble des sujets (modèles collectifs) ainsi que pour chaque individu séparément (modèles individuels). Comme nous étions intéressés à modéliser les phénomènes de dérive linéaire après la phase rapide d'ajustement cardio-vasculaire, seules les valeurs observées après la cinquième minute d'effort furent retenues pour cette étude.

Tableau 2. Paramètres des régressions développées pour prédire %FCmax lors d'exercices prolongés continus à différentes intensités.

Modèle	Variables indépendantes
Individuel Une régression par sujet	Variables de base
Collectif Une régression pour tous les sujets	1. Temps 2. %vVO ₂ max 3. Temps x %vVO ₂ max
Variable dépendante	Variables optionnelles
1. %FCmax où FCmax est la valeur de FC la plus élevée mesurée	4. %FCmax correspondant au même %VO ₂ max lors du test progressif
2. %FCmax où FCmax = 220 - AGE	5. VO ₂ max (ml kg ⁻¹ min ⁻¹)
	6. tLim à 80 %vVO ₂ max ou
	7. tLim à 90 %vVO ₂ max ou
	8. Niveau d'entraînement : E=1 & NE=0

III. Résultats

Dix-huit régressions collectives incluant différentes variables indépendantes furent développées pour prédire %FCmax (Tableau 3). Quel que soit le modèle (régression individuelle ou de groupe) ou la variable dépendante (%FCmax basée sur FCmax réelle ou prédite), le même numéro de régression fait référence au même ensemble de variables indépendantes. Pour des motifs de concision, seules les régressions les plus pertinentes sont présentées en commençant par les modèles individuels suivis des modèles collectifs.

Tableau 3 : Équations générales prédisant le %FCmax en fonction du temps et de l'intensité lors d'efforts à intensité constante en tenant compte ou non du degré d'endurance des sujets, de leur VO₂max, de leur FCmax réelle ou prédite et du %FCmax correspondant à la même intensité lors d'un test progressif.

Équations → Variables ↓	%FCmax exprimé en fonction de FCmax réelle																		%FCmax exprimé en fonction de FCmax prédite (=220 – Age)						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	1	2	4	7	12	15	18
Temps	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
%vVO ₂ max	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Temps *% vVO ₂ max	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
%FCtri	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
T lim 90%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
T lim 80%			X			X		X		X															
VO ₂ max				X		X		X		X											X				
E1 TL 80											X			X			X						X		X
E1 TL VO ₂ max												X		X		X	X								
Nombre	5794	5794	5794	5794	5794	5794	6184	6184	6184	6184	6184	5794	5794	5794	5794	5794	6184	6184	5794	5794	5794	6184	5794	6184	6184
R	0.83	0.89	0.87	0.83	0.89	0.89	0.88	0.83	0.81	0.88	0.88	0.84	0.83	0.85	0.82	0.82	0.83	0.81	0.73	0.86	0.74	0.85	0.73	0.77	0.73
Syx	5.00	4.08	4.48	4.98	4.06	4.06	4.37	4.86	5.26	4.36	4.36	4.83	4.94	4.77	5.12	5.25	5.11	5.27	6.37	4.86	6.36	4.96	5.96	6.05	6.45

(%VMA : pourcentage de vitesse maximale aérobie ; %FCtri : pourcentage de la fréquence cardiaque maximale au cours du test triangulaire ; T lim 90 % : temps limite au cours du test avec l'intensité à 90 %vVO₂max ; T lim 80 % : temps limite au cours du test avec l'intensité à 80 %vVO₂max ; VO₂max : consommation maximale d'oxygène ; E1 TL 80 : les sujets considérés comme entraînés pour un temps limite supérieur à 40min ; E1 TL VO₂max : les sujets considérés comme entraînés pour des sujets ou la VO₂max est supérieur de 60 ml/kg/min ; constantes des équations ; Nombre : nombre de variables ; R : corrélation ; Syx : erreur type estimée).

III.1. Approche individuelle

Seules les régressions individuelles de 6 sujets représentatifs de notre population sont présentées (Tableaux 4 et 5), la moitié de ceux-ci appartenant à chacun des deux groupes de l'étude (moins et plus endurants). Dans le cas des régressions individuelles, les variables indépendantes $VO_2\text{max}$ et $t\text{Lim}$ n'ont plus leur raison d'être et seules les régressions 1 et 18 sont présentées. En plus des variables de base (Temps et $\%vVO_2\text{max}$), la régression 1 (Tableau 4) tient aussi compte du $\%FC\text{max}$ observé lors du test triangulaire au même $\%vVO_2\text{max}$ alors que l'équation 18 (Tableau 5) n'en tient pas compte.

Les valeurs de S_{yx} (Tableaux 4 et 5) ainsi que la dispersion des valeurs prédites en fonction des valeurs réelles (Figures 1 et 2) permet d'apprécier l'ampleur des erreurs aléatoires associées aux régressions individuelles 1 et 18 alors que la comparaison des valeurs réelles et prédites en fonction du temps pour chaque intensité (Figures 3 et 4) permet de voir l'ampleur des erreurs systématiques.

Tableau 4 : Régressions individuelles No 1 pour 3 sujets de chaque groupe.

Sujets	Groupe plus endurant			Groupe moins endurant		
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6
Intercept	267,7	41,6	177,2	21,8	16,0	-167,1
Time	-0,4601	-0,68471	-0,2299	-0,68365	0,29885	-1,387
$\%vVO_2\text{max}$	2,9627	1,04539	2,8817	0,82592	0,47094	-2,835
Time $\%vVO_2\text{max}$	0,0089	0,01244	0,0053	0,01207	-0,00051	0,023
$\%FC\text{tri}$	-4,6809	-0,45668	-3,5135	-0,01780	0,35917	5,349
R	0,984	0,994	0,983	0,985	0,9758	0,990
S_{yx}	1,426	1,211	1,695	1,634	1,5277	1,436

Tableau 5 : Régressions individuelles No 18 pour 3 sujets de chaque groupe

Sujets	Groupe plus endurant			Groupe moins endurant		
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6
Intercept	25,55589	18,23887	9,170637	21,14040	29,96631	31,36930
Time	-0,13978	-0,62731	0,036199	-0,67787	0,14644	-1,83047
$\%vVO_2\text{max}$	0,76778	0,81740	0,940121	0,81433	0,70540	0,65921
Time $\%vVO_2\text{max}$	0,00399	0,01156	0,001250	0,01199	0,00183	0,03000
R	0,973	0,993	0,976	0,985	0,974	0,983
S_{yx}	1,853	1,219	2,009	1,629	1,562	1,884

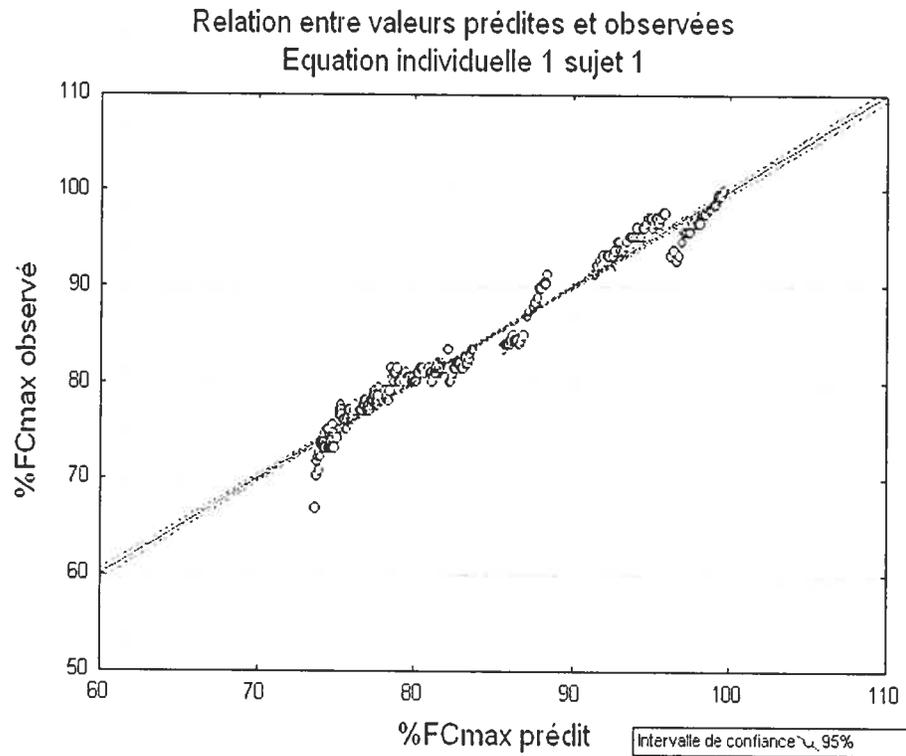


Figure 1 : Relation des valeurs prédites et observées pour l'équation 1 sujet 1
($r = 0.984$ et $S_{yx} = 1.426$)

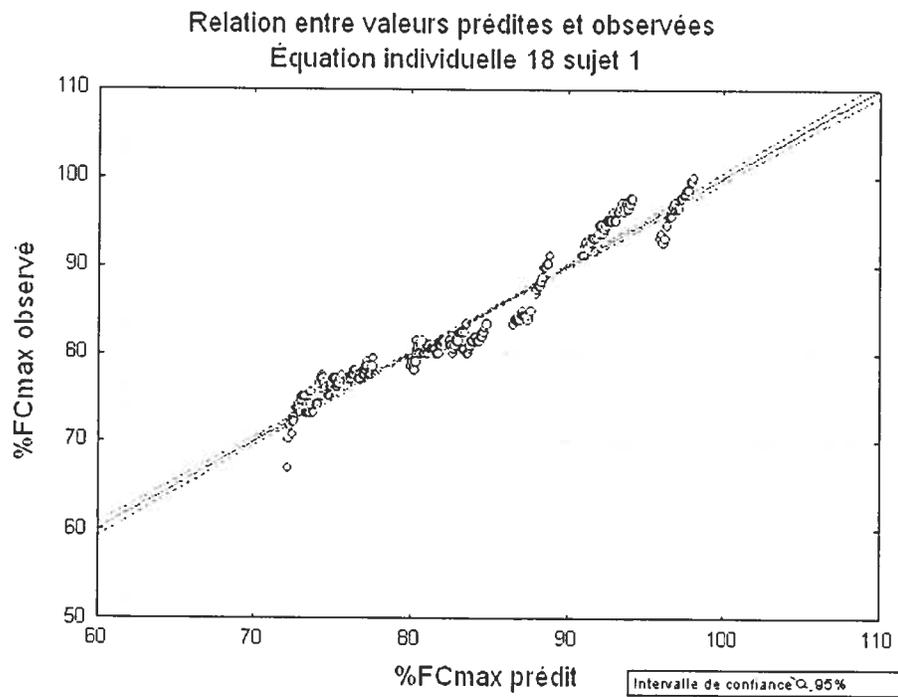


Figure 2 : Relation des valeurs prédites et observées pour l'équation 18 sujet 1
($r = 0.973$ et $S_{yx} = 1.853$)

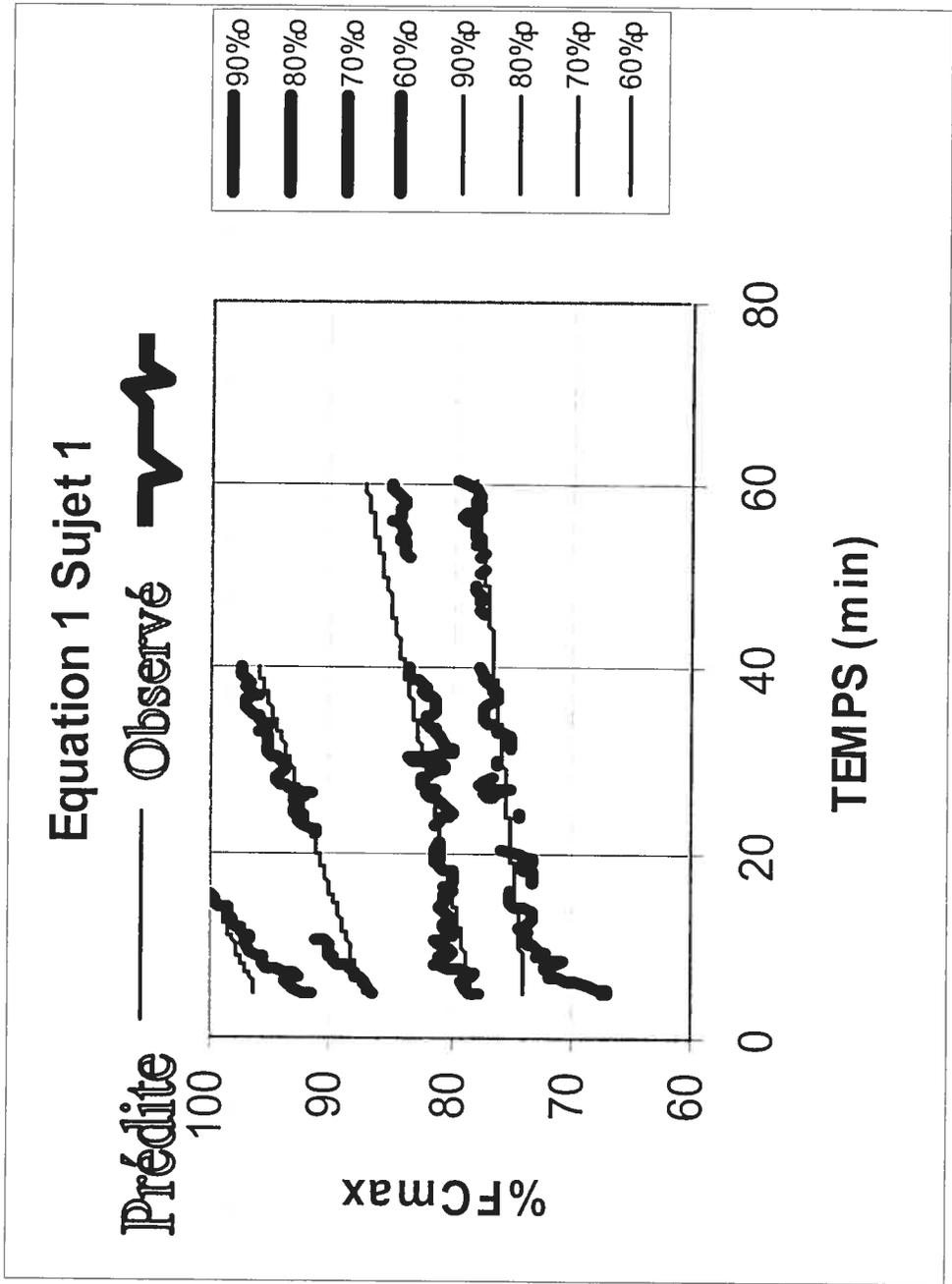


Figure 3 : Évolution de %FC prédite et observée à 60, 70, 80 et 90 %vVO₂max, pour l'équation 1, Sujet 1.

Equation 18 Sujet 1

Prédite ———— Observé 

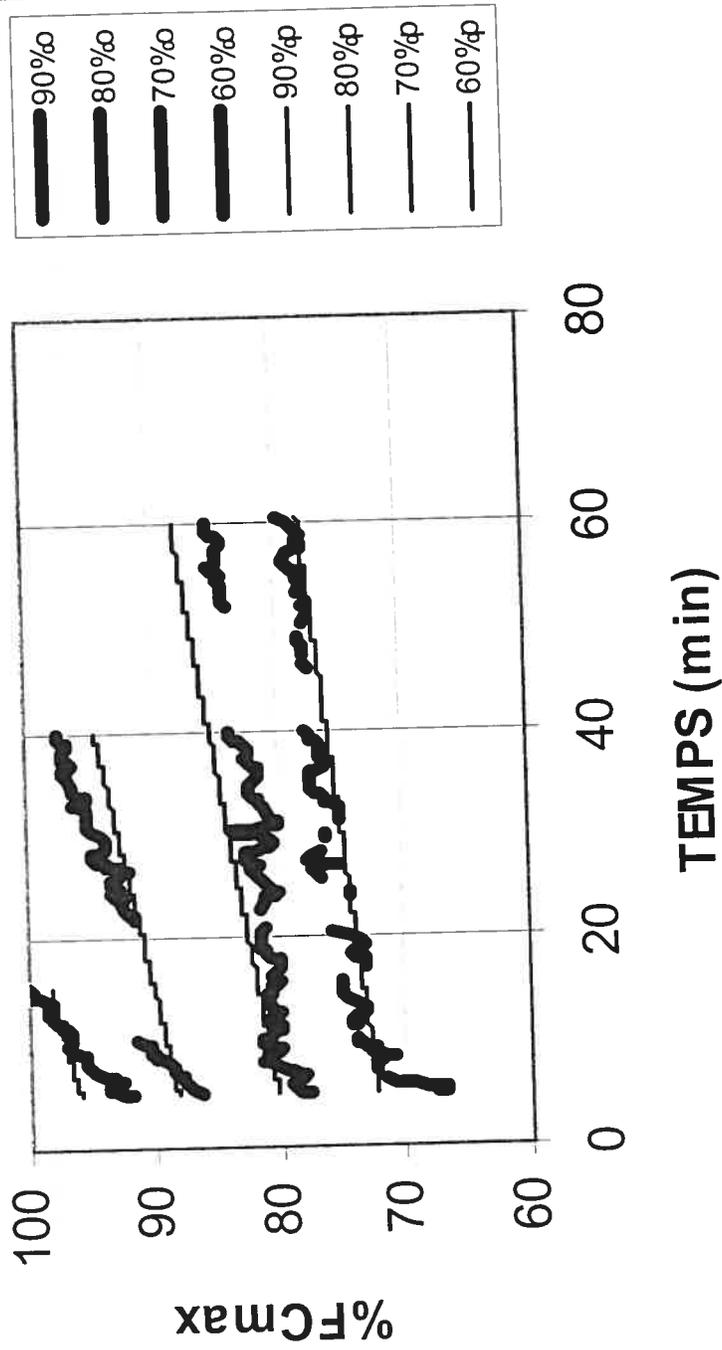


Figure 4 : Évolution de %FC prédite et observée à 60, 70, 80 et 90 %vVO_{2max}, pour l'équation 18, Sujet 1.

Même si ces deux modèles de régressions collent assez bien à la réalité, on constate des pentes différentes (plus prononcées pour ce sujet) à 90 %vVO₂max. On observe à peu près la même chose pour les autres sujets des deux groupes (données non rapportées). On constate aussi que le fait de prendre en compte la prédiction de %FCmax au moyen du test progressif étalon dans la prédiction de %FCmax lors d'efforts prolongés à intensité constante améliore légèrement l'exactitude de la prédiction (Tableau 3 et 4 et Figures 1 à 4).

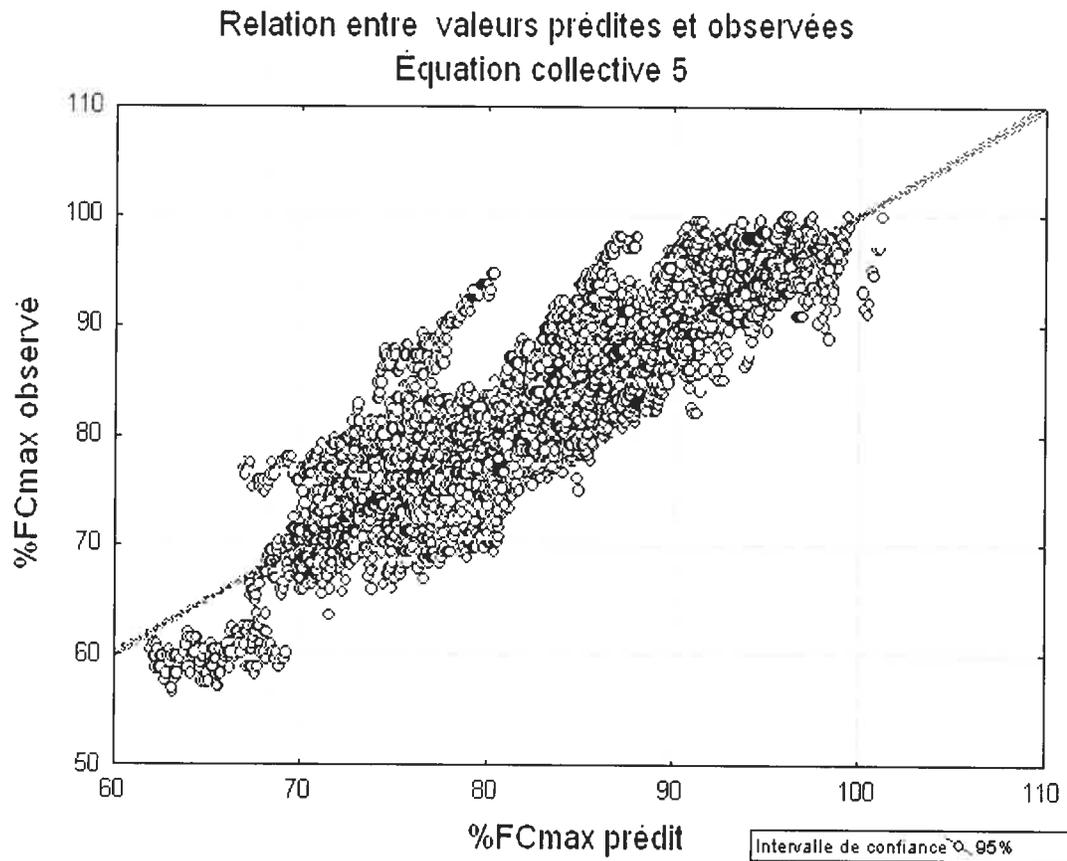
III.2. Approche collective

Cette section présente une sélection d'équations collectives afin de montrer l'influence des variables indépendantes retenues sur l'exactitude des valeurs prédites. De plus, pour être plus concis et sélectif et lorsque deux équations avaient des corrélations similaires, on ne retenait que celle qui avait moins de variables indépendantes, c'est-à-dire les équations 5, 7, 4, 12, 16 et 18. Les figures 5 et 6 illustrent la meilleure et la pire des équations (Équations 5 et 18, respectivement). D'emblée, on observe beaucoup plus de variations ou d'inexactitude que pour les équations individuelles.

D'autres schémas montrent l'évolution des valeurs prédites et observées en fonction de la durée de l'effort à 60, 70, 80 et 90 %vVO₂max. La figure 7 illustre les différences entre les valeurs prédites et observées d'un seul sujet pour 6 équations différentes alors que les figures 8 et 9 illustrent ces mêmes différences pour la meilleure et la pire des équations respectivement pour 6 sujets différents (trois sujets de chaque groupe). Si les équations collectives présentent l'ordre de grandeur des variations de FC observées lors d'efforts continus à différentes intensités pour des sujets de niveaux d'aptitude physique différents, elles ne peuvent de toute évidence prédire adéquatement les valeurs de FC sur le plan individuel.

Tableau 6 : Équations collectives (5, 7, 4, 12, 16 et 18) pour toute la population

Equation	5	7	4	12	16	18
Intercept	46,59	31,40	43,67	36,94	23,00	22,44936
Time	-0,120681	-0,113701		-0,047608	0,026998	0,03255
% vVO ₂ max	0,929411	0,790932	0,975774	0,930917	0,791744	0,79344
Time% vVO ₂ max	0,003921	0,003819	0,001910	0,002716	0,001512	0,00143
%FCtri	-0,262185		-0,355488	-0,269133		
t90	-0,572854	-0,601650				
t80						
VO ₂ max	-0,049204		-0,062143			
E1 NE0 TL80				-2,669248		
E1 NE0 VO ₂ max					-0,800934	
R	0,89	0,88	0,83	0,84	0,82	0,81
Syx	4,11	4,37	4,98	4,84	5,25	5,27
N	5794	6184	5794	5794	5794	6184

**Figure 5** : Relation entre valeurs prédites et observées pour la meilleure équation 5

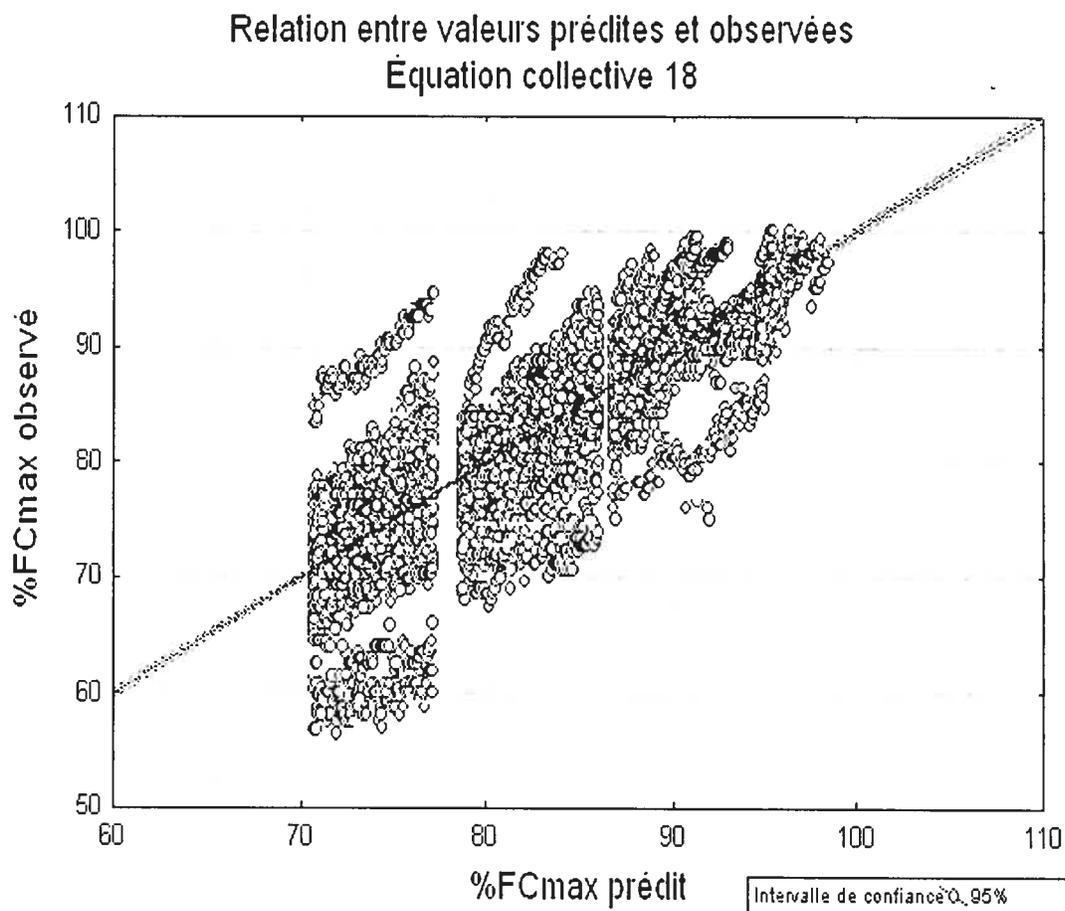


Figure 6 : Relation entre valeurs prédites et observées pour la pire équation 18

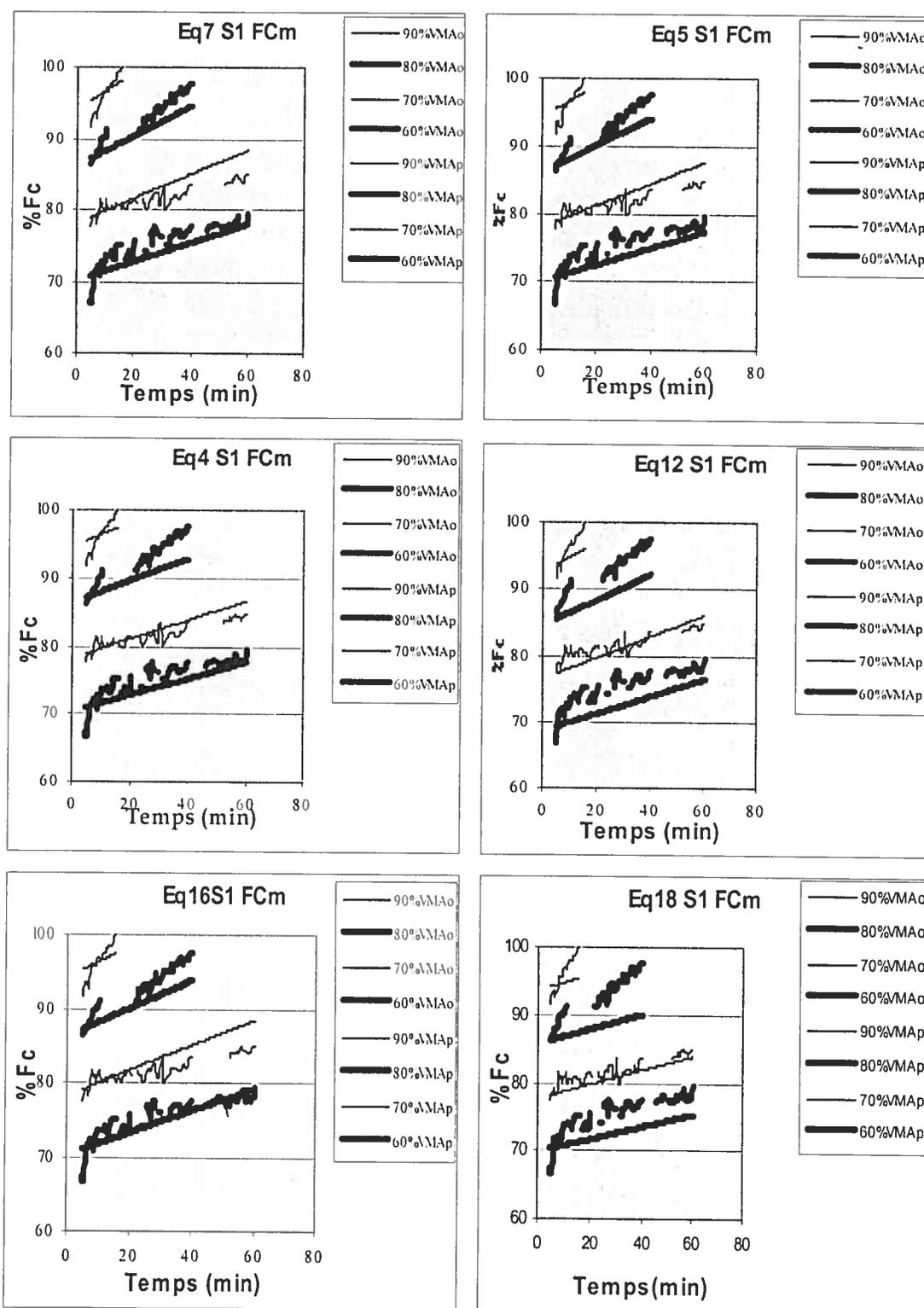


Figure 7 : Équations collectives 5, 7, 4, 12, 16 et 18 pour un seul sujet (1) Les figures démontrent la différence entre l'évolution des valeurs prédites et observées des équations pour une seule personne.

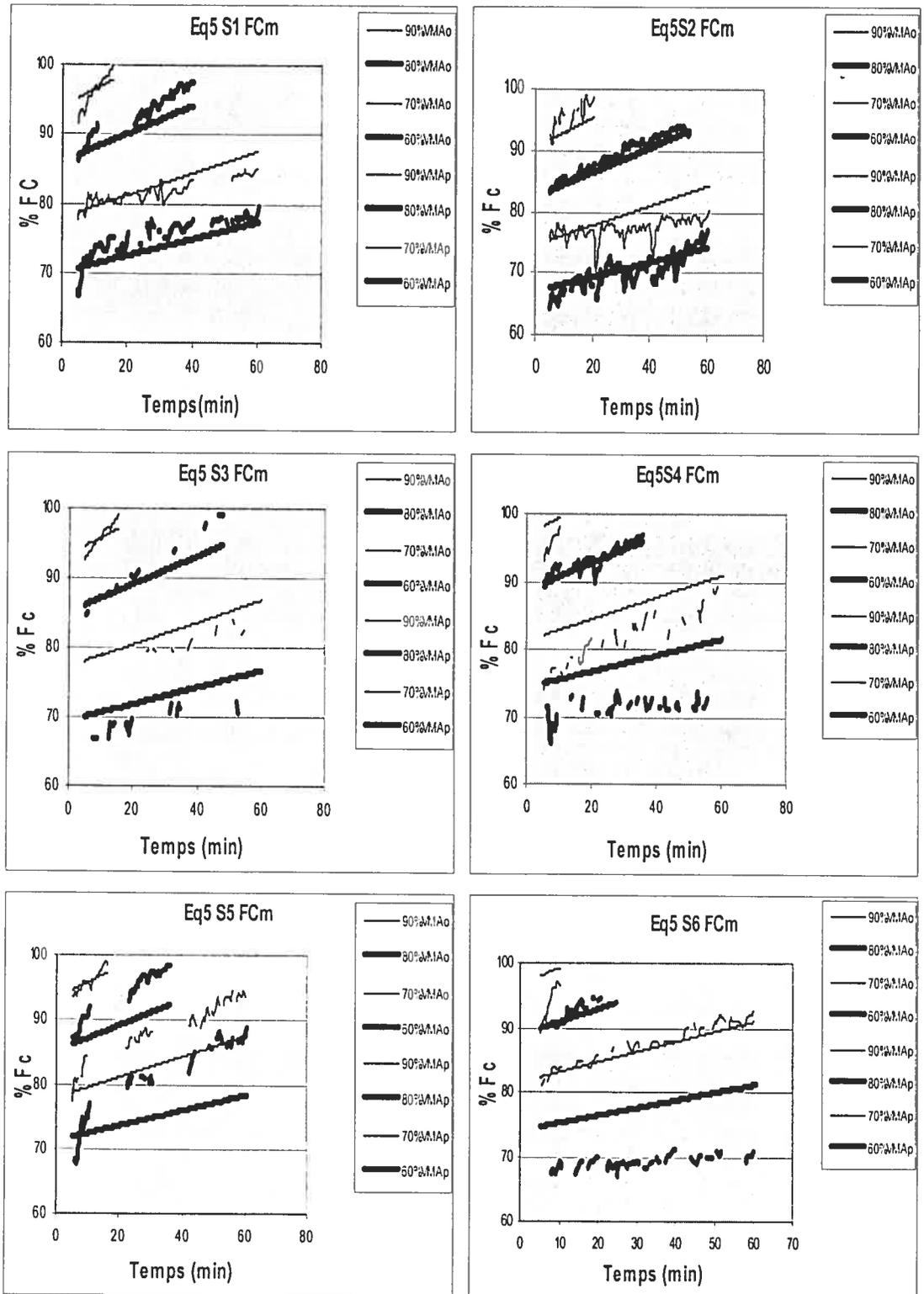


Figure 8 : Équation collective 5 pour 6 sujets. Évolution des valeurs prédites et observées pour la meilleure équation pour 6sujets.

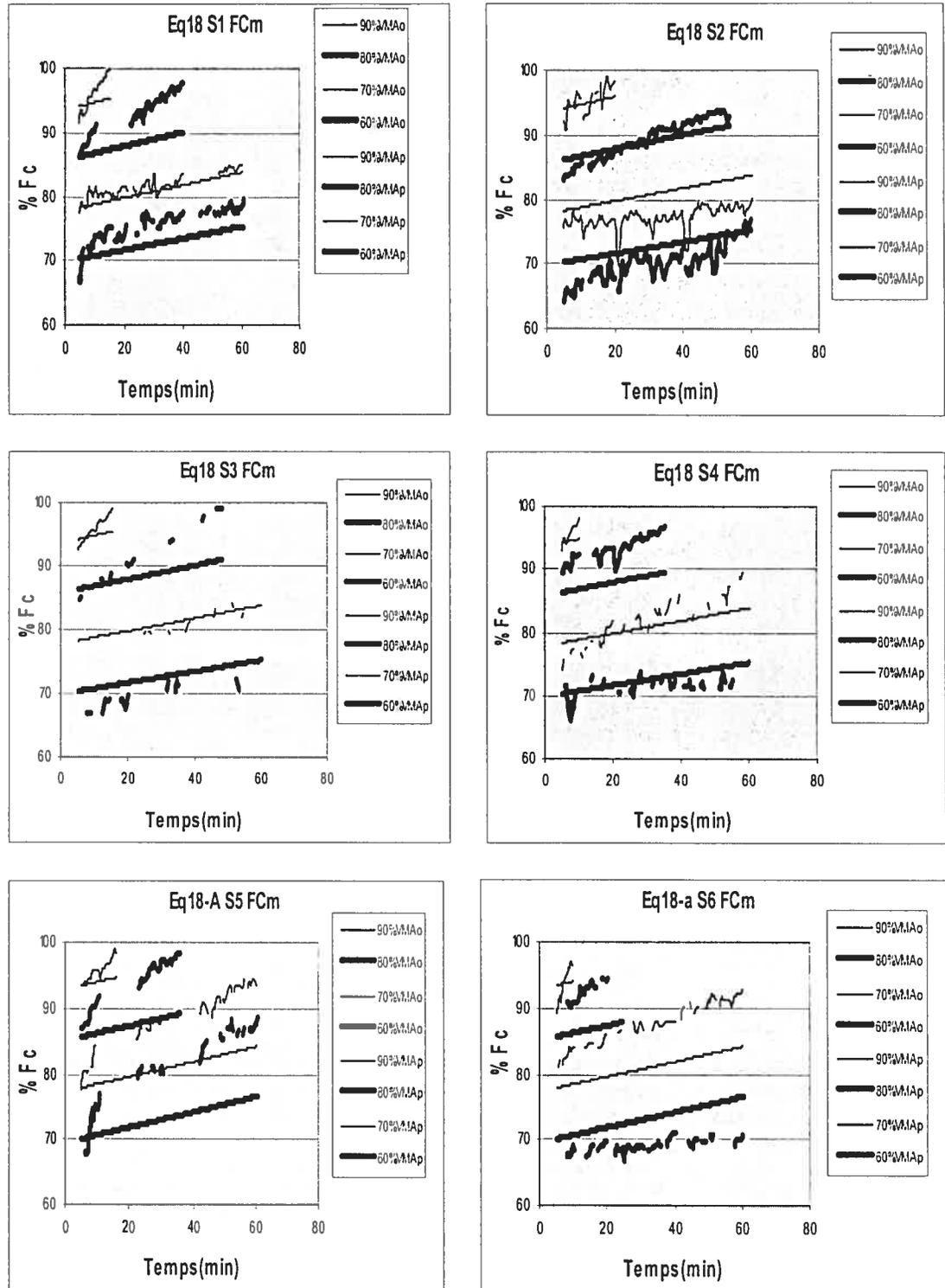


Figure 9 : Équation collective 18 pour 6 sujets Évolution des valeurs prédites et observées pour la pire équation pour 6sujets.

III.3 Approche collective à partir de la fréquence cardiaque prédite de la relation $\%FC = 220 - \text{Age}$

La formule " $\text{FCmax prédite} = 220 - \text{Age}$ " est fréquemment utilisée par les intervenants. Mais le fait d'exprimer la variable dépendante de nos modèles en $\%FC\text{max}$ prédite plutôt qu'en $\%FC\text{max}$ observée lors des tests effectués, diminue l'exactitude des modèles individuels et collectifs présentés (Tableau 3).

Le tableau 7 présente les 7 équations collectives retenues. Les figures 10 et 11 représentent la relation entre les valeurs prédites et les valeurs observées pour Eq 2 (meilleure corrélation) et Eq 18 (faible corrélation). Une représentation graphique de ces mêmes équations montre l'évolution entre les valeurs prédites et observées pour les 4 intensités figures 12 et 13.

Tableau 7 : Équations collectives (1, 2, 4, 7, 12, 15 et 18) avec $\%FC$ prédite de la relation ($\%FC = 220 - \text{Age}$).

Equation	18	15	12	7	4	2	1
Intercept	22,68287	24,99815	33,38782	35,18703	31,26960	40,89857	34,64818
Time	0,12856	0,00825	-0,00201	-0,07567	0,10679	-0,08352	0,10432
$\% vVO_2\text{max}$	0,78137	0,77182	0,85191	0,77787	0,88347	0,83230	0,89651
Time $\% vVO_2\text{max}$	-0,00020	0,00173	0,00188	0,00313	0,00012	0,00324	0,00015
$\%FC\text{tri}$			-0,16271		-0,20940	-0,11544	-0,23527
t90				-0,84020		-0,81879	
t80							
$VO_2\text{max}$					0,03657		
E1 NE0 TL80		-4,57553	-4,60198				
E1 NE0 $VO_2\text{max}$							
R	0,73	0,77	0,77	0,85	0,74	0,86	0,73
Syx	6,45	6,05	5,96	4,96	6,36	4,86	6,37
N	6184	6184	5794	6184	5794	5794	5794

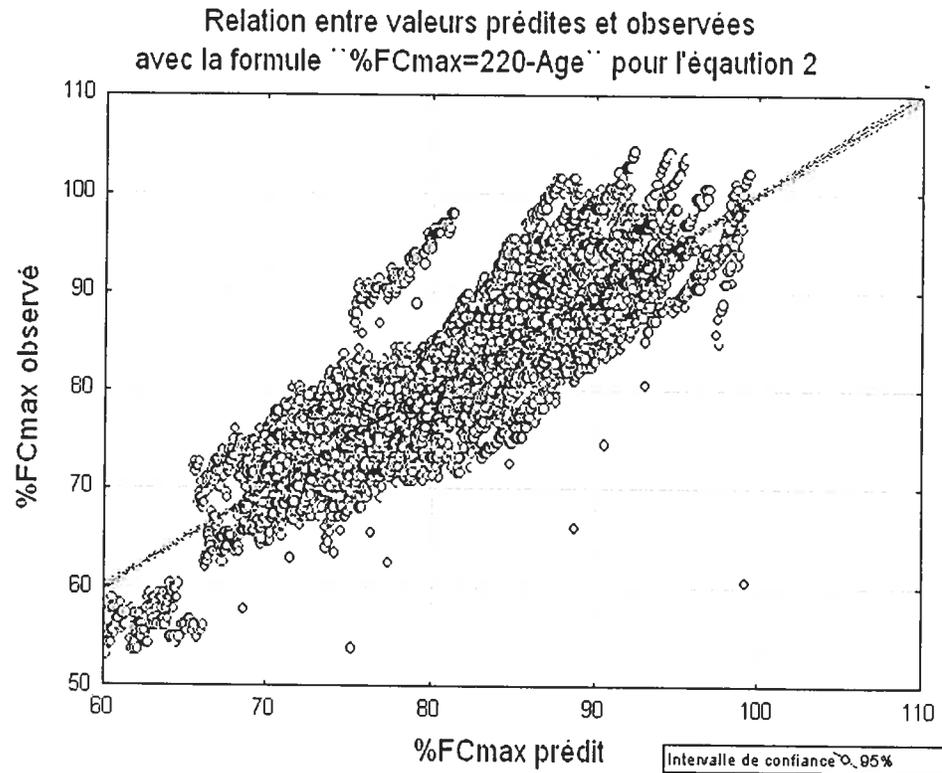


Figure 10 : Relation entre valeurs prédites et observées pour la meilleure de nos équation (Eq 2).

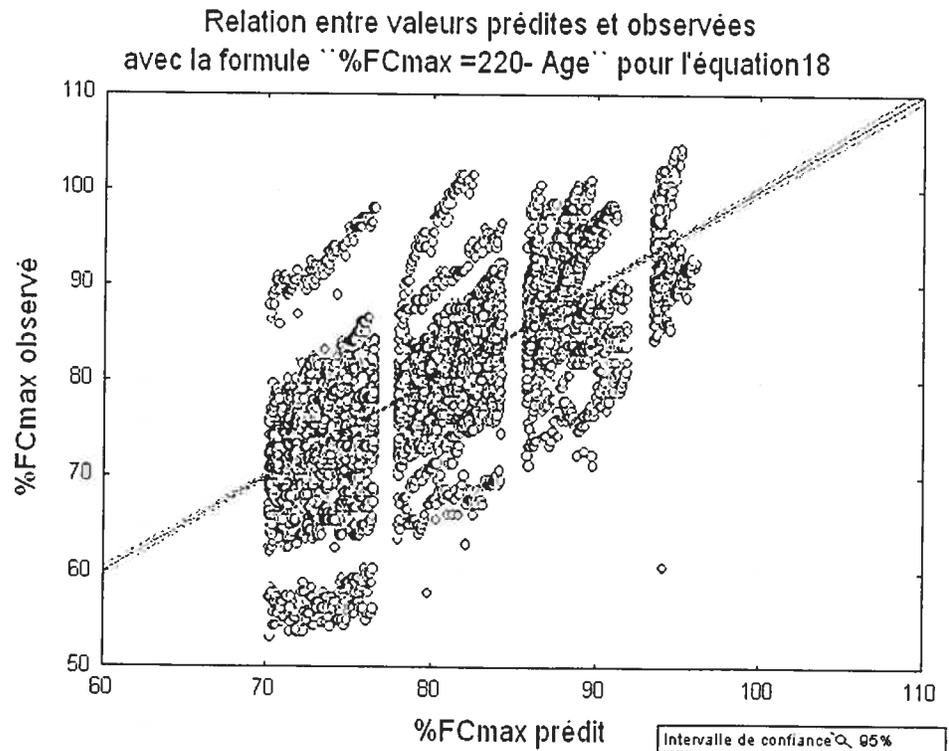


Figure 11 : Relation entre valeurs prédites et observées pour la moins bonne équation (Eq18)

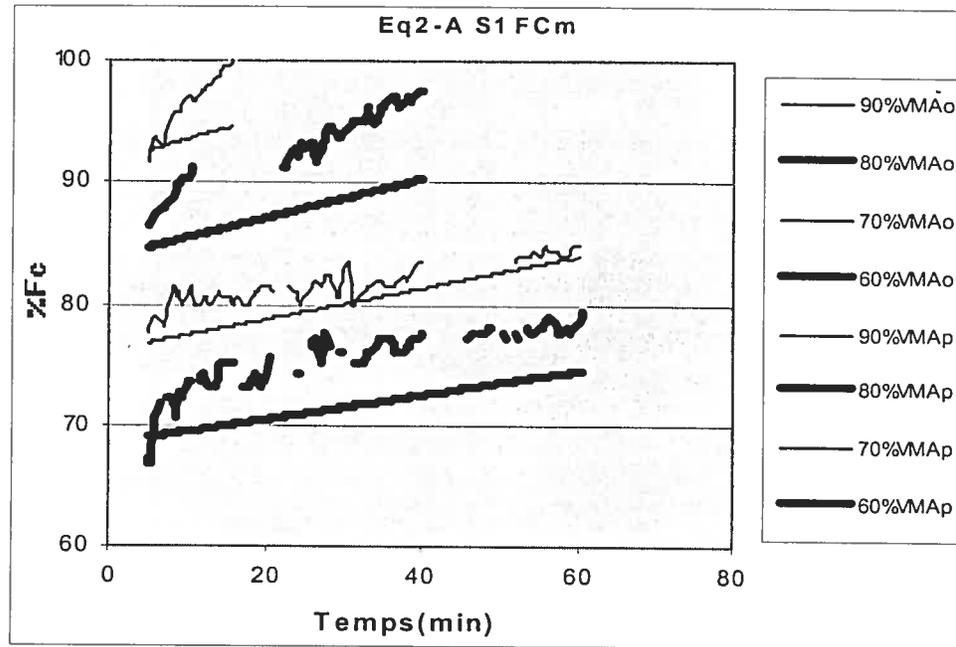


Figure 12 : Évolution du %FC prédite et observée pour 4 intensités (60, 70, 80 et 90 %) de vVO_{2max} , pour l'équation (2) sujet (1) avec l'utilisation de la relation ($\%FC = 220 - \text{age}$).

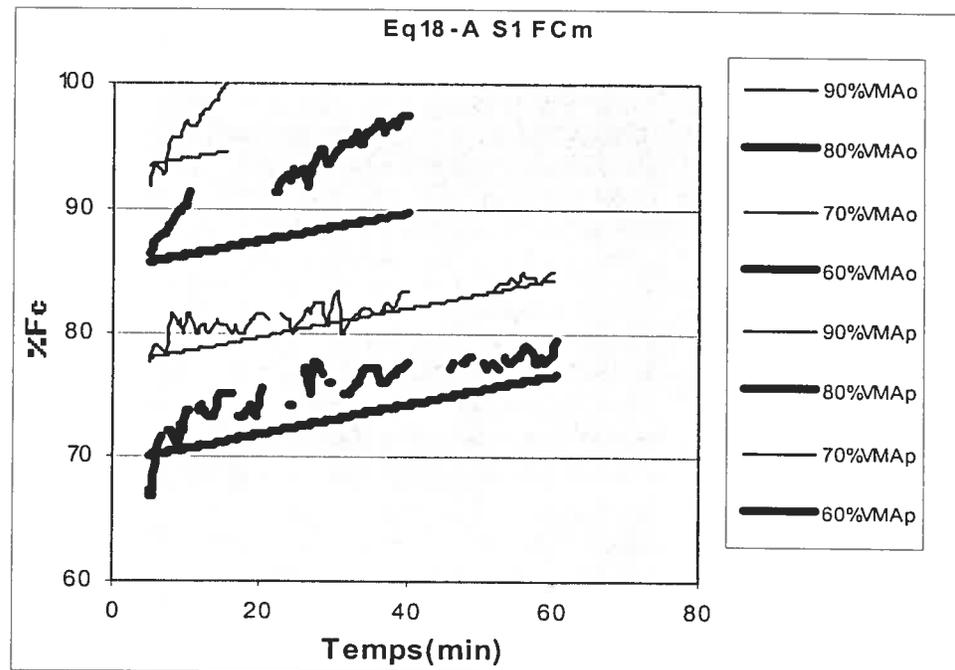


Figure 13 : Évolution du %FC prédite et observée pour 4 intensités (60, 70, 80 et 90 %) de vVO_{2max} , pour l'équation (18) sujet (1) avec l'utilisation de la relation 220-age.

III.4 : Efforts triangulaires et efforts rectangulaires.

La courbe $\%FC_{max}/\%vVO_{2max}$ établie à partir des données du test progressif ne peut se substituer à celles établies à partir des données recueillies à différents moments lors d'efforts rectangulaires (Figure 14). On note que pour une même intensité ($\%vVO_{2max}$), $\%FC_{max}$ prédit est plus élevé lors d'efforts progressifs, surtout à faible intensité.

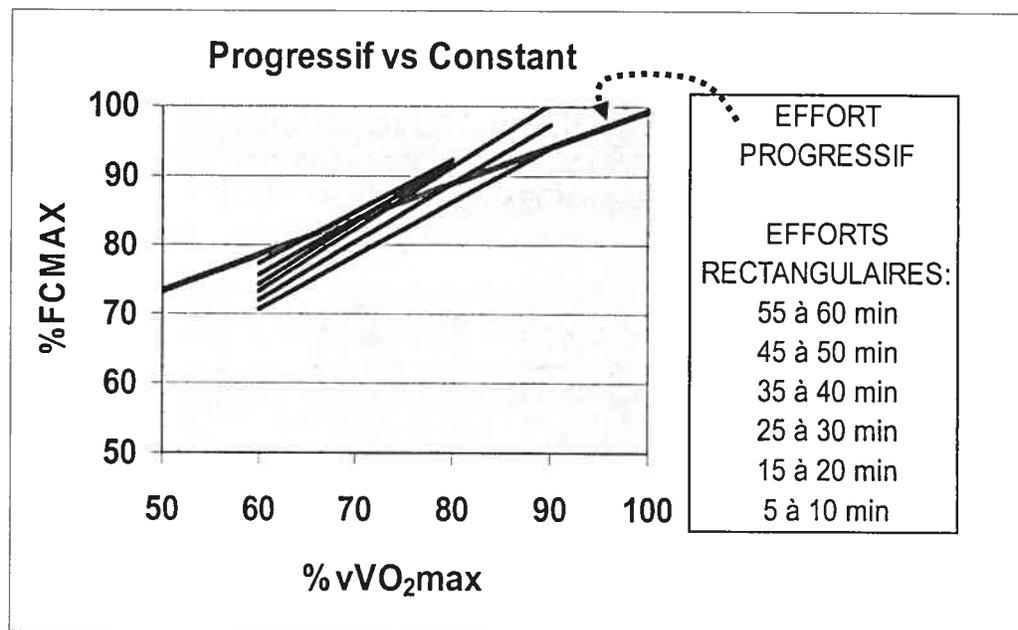


Figure 14. Prédiction du $\%FC_{max}$ à partir du $\%vVO_{2max}$ obtenu lors d'efforts continus progressifs et constant à $\%vVO_{2max}$ variés

III.5 Sensibilité des modèles aux effets systématiques de l'endurance sur les valeurs du % FCmax prédites.

Les modèles établis permettent de mieux voir l'ampleur des différences moyennes sur les valeurs du %FCmax en fonction du temps pour des sujets fictifs ayant respectivement des tLim à 90 %vVO₂max de 10 et 20 minutes pour un modèle où le niveau d'endurance est pris en compte de façon dichotomique en classant subjectivement et a priori le niveau d'endurance des sujets dans les catégories élevées (=1) ou faibles (=0) (Eq 16, Figure 15) et un autre modèle où le tLim exact à 90 %vVO₂max est pris en compte (Eq 7, Figure 16). On note que le modèle le moins valide n'arrive pas à discriminer l'effet de l'endurance sur les valeurs du %FCmax en fonction du temps lors d'efforts à intensités constantes de différentes intensités. D'autre part, si l'on tient compte directement du tLim à 90 %vVO₂max, on note un effet potentiel important du niveau d'endurance sur les valeurs du %FCmax prédites quel que soit l'intensité ou le moment de l'effort à intensité constante.

III.6 Récapitulation générale sur les résultats.

Pour une meilleure vue d'ensemble sur la validité des différents modèles proposés, on peut comparer la corrélation et les erreurs types de l'estimé des différents modèles (Figures 17 et 18) pour constater la nette supériorité des modèles individuels. La validité des modèles collectifs apparaît insuffisante sur un plan individuel et varient beaucoup selon les variables indépendantes considérées. Enfin, établir des modèles pour %FCmax prédite est moins valide que pour %FCmax réelle.

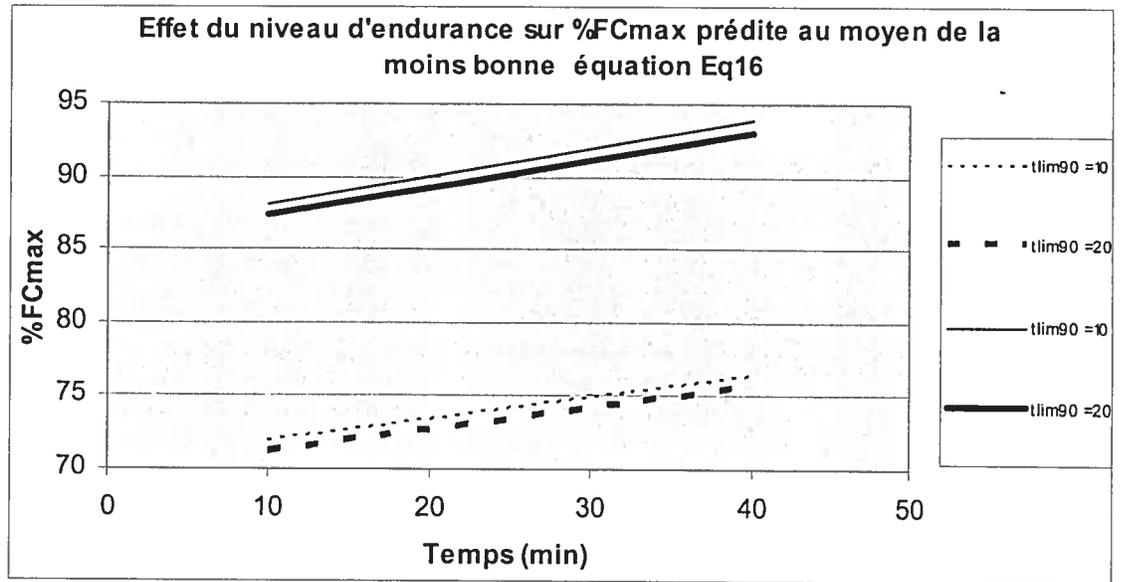


Figure 15 : Effet moyen du niveau d'aptitude physique sur les valeurs du %FCmax en fonction de la durée de l'effort à 60 et 80 %vVO₂max pour deux sujets fictifs ayant respectivement des tLim à 90 %vVO₂max de 10 et 20 minutes en utilisant un modèle d'équation où le niveau athlétique est dichotomiquement pris en compte (Bon=1 et Faible=0, Eq 16).

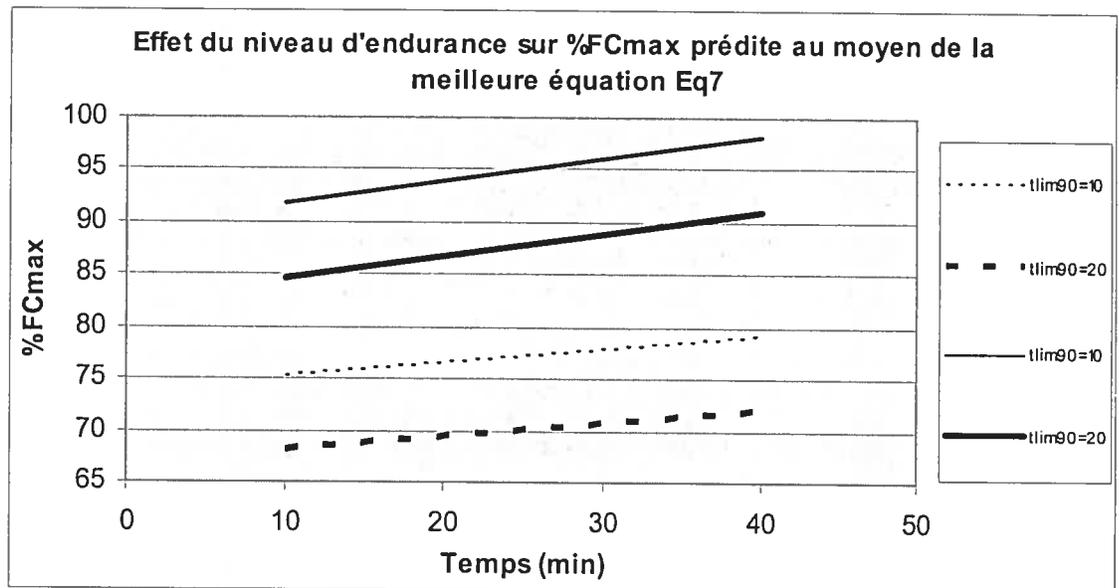


Figure 16 : Effet moyen du niveau d'aptitude physique sur les valeurs du %FCmax en fonction de la durée de l'effort à 60 et 80 %vVO₂max pour deux sujets fictifs ayant respectivement des tLim à 90 %vVO₂max de 10 et 20 minutes en utilisant un modèle d'équation où la valeur exacte de tLim à 90 %vVO₂max est prise en compte (Eq 7).

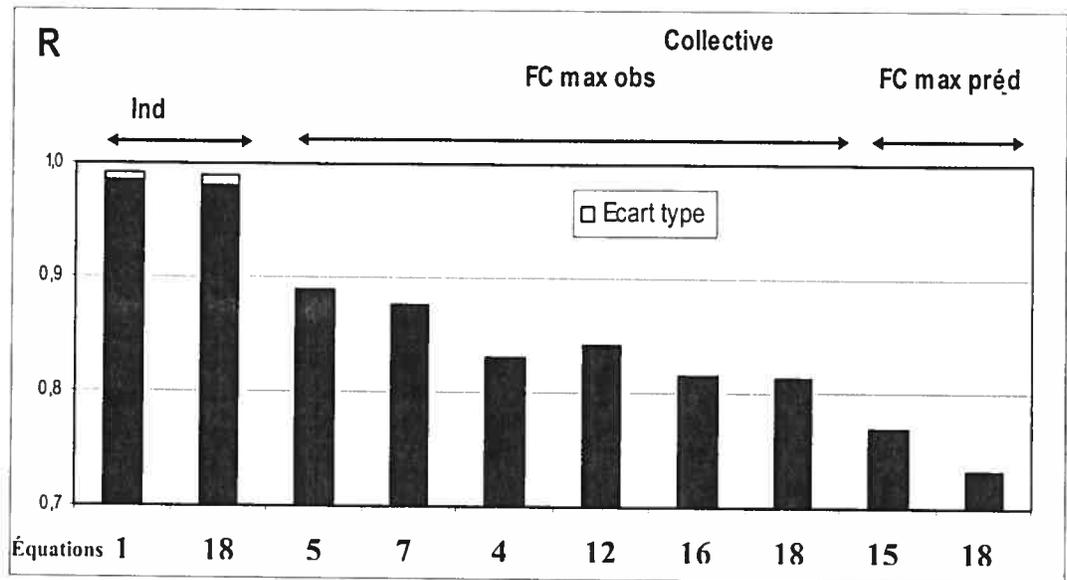


Figure 17 : Valeurs de la corrélation de quelques équations représentatives (Individuelles les 2 première en partant de la gauche, Collectives observés les 6 du milieu, Collectives prédites les 2 dernière a droites).

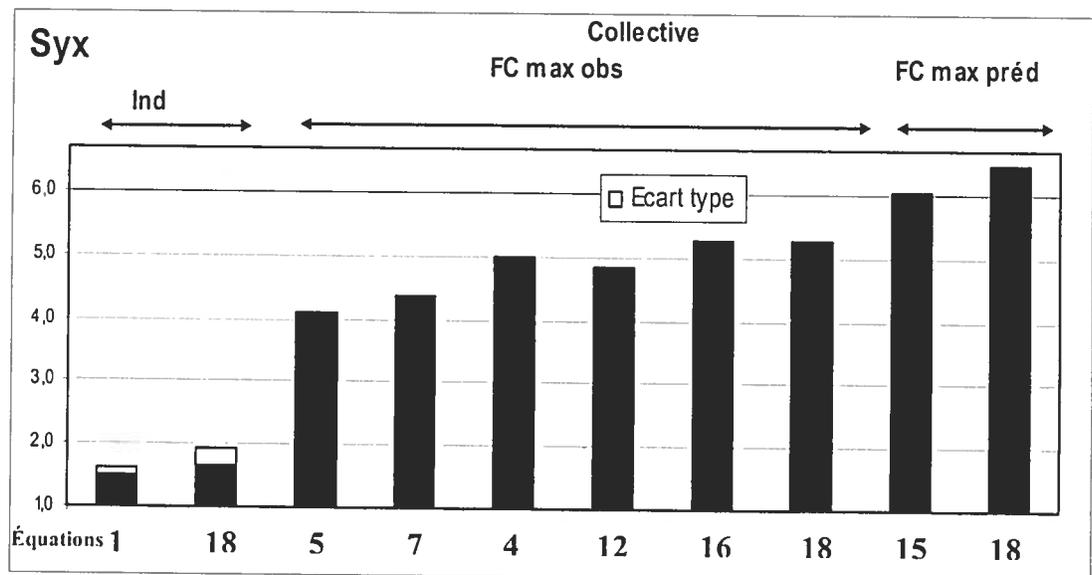


Figure 18 : Valeurs de l'erreur type estimée de quelques équations représentatives (individuelles les 2 première en partant de la gauche, Collectives observés les 6 du milieu, Collectives prédites de la relation les 2 dernière a droites).

IV Discussion

L'objectif de notre étude était de quantifier les effets moyens de l'intensité de l'effort et du niveau d'endurance sur la cinétique du %FCmax en fonction de la durée de l'effort rectangulaire et de voir si certains modèles de régressions étaient suffisamment exacts pour prédire %FCmax en fonction de la durée de l'effort sur une base individuelle.

Les résultats obtenus dans la présente étude montrent que %FCmax lors d'efforts à intensité constante ne dépend pas seulement de l'intensité de l'effort (%vVO₂max), mais aussi du temps de l'effort, de l'endurance (tLim à 80 ou 90 %vVO₂max) et du VO₂max des sujets (Tableaux 4 à 7). De plus même s'il fut démontré que les courbes %FCmax / %vVO₂max obtenues à partir des données des tests triangulaires et des tests rectangulaires, étaient différentes (Figure 14), la prédiction du %FCmax lors d'efforts rectangulaires pouvait être améliorée en tenant compte du %FCmax prédit à partir d'une courbe étalon individuelle %FCmax / %vVO₂max. C'est donc en incluant ou excluant ces variables que nous avons retenu certains modèles de régression et en avons étudié leur degré d'exactitude respectif.

Même si notre préoccupation première était de déterminer %FCmax lors d'efforts rectangulaires typiquement utilisés pour l'entraînement aérobie, ce qui explique que nous ayons choisi de considérer %FCmax comme variable dépendante et %vVO₂max comme variable indépendante, la relation %FCmax/%vVO₂max ou plutôt la relation inverse, %vVO₂max/%FCmax, présente aussi un intérêt certain dans les études où l'on essaie de déterminer la dépense énergétique à partir du %FCmax. En général, comme la corrélation entre ces deux variables, même avec des modèles collectifs, est supérieure à 0,8 (Tableau 3), il n'y a pas trop d'erreurs encourues à transformer algébriquement les équations obtenues dans l'un ou l'autre des deux formats.

A cet égard il apparaît intéressant de voir où se situe notre courbe collective %FCmax/%vVO₂max du test triangulaire par rapport à celles rapportées dans la

littérature pour des efforts réalisés exclusivement sur tapis roulant. (Tableau 8 et Figure 19).

Tableau 8. Équations rapportées dans la littérature pour efforts triangulaires sur tapis roulant.

$\%FC_{max} = a + b \%vVO_{2max}$						
Référence	Intercept	Pente	r	Syx	n	Notes
(Rowell et al. 1964)	29.60	0.92				max exclu
Saltin et al. (1968)	28.33	0.83				max exclu
Davies (1968)	27.20	0.95				max exclu
Taylor et al. (1969)	29.86	0.69				
Hellerstein et al. (1973)	26.67	0.76				cardiaques
Hellerstein et al. (1973)	29.79	0.71				normaux
Skinner J et Jankowski L (1974)	34.67	0.67				
Londeree et Ames (1976)	29.93	0.73	0.97	5.7		
Londeree et Ames (1976)	24.64	0.83				max exclu
Franklin et al. (1980)	18.42	0.75	0.94	6.9		
Leger et al. (1991)	38.35	0.64	0.857	5.38	191	
Londeree et al. (1995)	26.54	0.77	0.96			
Bernard et al. (1997)	35.48	0.65	0.985		20	
Bot et Hollander (2000)	36.34	0.70	0.88	8.7		Intensité instable
PRÉSENTE ÉTUDE	44.56	0.55	0.91	3.1	25	
Notes: Max exclu: les valeurs maximales (partie non linéaire de la courbe) sont exclues; cardiaques: sujets cardiaques; intensité instable: activités cycliques avec accélérations et décélérations fréquentes et soudaines.						

On constate qu'il y a passablement des différences dans la position verticale de ces courbes. Mais si on exclut la courbe inférieure (Franklin et al. 1980) ainsi que

les courbes en pointillés tracées en excluant les valeurs près du maximum caractérisées par une relation curvilinéaire, la variabilité entre ces courbes est considérablement réduite et notre courbe est conforme à celles de la littérature tout en se situant dans la partie supérieure de celles-ci.. Il serait bien entendu préférable d'exclure les valeurs maximales (zone non linéaire) dans le calcul d'une relation linéaire (Londeree et Ames 1976). Mais en ce qui concerne nos données, il n'y a pas de différence entre les courbes obtenues en incluant ou non les valeurs au-dessus de 85%vVO₂max (Figure 20) du moins lorsque les données de tous les individus sont regroupées ensemble.

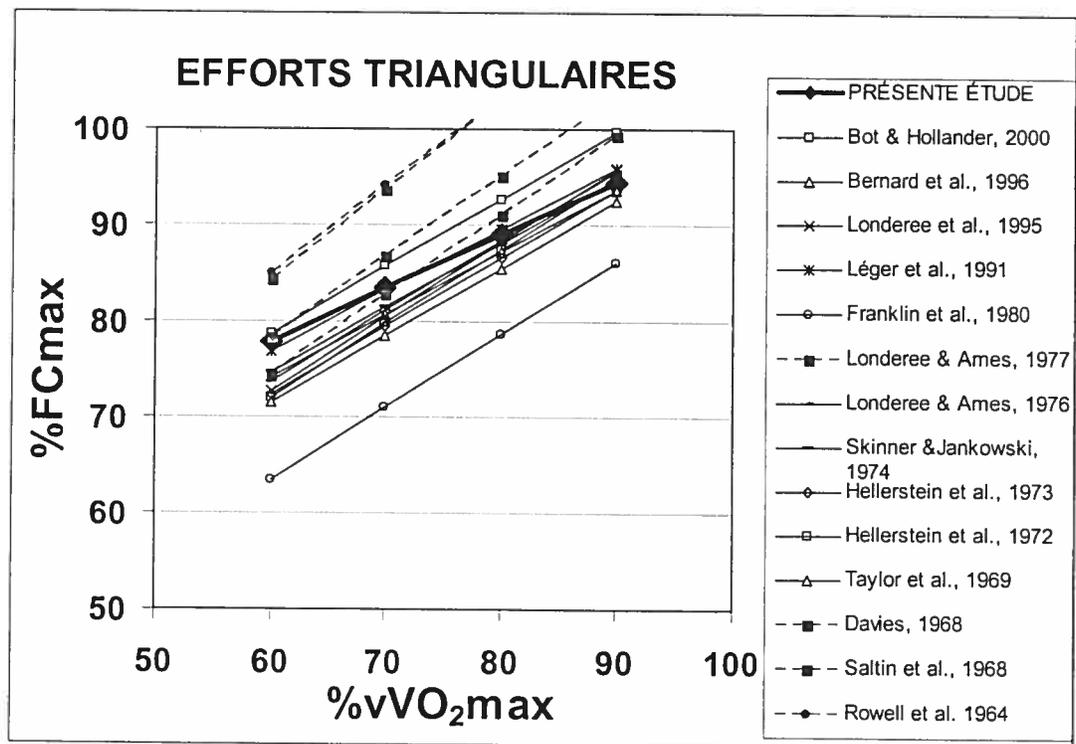


Figure 19. Courbes rapportées dans la littérature pour efforts triangulaires sur tapis roulant. Courbe surlignée: présente étude. Courbes en pointillés établies en excluant les valeurs maximales non linéaires.

Nos données étant conformes à celles de la littérature, nous pouvons maintenant nous attarder à la différence entre les courbes établies lors d'efforts triangulaires et

rectangulaires (Figure 14). Comme ces courbes proviennent des mêmes sujets mesurés dans ces deux conditions respectives, celles-ci semblent donc à l'origine de ces différences. Fait surprenant, %FCmax prédit pour une vitesse donnée, est supérieur lors d'efforts triangulaires surtout à faibles intensités alors que ces efforts n'ont été maintenus que quelques minutes contrairement aux efforts rectangulaires maintenus pendant 60 minutes pour les efforts à faibles intensités (60 et 70 %vVO₂max). Il est donc difficile d'expliquer la position verticale plus élevée de la courbe du test progressif.

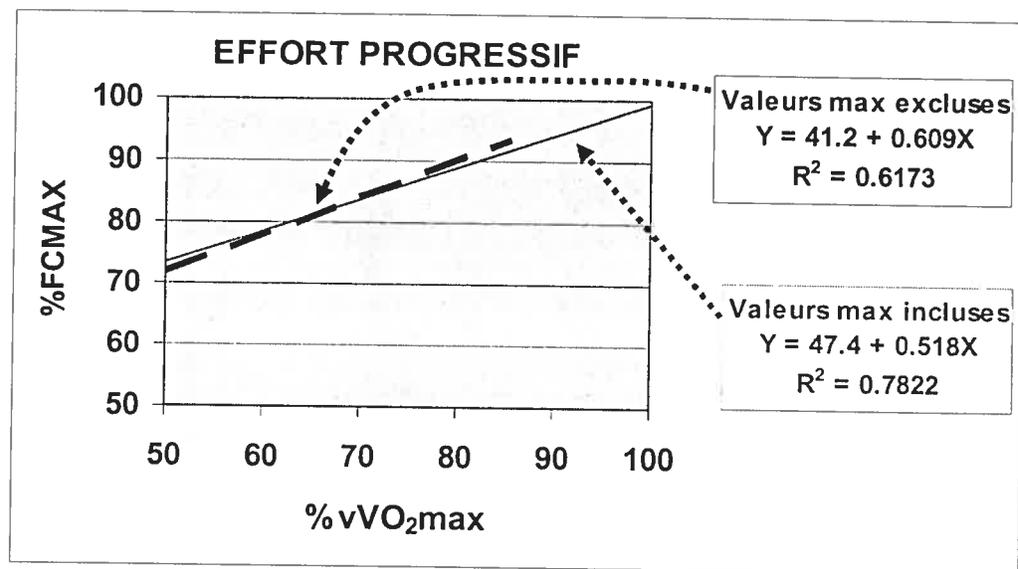


Figure 20. Courbes collectives obtenues en incluant ou non les valeurs au-dessus de 85 %vVO₂max lors du test progressif.

En réalisant cette étude, on postulait que les courbes étalons %FCmax/%VO₂max établies lors d'efforts triangulaires ne s'appliquent pas aux efforts rectangulaires. On constate en effet que %FCmax à tel ou tel %vVO₂max diffère beaucoup selon le temps de l'effort rectangulaire (Figure 14). Un modèle de régression simple (%vVO₂max seulement comme variable indépendante) qu'il soit établi à partir de données obtenues lors d'efforts triangulaires ou rectangulaires, ne peut donc convenir pour des efforts rectangulaires.

Remarquons que pour des raisons pratiques, on a mis l'accent sur les courbes du %FCmax en fonction du %vVO₂max et non du %VO₂max, parce qu'on régule

l'intensité de l'entraînement en fonction de la vitesse de course et non du niveau métabolique correspondant (VO_2). Même si $\%VO_2\max$ est sujet à dérive alors que $\%vVO_2\max$ ne l'est pas, il n'y a pas beaucoup de différence entre les courbes $\%FC/\%vVO_2\max$ et $\%FC\max/\%VO_2\max$ quelques soient obtenues lors d'efforts triangulaires ou rectangulaires (Figure 21).

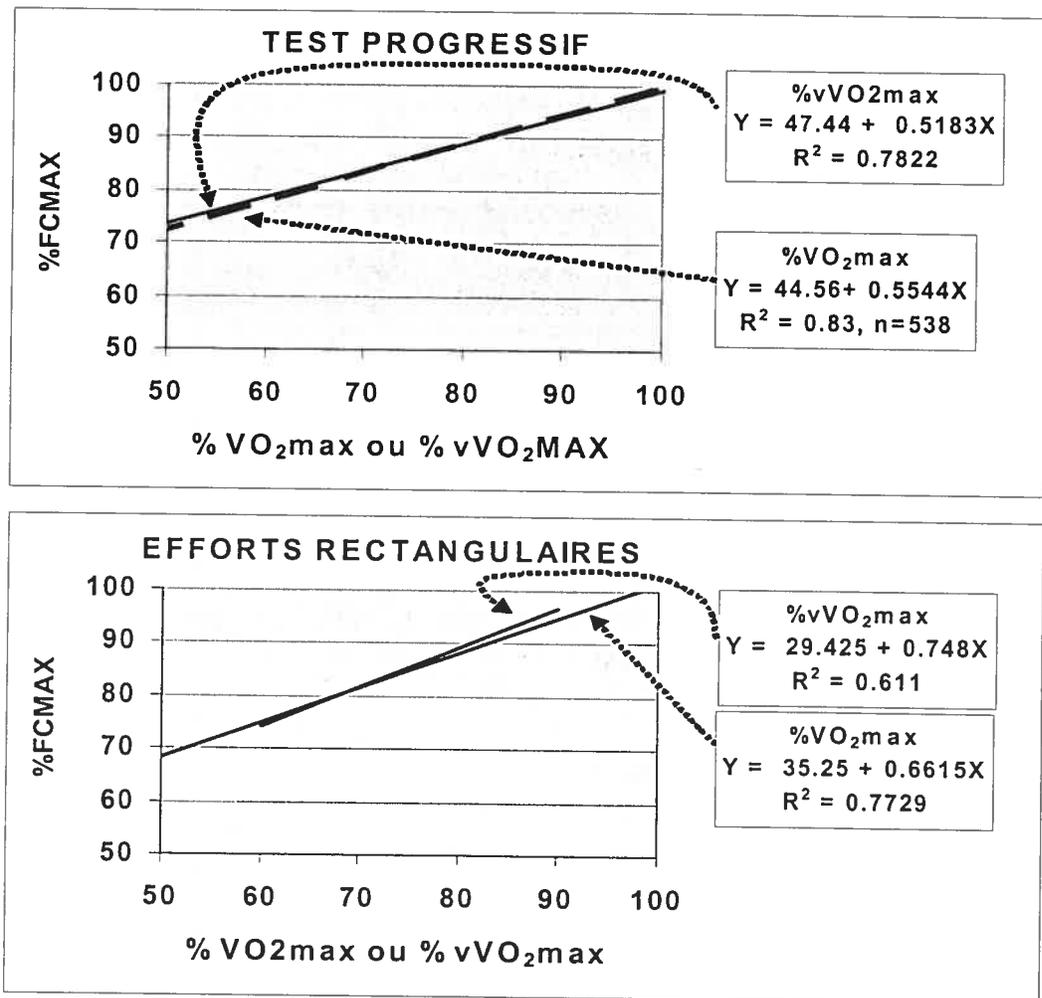


Figure 21. $\%VO_2\max$ ou $\%vVO_2\max$ comme variable indépendante.

Dans le but de prédire $\%FC\max$ lors d'efforts rectangulaires, nous avons testé plusieurs modèles de régression. Le modèle le plus simple n'inclut que $\%vVO_2\max$ et le temps de l'effort rectangulaire (Eq 18, Tableaux 3 et 6). Puis dans le but d'améliorer l'exactitude de la prédiction, nous avons essayé d'ajouter d'autres variables prédictives comme le $VO_2\max$ et/ou l'endurance du sujet mesurée par $tLim$

à 80 ou à 90 %vVO₂max ou encore %FCmax prédit à partir du %vVO₂max d'un test étalon individuel triangulaire. Cette dernière variable ainsi que VO₂max sont facilement disponibles à la suite d'un test triangulaire conventionnel. Par contre les valeurs des tLim requièrent un test additionnel. Nous avons aussi pensé à attribuer à priori un niveau d'endurance ou de VO₂max aux sujets sur la base de leur performance ou de leur entraînement hebdomadaire au moyen de deux catégories: Niveau faible <40 min < Niveau élevé pour tLim ou Niveau faible < 60 ml kg⁻¹ min⁻¹ < Niveau élevé pour VO₂max dans l'éventualité où aucun test de VO₂max ou de tLim n'aurait été effectué. De même si FCmax n'est pas disponible, %FCmax fut exprimé en pourcentage de FCmax prédite selon la formule classique "FCmax=220-AGE". Tel qu'attendu, ces différentes approches collectives pour prédire %FCmax lors d'efforts rectangulaires n'ont pas tous le même degré d'exactitude. En ce qui concerne les erreurs aléatoires (Tableaux 3, 6 et 7), exprimer %FCmax à partir de la formule "FCmax=220-AGE" entraîne plus d'erreurs qu'à partir de la FCmax mesurée en laboratoire. En fait FCmax dépend non seulement de l'âge mais aussi de l'aptitude physique, du mode d'exercice et du continent d'appartenance (Londree and Moeschberger 1984; Vidalin, Fellmann et al. 1989) de sorte que l'erreur type de l'estimé de FCmax à partir de l'âge est de 11 bat min⁻¹, ce qui est assez appréciable et contribue à augmenter l'erreur de la prédiction de %FCmax lors d'efforts rectangulaires si FC est exprimée en fonction de FCmax prédit plutôt que de FCmax réel.

D'autre part, attribuer arbitrairement les sujets aux niveaux élevé ou faible, est moins exact que de considérer la valeur mesurée de tLim ou de VO₂max. L'exactitude de la prédiction s'améliore graduellement quand on ajoute à %vVO₂max, temps, tLim, VO₂max et %FCmax prédit à partir de la courbe étalon individuelle %FCmax/%vVO₂max lors du test triangulaire. De plus, tLim à 90 %vVO₂max semble plus exact que tLim à 80%vVO₂max et tLim est aussi plus exact que VO₂max pour prédire %FCmax lors d'efforts rectangulaires.

Nous ne connaissons aucune autre étude essayant de décrire et modéliser systématiquement %FCmax en fonction du %vVO₂max et du temps lors d'efforts

intermittents. D'autres fort nombreux (Ekelund 1967; Rowell, Murray et al. 1969; Casaburi, Storer et al. 1987; Lajoie, Laurencelle et al. 2000; Coyle and Gonzalez-Alonso 2001) ont cependant étudié le phénomène de dérive de FC lors d'efforts rectangulaires. Ainsi, (Ekelund 1967; Rowell, Murray et al. 1969; Mullin, Herrick et al. 1984; Grant, Green et al. 1997) ont aussi observé que l'entraînement était associé à une dérive moins prononcée et à des %FCmax moins élevés. Notre étude ainsi que la plupart des études antérieures ont été effectuées sur des sujets adultes. Lors d'efforts progressifs, (Leger, Gutierrez et al. 1991) ont cependant observé des valeurs du %FCmax systématiquement moins élevées en fonction de l'âge des sujets entre 6 et 50 ans. Le même phénomène devrait donc caractériser les efforts rectangulaires.

Les meilleurs modèles collectifs de la présente étude (Eq 5 et 7, Tableaux 6) donnent peut être une idée acceptable de l'évolution moyenne de %FCmax en fonction du temps et du %vVO₂max (courbes théoriques des Figures 7, 8, 9, 14 et 16) mais sur le plan individuel, les erreurs aléatoires (Tableau 6 et Figures 4 et 5) et systématiques (Figures 7, 8 et 9) sont trop importantes pour que ces équations soient utiles dans le cadre d'applications d'entraînement. Le principal problème avec une équation commune pour tous, c'est qu'elle se concrétise par une pente de dérive et des positions verticales de %FCmax identique pour tous alors qu'individuellement, ce n'est pas le cas (courbes réelles vs courbes théoriques de la Figure 9). Dans la figure 9 (Eq 18), l'équation ne prend en compte que %vVO₂max et le temps et les courbes théoriques sont les mêmes quel que soit le sujet mais les valeurs réelles sont différentes et se positionnent donc différemment par rapport aux courbes théoriques. La figure 8 présente un meilleur modèle (Eq 5, Tableau 6) puisqu'il prend aussi en compte tLim à 90 %vVO₂max, VO₂max et %FCmax prédit lors du test étalon individuel progressif mais les courbes théoriques sont alors différentes d'un sujet à l'autre, on observe toujours des écarts variables entre les courbes théoriques et réelles mais ces écarts sont un peu moindres que ceux de la figure 9 puisqu'on tient compte d'autres prédicteurs, ce qui a pour effet de réduire les erreurs systématiques et l'erreur aléatoire globale.

Comme les modèles collectifs de prédiction de %FCmax sont inadéquats sur une base individuelle, nous avons examiné les modèles individuels. Avec ces modèles, on ne peut prendre en compte les valeurs de $VO_2\text{max}$ ou de $t\text{Lim}$ pour améliorer la prédiction puisque ces valeurs restent constantes pour un individu donné. Nous n'avons donc retenu que deux modèles. En ce qui concerne les erreurs aléatoires, il n'y a pas beaucoup de différences entre les deux modèles étudiés et ils sont tous deux excellents. Ainsi la moyenne des corrélations pour les 6 sujets retenus appartenant à part égale aux deux groupes d'endurance ($40 \text{ min} < t\text{Lim}$ à $80 \%vVO_2\text{max} > 40 \text{ min}$), était de 0.985 et 0.980 pour la meilleure et la moins bonne des équations, Eq 1 et Eq 18, respectivement (Tableaux 4 et 5). Le fait d'ajouter les valeurs du %FCmax correspondant à $\%vVO_2\text{max}$ observé lors d'un test triangulaire (Eq 1) n'améliore donc que très peu l'exactitude de la prédiction du %FCmax lors d'efforts rectangulaires. Quoiqu'il en soit, les modèles individuels sont nettement supérieurs aux modèles collectifs et apparaissent suffisamment précis pour prédire les valeurs de %FC en fonction de l'intensité ($\%vVO_2\text{max}$) et du temps lors d'efforts rectangulaires avec des erreurs type de l'estimé inférieures à 2 %FCmax (Tableaux 4 et 5).

Ceci étant dit le modèle utilisé prévoit des augmentations linéaires de %FC en fonction du temps avec des augmentations de pente régulières entre les intensités, ce qui n'est pas toujours le cas. Ainsi on voit particulièrement à $90\%vVO_2\text{max}$, des écarts non négligeables entre %FCmax théorique et %FCmax réel (Figures 3 et 4). D'autre part, si l'on se fie aux données des figures 3 et 4, il semble que Eq 1 soit aussi moins sujette aux erreurs systématiques que Eq 18, mais l'analyse des données des 5 autres sujets (non illustrés) montre qu'à cet égard, les deux équations se valent bien.

On peut se questionner sur l'intérêt d'un modèle individuel puisqu'il faut faire tous les tests nécessaires à chacun des sujets pour l'obtenir; en d'autres termes il ne peut être a priori expérimentalement défini comme les modèles collectifs. D'autres part, bien qu'il faille mesurer le sujet à au moins 3 intensités, %FCmax pourra, par la suite, être prédit à d'autres intensités sans avoir à mesurer les sujets à nouveau. De plus, si les $t\text{Lim}$ ou $VO_2\text{max}$ des sujets changent, un nouveau %FCmax pourra être

estimé sans avoir à refaire le modèle. Par exemple, avec l'équation individuelle no 1 du sujet 1 (Tableau 4), on prédit que %FCmax sera à 89% à la 23^e min d'un effort à 77%vVO₂max sachant qu'à cette intensité le sujet était à 85 %FCmax lors d'un test triangulaire étalon.

V. Conclusion

L'intérêt de cette étude était d'élaborer des équations qui pourront permettre de calculer le %FC en fonction de différents paramètres (temps, intensité, VO₂max, tLim à 80 %vVO₂max...) dans le but d'ajuster au mieux les intensités d'entraînement. L'idée principale est de prendre en considération les données mesurées lors d'efforts effectués à charge constante pour calculer les paramètres permettant un entraînement de type qualitatif.

De façon générale les tests utilisés pour déterminer les intensités d'entraînement, sont de type triangulaire (augmentation croissante de l'intensité) alors que les efforts d'entraînement sont principalement rectangulaires. Cette étude a permis de démontrer que des modèles de prédictions de %FCmax à partir de %vVO₂max lors de tests triangulaires n'étaient pas convenables pour des efforts rectangulaires. Des équations développées, on a pu voir que parmi les deux indicateurs du niveau d'endurance, le temps limite à 90 %vVO₂max est le meilleur prédicteur de %FCmax que le temps limite à 80 %vVO₂max.

L'application de ces relations sur des données réelles a montré que seule l'utilisation d'équations individuelles sur des données individuelles donne des résultats cohérents et satisfaisant sur une base individuelle alors que les modèles collectif donnent plutôt une description moyenne de l'évolution de %FCmax en fonction du temps, de %vVO₂max, de tLim, de VO₂max et des résultats d'un test triangulaire classique.

REFÉRENCES

- Bernard, T., O. Gavarry, S. Bermon, M. Giacomoni, P. Marconnet and G. Falgairette (1997). "Relationships between oxygen consumption and heart rate in transitory and steady states of exercise and during recovery: influence of type of exercise." Eur J Appl Physiol Occup Physiol **75**(2): 170-6.
- Bot, S. D. and A. P. Hollander (2000). "The relationship between heart rate and oxygen uptake during non-steady state exercise." Ergonomics **43**(10): 1578-92.
- Casaburi, R., T. W. Storer and K. Wasserman (1987). "Mediation of reduced ventilatory response to exercise after endurance training." J Appl Physiol **63**(4): 1533-8.
- Coyle, E. F. and J. Gonzalez-Alonso (2001). "Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives." Exerc Sport Sci Rev **29**(2): 88-92.
- Davies, C. T. (1968). "Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements." J Appl Physiol **24**(5): 700-6.
- Davis, J. A. and V. A. Convertino (1975). "A comparison of heart rate methods for predicting endurance training intensity." Med Sci Sports **7**(4): 295-8.
- Ekelund, L. G. (1967). "Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise." Acta Physiol Scand Suppl **292**: 1-38.
- Franklin, B. A., J. Hodgson and E. R. Buskirk (1980). "Relationship between percent maximal O₂ uptake and percent maximal heart rate in women." Res Q Exerc Sport **51**(4): 616-24.

- Grant, S. M., H. J. Green, S. M. Phillips and J. R. Sutton (1997). "Effects of acute expansion of plasma volume on cardiovascular and thermal function during prolonged exercise." Eur J Appl Physiol Occup Physiol 76(4): 356-62.
- Hellerstein, H. K., E. Z. Hirsch, R. Ader, N. Greenbolt and e. S. M. (1973). "Principles of exercise prescription for normals and cardiac subjects." Exercise testing and exercise training in coronary heart disease.
- Lajoie, C., L. Laurencelle and F. Trudeau (2000). "Physiological responses to cycling for 60 minutes at maximal lactate steady state." Can J Appl Physiol 25(4): 250-61.
- Leger, L., A. Gutierrez, D. Choinière and R.-M. Ricart (1991). "La relation %FCmax-%VO₂ max en fonction de l'âge, du sexe et de l'ergomètre." Sciences et Sports 6: 65.
- Londeree, B. R. and S. A. Ames (1976). "Trend analysis of the % VO₂ max-HR regression." Med Sci Sports 8(2): 123-5.
- Londeree, B. R. and M. L. Moeschberger (1984). "Influence of age and other factors on maximal haert rate." J Cardiac Rehabil 4: 44-49.
- Londeree, B. R., T. R. Thomas, G. Ziogas, T. D. Smith and Q. Zhang (1995). "%VO₂max versus %HRmax regressions for six modes of exercise." Med Sci Sports Exerc 27(3): 458-61.
- Monod, H., M. Saint-Saens, J. Scherrer and C. Soula (1958). "[Oxygen content of efferent blood from a muscle performing dynamic work.]." J Physiol (Paris) 50(2): 417-20.

- Mullin, W. J., R. E. Herrick, V. Valdez and K. M. Baldwin (1984). "Adaptive responses of rats trained with reductions in exercise heart rate." J Appl Physiol **56(5)**: 1378-82.
- Rowell, L. B., J. A. Murray, G. L. Brengelmann and K. K. Kraning, 2nd (1969). "Human cardiovascular adjustments to rapid changes in skin temperature during exercise." Circ Res **24(5)**: 711-24.
- Rowell, L. B., H. L. Taylor and Y. Wang (1964). "Limitations To Prediction Of Maximal Oxygen Intake." J Appl Physiol **19**: 919-27.
- Saltin, B., G. Blomqvist, J. H. Mitchell, R. L. Johnson, Jr., K. Wildenthal and C. B. Chapman (1968). "Response to exercise after bed rest and after training." Circulation **38(5 Suppl)**: VII1-78.
- Skinner J, S. and W. Jankowski L (1974). "Individual variability in the relationship between heart rate and oxygen intake." Medicine and Science in sports **6**: 68.
- Taylor, H. L., W. Haskell, S. M. Fox and e. B. H. (1969). "Exercise tests: A summary of procedures and concepts of stress testing for cardiovascular diagnosis and function evaluation." (H Blackburn (Ed), Measurement in exercise electrocardiography).
- Vidalin, H., N. Fellmann, R. Leymonie, M. Bedu, J. Michel, M. Faget and J. Coudert (1989). "Consommation maximale d'oxygène directe et indirecte. Fréquence cardiaque maximale réelle et théorique." Sciences et Sports **4**: 71-77.

