

UNIVERSITE DE BOURGOGNE

FACULTE DES SCIENCES DU SPORT - UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE EN
SCIENCES ET TECHNIQUES DES ACTIVITES PHYSIQUES ET SPORTIVES.

ECOLE DOCTORALE ES - ENVIRONNEMENTS - SANTE

LABORATOIRE INSERM U1093 COGNITION ACTION ET PLASTICITE
SENSORIMOTRICE

**REPONSES PHYSIOLOGIQUES AU COURS D'EXERCICES
INTERMITTENTS EN COURSE A PIED**

THÈSE

En vue de l'obtention du grade de Docteur d'Université

Présentée et soutenue publiquement par

Hervé ASSADI

Le 08 juin 2012

Thierry BERNARD (Rapporteur)	MCU-HDR	Université de Toulon-Var
Laurent BOSQUET (Rapporteur)	Professeur	Université de Poitiers
Jean-Marie CASILLAS (Examinateur)	Professeur-PH	Université de Bourgogne
Georges GACON (Invité)	Entraîneur National	F.F. d'Athlétisme
Romuald LEPERS (Directeur)	MCU-HDR	Université de Bourgogne
Guillaume MILLET (Examinateur)	Professeur	Université de St Etienne

CE TRAVAIL A FAIT L'OBJET DES PUBLICATIONS SUIVANTES

Assadi H, Lepers R. (sous presse) - Comparison of the 45s-15s intermittent running field test and the continuous treadmill test. *Int J Sports Physiol Perf.*

Assadi H, Lepers R. (2012) - Réponse physiologique et temps d'effort maximal lors d'exercices intermittents courus à la vitesse maximale aérobie. *Science & Motricité*. DOI: 10.1051/sm/2012004.

CE TRAVAIL A FAIT L'OBJET DES COMMUNICATIONS SUIVANTES

Assadi H. Influence de deux modalités de pré-fatigue musculaire sur le temps limite lors d'un exercice intermittent de course à pied. 2^{ème} journée Gilles Cometti - La préparation physique du laboratoire au terrain. 19 et 20 novembre 2010.

Assadi H. Les exercices intermittents aérobie maximaux dans l'entraînement des jeunes cyclistes. Colloque annuel de la Fédération Française de Cyclisme - Bourges - 4 et 5 novembre 2011.

Ce travail de thèse est l'occasion pour moi de faire un bilan sur l'état de mes connaissances. De faire le bilan, de trente quatre années de pratique de la course à pied, de presque trente ans passées à entraîner des athlètes, et de vingt cinq années passées à être professeur d'éducation physique et sportive, au cours desquelles je me suis intéressé aux exercices intermittents dans l'entraînement.

Ce travail est aussi l'occasion pour moi de remercier toutes les personnes qui m'ont guidé et aidé à faire mes choix.

J'adresse mes plus sincères remerciements à...

Romuald Lepers, pour avoir accepté d'être le directeur de ma thèse. Compétences, sérieux, calme, et endurance, te caractérisent. J'ai conscience d'avoir beaucoup abusé de ta disponibilité et de ta gentillesse, mais jamais tu ne me l'as fait sentir et j'ai toujours pu compter sur toi, merci.

Georges Gacon, il a été mon professeur, il a été mon entraîneur, il est resté un guide. En 1983, j'étais jeune étudiant, tu as accepté de me dédicacer ton livre "La course d'endurance" et écrit ces quelques mots : que ce soit pour toi le point de départ du dépassement des connaissances, ils résonnent encore dans ma tête.

Gilles Cometti, ce grand pédagogue avait le sens de la formule et un esprit de synthèse exceptionnel, visionnaire pour les uns, provocateurs pour les autres, dans tous les cas, il ne laissait pas indifférent. Certaines problématiques de ce travail de thèse s'inspirent des nombreuses discussions que nous avons pu avoir ensemble. Il restera dans nos mémoires.

Alain Piron, il a tellement influencé nos choix.

Thierry Bernard et Laurent Bosquet, pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse.

Guillaume Millet, pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse. Nous partageons une passion commune pour la course en montagne, exigence et endurance en sont des qualités indispensables.

Jean Marie Casillas, pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Thierry Pozzo et Harris Papaxantis, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire INSERM U1093 et m'avoir accordé votre confiance.

A tous les étudiants de la Faculté des Sciences du Sport de Dijon, qui ont participé avec enthousiasme à l'ensemble des études présentées dans cette thèse.

Nicolas Babault, et tous les acteurs du CEP de Dijon, pour m'avoir facilité la réalisation de certaines expérimentations, mais aussi pour l'accueil toujours bien veillant que vous m'avez réservé.

A mes collègues de l'UFRSTAPS et en particulier Yves, Arnaud et Philippe, avec lesquelles nous partageons des passions communes.

A l'ensemble du personnel de l'UFRSTAPS de Dijon qui œuvre pour que les conditions de travail soient d'une grande qualité dans notre établissement.

André et Marie-Christine Henrot, ils m'ont offert leur soutien et leur amour au moment où j'en avais grand besoin. Ils sont des modèles à bien des égards, je leur dois tellement de choses.

Bernard et Danielle Droingt, à leurs yeux j'ai toujours eu ce sentiment réconfortant d'être important.

Guy et Marie-Claude, Laurent, Yannick, Didier, Jean-Jacques, Rémy, Fabrice, Régis, et bien d'autres encore, mes amis qui me soutiennent dans les bons et moins bons moments et pour la sérénité qu'ils m'apportent.

A Marianne, pour le regard critique qu'elle a sur mon travail, les encouragements et l'amour qu'elle m'apporte tous les jours.

A Emeric et Bastien, sans qui la vie n'aurait pas la même saveur.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	10
 PREMIERE PARTIE : DE LA NAISSANCE DE L'INTERVAL TRAINING A L'APPROCHE SCIENTIFIQUE DES EXERCICES INTERMITTENTS.....	14
 1 - L'INTERVAL TRAINING COMME METHODE D'ENTRAÎNEMENT: DE SA NAISSANCE À NOS JOURS	16
1.1 - AUX ORIGINES DE L'ENTRAÎNEMENT PAR INTERVALLES.....	17
1.2 - LA POPULARISATION DE LA METHODE D'ENTRAÎNEMENT PAR INTERVALLES.....	17
1.3 - DE L'ENTRAÎNEMENT PAR INTERVALLES VERS L'ENTRAÎNEMENT "INTERMITTENT"	20
1.4 - RESUME.....	24
 2 - L'ETUDE SCIENTIFIQUE DES EXERCICES INTERMITTENTS..	25
2.1 - APPROCHE HISTORIQUE.....	26
2.2 - MESURE DE LA CONSOMMATION D'OXYGENE AU COURS DES EXERCICES INTERMITTENTS.....	28
2.2.1 - ATTEINTE DE LA $\dot{V}O_{2\max}$ AU COURS DES EXERCICES INTERMITTENTS.	28
2.2.2 - LA RESERVE D'OXYGENE LOCALE : LA MYOGLOBINE.....	31
2.2.3 - LA CINETIQUE DE $\dot{V}O_2$: ASPECTS GENERAUX ET SPECIFIQUES AUX EXERCICES INTERMITTENTS.....	35
2.2.3.1 - La cinétique de $\dot{V}O_2$, du repos à l'exercice et de l'exercice au repos.....	35
2.2.3.2 - Influence de l'entrainement intermittent sur la cinétique de $\dot{V}O_2$	37

2.2.4	- LE TEMPS PASSE A PLUS DE 90% DE $\dot{V}O_{2\max}$ (T90% $\dot{V}O_{2\max}$).....	38
2.2.4.1	- Influence de la vitesse de course sur le T90% $\dot{V}O_{2\max}$	38
2.2.4.2	- Influence du temps d'effort sur le T90% $\dot{V}O_{2\max}$	40
2.2.4.3	- Influence du mode récupération (active ou passive) sur le t90% $\dot{V}O_{2\max}$	42
2.2.5	- RESUME.....	46
2.3	- COMPARAISON EXERCICES INTERMITTENTS SUR PISTE VS SUR TAPIS ROULANT.....	47
2.4	- MECANISMES ENERGETIQUES AU COURS DES EXERCICES INTERMITTENTS.....	50
2.4.1	- ADENOSINE TRIPHOSPHATE (ATP) ET PHOSPHOCREATINE (PC).....	50
2.4.2	- INFLUENCE DE LA RECUPERATION ACTIVE OU PASSIVE SUR LA VITESSE D'ELIMINATION DU LACTATE LORS D'UN EXERCICE INTERMITTENT	53
2.4.3	- MODIFICATION DE L'ACTIVITE ENZYMATIQUE AEROBIE ET ANAEROBIE SUITE A L'ENTRAINEMENT INTERMITTENT.....	57
2.4.4	- UTILISATION DU GLUCOSE ET DES ACIDES GRAS LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS.....	58
2.4.5	- PART RELATIVE DES PROCESSUS ANAEROBIES ET AEROBIES LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS.....	59
2.4.6	- RESUME.....	61
2.5	- APPROCHE COMPARATIVE DES EXERCICES INTERMITTENTS ET CONTINUS.....	62
2.5.1	- EFFETS PHYSIOLOGIQUES AIGÜES : COMPARAISON INTERMITTENT VS CONTINU.....	62
2.5.1.1	- Sollicitation d'un fort pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$	62
2.5.1.2	- Lactatémie au cours de l'exercice intermittent vs continu.....	63
2.5.2	- EFFETS D'UN PROGRAMME D'ENTRAINEMENT CONSTITUE D'EXERCICES INTERMITTENTS VS CONTINUS.....	63
2.5.2.1	- Amélioration de la VMA.....	63

2.5.2.2 - Amélioration de la $\dot{V}O_{2\max}$ et de la capacité aérobie.....	64
2.5.2.3 - Amélioration des capacités anaérobies.....	66
2.5.2.4 - Le cas des sportifs très entraînés.....	66
2.5.2.5 - Le cas des sujets ayant une pathologie particulière.....	68
2.5.3 - SYNTHÈSE DE LA COMPARAISON : INTERMITTENT VS CONTINU.....	70
2.6 - DU CONCEPT DE VMA A LA GESTION DE L'INTENSITÉ LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS AÉROBES.....	72
2.6.1 - LE CONCEPT DE $\dot{V}O_{2\max}$ ET DE VMA.....	72
2.6.2 - LES TESTS VMA.....	73
2.6.3 - RELATION ENTRE LA VMA ET LA PERFORMANCE.....	74
2.6.4 - LA VMA POUR PRÉSCRIRE LES ALLURES DES EXERCICES INTERMITTENTS AÉROBES.....	76
2.6.5 - INFLUENCE DU %VMA LORS D'UN EXERCICE INTERMITTENT SUR LE $T_{90\% \dot{V}O_{2\max}}$	77
2.6.6 - LA DÉTERMINATION DE LA VMA POUR LES EXERCICES INTERMITTENTS.....	79
2.6.7 - LA NOTION DE TEMPS LIMITE ET SON APPLICATION DANS LA GESTION DES EXERCICES INTERMITTENTS.....	80
2.6.8 - RÉSUMÉ.....	82
2.7 - DES EXERCICES INTERMITTENTS AUX SPRINTS RÉPÉTÉS (SR).....	83
2.7.1 - DIFFÉRENCES ET SIMILITUDES ENTRE EXERCICES INTERMITTENTS ET SPRINTS RÉPÉTÉS.....	85
2.7.2 - RÉSUMÉ.....	87
2.8 - LA FATIGUE MUSCULAIRE LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS.....	88
2.8.1 - LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE.....	88
2.8.1.1 - Origine centrale de la fatigue.....	88
2.8.1.2 - Origine périphérique de la fatigue.....	90
2.8.2 - LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE À LA SUITE DES EXERCICES INTERMITTENTS.....	92

3. SYNTHÈSE ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL.....94

DEUXIÈME PARTIE : METHODOLOGIE GENERALE.....98

1. - CARACTERISTIQUES DES SUJETS.....99

2. - PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.....100

3. - MESURES.....102

3.1. - MESURES DE LA VMA.....102

3.1.1. - TEST TAPIS ROULANT.....102

3.1.2. - TEST INTERMITTENT 45-15_{FIT}.....102

3.2. - MESURE DU TEMPS LIMITE.....103

3.3. - RECUEIL DES VARIABLES METABOLIQUES.....104

3.3.1. - ANALYSE DES ECHANGES GAZEUX RESPIRATOIRES.....104

3.3.2. - ANALYSE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE.....106

3.3.3. - DETERMINATION DE $\dot{V}O_{2\max}$ 106

3.3.4. - DETERMINATION DU T90% $\dot{V}O_{2\max}$ 107

3.4. - MESURE DE LA LACTATEMIE.....107

3.5. - MESURE DU MOMENT OU DE LA FORCE ISOMETRIQUE MAXIMALE

VOLONTAIRE.....107

3.6. - MESURE DE L'ACTIVITE ELECTROMYOGRAPHIQUE.....109

3.6.1. - ELECTROMYOGRAPHIE DE SURFACE.....109

3.7. - NEUROSTIMULATION.....110

3.8. - ELECTROMYOSTIMULATION DE SURFACE112

TROISIÈME PARTIE : PRESENTATION DES TRAVAUX

EXPERIMENTAUX.....113

ETUDE I - COMPARAISON DU TEST DE TERRAIN INTERMITTENT 45S-15S ET DU TEST CONTINU SUR TAPIS ROULANT.....114

ETUDE II - REPONSE PHYSIOLOGIQUE ET TEMPS D'EFFORT MAXIMAL LORS D'EXERCICES INTERMITTENTS COURUS A LA VITESSE MAXIMALE AEROBIE.....	128
ETUDE III - COMPARAISON DE DEUX EXERCICES INTERMITTENTS, 5s-15s VS 30s-30s, REALISES SUR PISTE ET SUR TAPIS ROULANT.....	136
ETUDE IV - INFLUENCE DE DEUX MODALITES DE PRE-FATIGUE MUSCULAIRE SUR LE TEMPS LIMITE LORS D'UN EXERCICE INTERMITTENT DE COURSE A PIED.....	149
QUATRIÈME PARTIE : DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES	161
ABREVIATIONS.....	172
RÉSUMÉ.....	174
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	177

INTRODUCTION

L'introduction d'exercices, alternant des périodes d'effort avec des périodes de récupération plus ou moins courtes, dans l'entraînement, permet une amélioration des performances dans les sports d'endurance en général et en course à pied en particulier (Billat, 2001a et 2001b ; Laursen et Jenkins, 2001 ; Tomlin et Wenger, 2001 ; Kubukely, et coll, 2002).

Cette pratique est née sous l'impulsion du cardiologue Allemand, le Professeur Reindell à la fin des années 30, et était appelée « Interval-Training » (Reindell et Roskman, 1959). Jusqu'au début des années 60, ce fût d'abord une méthode d'entraînement promue par deux entraîneurs renommés, Woldemar Gerschler et Franz Stampfl, qui ont respectivement guidé l'accession au plus haut niveau de Rudolf Harbig et Roger Banister (Newsholme et coll, 1994 ; Noakes, 2001 ; Billat 2001a). Devant l'intérêt que suscitait cette méthode, auprès de coureurs d'exceptions comme le Tschècoslovaque Emil Zatopek au cours des années 50 (Ettema, 1962) et la curiosité d'un chercheur comme Per-Olof Astrand, l'étude scientifique des exercices intermittents pris son essor au début des années 60 (Astrand et Rodahl, 1981).

Trois étapes majeures peuvent être identifiées dans l'approche scientifique des exercices intermittents (Billat, 2001a et 2001b). Ces étapes se suivent car elles ont débuté à différents moments, mais surtout elles se juxtaposent, imposant à chaque fois une redéfinition des exercices intermittents. La première étape a débuté au début des années 60 par la mise en évidence des mécanismes particuliers liés à l'utilisation de l'oxygène lors des exercices intermittents (Astrand et coll, 1960a, 1960b et 1960c). Elle se poursuit encore aujourd'hui par la mesure du temps passé à plus de 90% de la consommation maximale d'oxygène au cours d'un exercice intermittent (Billat et coll, 2000b ; Dupont et coll, 2003a ; Thévenet et coll, 2007a et 2007b). La seconde étape a débuté au début des années 70 avec les travaux de Fox et Mathews (1974). C'est le début de la comparaison systématique des effets aigus des exercices intermittents par rapport aux effets des exercices continus (Fox et Mathews, 1981). Elle se prolonge aujourd'hui encore par des études longitudinales montrant la nécessité d'introduire des exercices intermittents intensifs dans l'entraînement des sportifs très entraînés pour l'amélioration de leurs performances (Laursen et Jenkins, 2001 ; Kubukely et coll, 2002 ; Midgley et coll, 2006 ; Casas, 2008). La naissance du concept de vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène ($v\text{VO}_{2\text{max}}$) ou vitesse maximale aérobie (VMA), et son évaluation datant du début des années 80 (Léger et Boucher, 1980 ; Daniels et coll, 1986), constitue le début de la troisième étape. Cette étape se poursuit aujourd'hui par la définition d'une VMA spécifique aux exercices intermittents (Gacon, 1990).

Si l'approche scientifique des exercices intermittents, depuis le début des années 60, n'a pas cessé d'améliorer la compréhension des mécanismes physiologiques liés à ce mode d'entraînement, la définition de ce type d'exercice n'est pas complètement établie (Casas, 2008). Les effets d'un exercice intermittent varient en fonction de l'intensité et de la durée de l'effort, de la durée et de l'intensité de la récupération, et du rapport entre l'effort et la récupération (Thibault et Marion, 1999 ; Billat 2001a et 2001b). Selon les auteurs, les exercices intermittents ont été classés dans différentes catégories : exercice intermittent long ou court (Fox et Mathews, 1974 ; Dupont et Bosquet, 2007 ; Thibault, 2009), exercice intermittent aérobie ou anaérobie (Billat, 2001a et 2001b), exercice intermittent aérobie ou intermittent à haute intensité (Casas, 2008). Aujourd'hui encore, il existe une certaine confusion dans la catégorisation des exercices intermittents, comme par exemple celui qui consiste à enchaîner des périodes de course de 5 secondes avec des périodes de récupération de 15 secondes. S'agit-il d'un exercice intermittent court ou d'un enchaînement de sprints répétés ("Repeated Sprint Ability") (Glaister, 2005) ? A ce jour la définition des exercices intermittents n'est donc pas clairement établie dans la littérature.

Concernant la détermination de la vitesse de travail, appropriée à une sollicitation aérobie maximale, lors d'un exercice intermittent, les tests classiques incrémentaux continus présentent certaines limites. Il a été proposé, dès 1994 par Georges Gacon (Entraîneur National d'Athlétisme), un test pouvant répondre à une évaluation de la VMA pour les exercices intermittents. Bien que ce test connaisse une certaine popularité dans le monde du football, du handball et de l'athlétisme, celui-ci n'avait pas reçu jusqu'à présent de validation scientifique. Il reste donc à démontrer la pertinence d'un tel test, par rapport aux tests continus déjà existants, en ce qui concerne l'évaluation de l'intensité de course adaptée à une sollicitation aérobie élevée lors des exercices intermittents. Le test proposé par G. Gacon permet de déterminer une vitesse adaptée aux exercices intermittents, mais qui est supérieure à la VMA déterminée lors d'un test incrémental continu. De ce fait, on peut se poser la question suivante : n'y a-t-il pas une nécessité à redéfinir le concept d'une VMA adaptée en fonction du mode d'entraînement (exercices intermittents, exercices continus,...)?

Le présent manuscrit comprend quatre parties.

Une première partie, dans laquelle nous retracerons succinctement l'histoire de la pratique et de l'utilisation des exercices intermittents dans l'entraînement, puis nous rendrons compte de l'état des connaissances scientifiques dans ce domaine. L'étude scientifique des exercices intermittents nous permettra de clarifier la définition des exercices intermittents.

Nous aborderons les rapports qui existent entre l'habileté à répéter des sprints, la fatigue musculaire et certains types d'exercices intermittents. Pour terminer la première partie nous ferons une synthèse des connaissances et proposerons les hypothèses de travail qui orienteront notre recherche.

Dans une seconde partie, nous présenterons les outils méthodologiques que nous avons utilisés pour tester nos hypothèses.

Dans une troisième partie, nous présenterons les travaux expérimentaux.

Finalement, dans une quatrième partie nous discuterons nos résultats et proposerons des perspectives fondamentales mais aussi appliquées.

Au cours de l'ensemble de cette thèse, nous avons essayé de délimiter notre objet d'étude aux exercices intermittents, même s'il paraît difficile de délimiter quelque chose qui ne semble pas clairement défini. Par exemple, il ne sera pas fait de rapport direct avec l'habileté à répéter des sprints, sauf dans la mesure où certaines études apporteraient un éclairage aux mécanismes physiologiques propres aux exercices intermittents. De même sur le plan expérimental, nous nous sommes intéressés essentiellement aux mécanismes énergétiques; les mécanismes neuromusculaires ont aussi été abordés mais ne représentent pas la partie principale de notre approche.

DE LA NAISSANCE DE L' INTERVAL
TRAINING A L'ETUDE SCIENTIFIQUE
DES EXERCICES INTERMITTENTS

- PARTIE 1 -

DE LA NAISSANCE DE L'INTERVAL TRAINING A L'APPROCHE SCIENTIFIQUE DES EXERCICES INTERMITTENTS

Si aujourd'hui l'ensemble des travaux scientifiques et des pratiques d'entraînement permettent de considérer que l'entraînement par intervalles représente une forme efficace pour améliorer la performance dans les sports d'endurance (Thibault, 2009). Une connaissance des effets physiologiques de ce type d'exercice est nécessaire afin d'en comprendre leur utilité dans l'entraînement.

L'évolution des connaissances scientifiques sur l'entraînement intermittent a souvent été précédée par les pratiques des entraîneurs et des athlètes, c'est pourquoi nous examinerons tout d'abord l'évolution des méthodes d'entraînement.

En parallèle et en interaction avec cette évolution des pratiques et méthodes d'entraînement, la recherche scientifique sur les exercices intermittents s'est développée. Elle a essayé d'apporter des réponses sur les questions posées par l'entraînement quant aux choix des durées d'effort, de l'intensité de travail, des durées et de l'intensité de la récupération, de la forme des exercices eux-mêmes, des réponses et adaptations physiologiques aux exercices intermittents. Dans cette partie nous examinerons les réponses majeures apportées par la physiologie du sport et de l'exercice physique.

Pour finir ce chapitre, nous ferons une synthèse de l'état des connaissances scientifiques sur les exercices intermittents et formulerons des hypothèses qui guideront nos travaux expérimentaux.

L'INTERVAL TRAINING COMME METHODE D'ENTRAINEMENT : DE SA NAISSANCE A NOS JOURS

1.1 - AUX ORIGINES DE L'ENTRAÎNEMENT PAR INTERVALLES

Selon le physiologiste Tim Noakes (Noakes, 2001) Franz Stampfl serait le premier entraîneur à avoir utilisé la méthode d'entraînement par intervalles, appelée « Interval Training ». Stampfl proposait déjà au début des années 50 (Stampfl, 1955) un entraînement composé par exemple, de 10 x 400 mètres entrecoupés de courtes périodes de récupération de 2 minutes de course lente. Cet entraînement permettait de réaliser des distances importantes à des vitesses supérieures à celle de la compétition. Roger Banister s'entraîna sous la direction de Stampfl, (Newsholme et coll, 1994) et devint le premier coureur en moins de 4 minutes au mile (1609 mètres). Dans les années 1920 et 1930, Pavo Nurmi (recordman du monde du 5000 en 14 minutes 36 secondes, c'est-à-dire à 20,6 km/h) réalisait déjà des répétitions de 6 x 400 mètres en 60 secondes (24 km/h) à l'intérieur d'un footing en nature de 10 à 20 km (Billat, 2001a). Rudolf Harbig en 1933, entraîné par Woldemar Gerschler selon la méthode par intervalles, amena le record mondial du 800 mètres à l'excellent temps de 1 min 46,6 s (ce qui constituerait encore aujourd'hui une performance de référence au niveau Européen). Cependant, il faut attendre la période qui suivra la deuxième guerre mondiale pour que la méthode par intervalles se généralise dans la pratique des coureurs de demi-fond, avec en particulier l'athlète Tchécoslovaque Emil Zatopek (Triple Champion Olympique du 5000, 10000 et marathon en 1952). Celui-ci effectuait des séries d'intervalles, jusqu'à 100 x 400 m en 1 min 12 s (20 km/h), ce qui correspondait à sa vitesse critique (Billat, 1999) calculée à partir de ces records personnels du 3000 m au 10 km (Ettema, 1962).

1.2 - LA POPULARISATION DE LA METHODE D'ENTRAÎNEMENT PAR INTERVALLES

A partir des années 1970, Fox et Mathews (1974) ont contribué à populariser l'utilisation de "l'Interval Training" dans différents milieux comme la préparation physique des militaires, l'entraînement des coureurs et autres sportifs, et même la réhabilitation des patients (Kavanaugh, 1973). Pour ces auteurs : « **L'Interval Training, a probablement produit plus de grands athlètes qu'aucun autre système de mise en condition physique.** » (Fox et Mathews, 1974). Dans leur ouvrage, ils décrivent l'intérêt de cette méthode d'entraînement par rapport à la méthode des efforts continus : « supposez qu'un jour vous couriez au maximum de vos capacités, et sans vous arrêter, pendant cinq minutes, jusqu'à épuisement ; puis qu'un autre jour, vous couriez, de façon intermittente, 5 périodes d'une minute chacune, à la même vitesse, avec après chaque période un intervalle de repos d'une

minute. La même quantité de travail à même intensité a été produite dans les deux conditions, cependant la fatigue suivant le travail intermittent sera notablement moindre. ». Fox et Mathews (1974), décrivent l'Interval Training comme des fractions d'exercices alternées avec des périodes de repos. La durée de l'intervalle de repos servant à restaurer les réserves d'adénosine tri-phosphate (ATP) et de créatine phosphate (PC_R) utilisées pendant l'effort. Les auteurs suggéraient aussi que la durée de la récupération devrait permettre à la fréquence cardiaque (F_C) de redescendre jusqu'à une valeur inférieure à 120 bpm, pour les hommes et femmes, de moins de 20 ans. Le tableau I résume les différents types d'intervalles de travail et de récupération en fonction des filières énergétiques sollicitées et le nombre de séries et de répétitions totales pouvant être réalisées dans une séance d'entraînement.

A la fin des années 60 et début des années 70, deux coureurs Australiens dominent les courses de demi-fond, il s'agit de Herb Elliot (champion Olympique du 1500 en 1960, devant un certain Michel Jazy) et John Landy (détenteur du record du monde du 1500 et du mile en 1954 et premier homme avec Banister à descendre en dessous de 4 min au mile). Ils sont tous les deux entraînés par P. Cerruty. La particularité de cet entraîneur fut d'introduire dans l'entraînement des coureurs de demi-fond un travail par intervalles axé sur le développement de la force. Il était demandé à ces athlètes de réaliser des séries d'effort comprenant des montées dans des dunes de sable. Le 1/3 du volume global d'entraînement devait selon Cerruty, être réalisé par des activités où l'athlète ne court pas, mais réalise un travail de développement de la force, sous la forme d'intervalles qu'il appela: « circuit training » (Billat, 2001a). Dès 1953, Morgan et Adamson ont proposé un cadre théorique et pratique afin que ces circuits atteignent un double objectif: une augmentation de la force musculaire et de la consommation maximale d'oxygène (Morgan et Adamson, 1961). Les circuits qui permettent une alternance de situation de travail, d'une durée de 30 secondes, et de récupération, de 30 secondes, permettent d'obtenir de très bons résultats en référence aux deux objectifs (Poumarat et Dabonnneville, 1989).

(A) Zone d'effort	(B) Filière énergétique dominante	(C) Temps d'effort (min. et sec.)	(D) Nombre de répétitions par séance	(E) Nombre de séries par séance	(F) Nombre de répétitions par séries	(G) Rapport travail-repos	(H) Type d'intervalle de repos
1	ATP-CP	0:10 0:15 0:20 0:25	50 45 40 32	5 5 4 4	10 9 10 8	1:3	Repos proprement dit (marche, étirements).
2	ATP-CP- AL	0:30 0:40-0:50 1:00-1:10 1:20	25 20 15 10	5 4 3 2	5 5 5 5	1:3 1:2	Récupération active (activité modérée, footing).
3	AL et O ₂	1:30-2:00 2:10-2:40 2:50-3:00	8 6 4	2 1 1	4 6 4	1:2 1:1	Repos actif. Repos proprement dit.
4	O ₂	3:00-4:00 4:00-5:00	4 3	1 1	4 3	1:1 1:1/2	Repos proprement dit.

Tableau I. - Instruction pour la mise au point des programmes d'entraînement par intervalles à partir des temps d'entraînement selon Fox et Mathews, 1974. ATP-CP: pour filière anaérobie alactique. AL: Filière anaérobie lactique. O₂: Filière aérobie.

Bien sûr l'évolution des pratiques et des méthodes n'est pas quelque chose de linéaire et à la même époque le célèbre entraîneur et médecin allemand E. Van Aaken (1980) prônait au contraire une méthode essentiellement basée sur l'augmentation du travail continu à allure modérée. Il allait même jusqu'à prédire la fin prochaine de la méthode par intervalles.

De son côté J. Humphreys (1980), entraîneur et physiologiste britannique réputé, présentait dans sa méthode d'entraînement pour coureur, un équilibre parfait (50% du volume d'entraînement pour chacun des types d'exercices) entre les exercices continus et les exercices par intervalles. Les succès des méthodes d'entraînement sont, aujourd'hui encore, une combinaison entre travail continu et intermittent, entre travail à des intensités élevées et travail à de faibles intensités. Jack Daniels (1998) a présenté un modèle d'entraînement, pour améliorer les performances des coureurs, basé sur 6 plages d'intensité : 1) Travail continu à une intensité proche de 70% de $\dot{V}O_{2\max}$, 2) Travail continu allure marathon, 3) Travail au seuil, travail continu à 90% de $\dot{V}O_{2\max}$, 4) Intermittent réalisé à la $v\dot{V}O_{2\max}$, 5) Intermittent réalisé à une vitesse supérieure à $v\dot{V}O_{2\max}$, 6) Repos.

1.3 - DE L'ENTRAÎNEMENT PAR INTERVALLES VERS L'ENTRAÎNEMENT "INTERMITTENT"

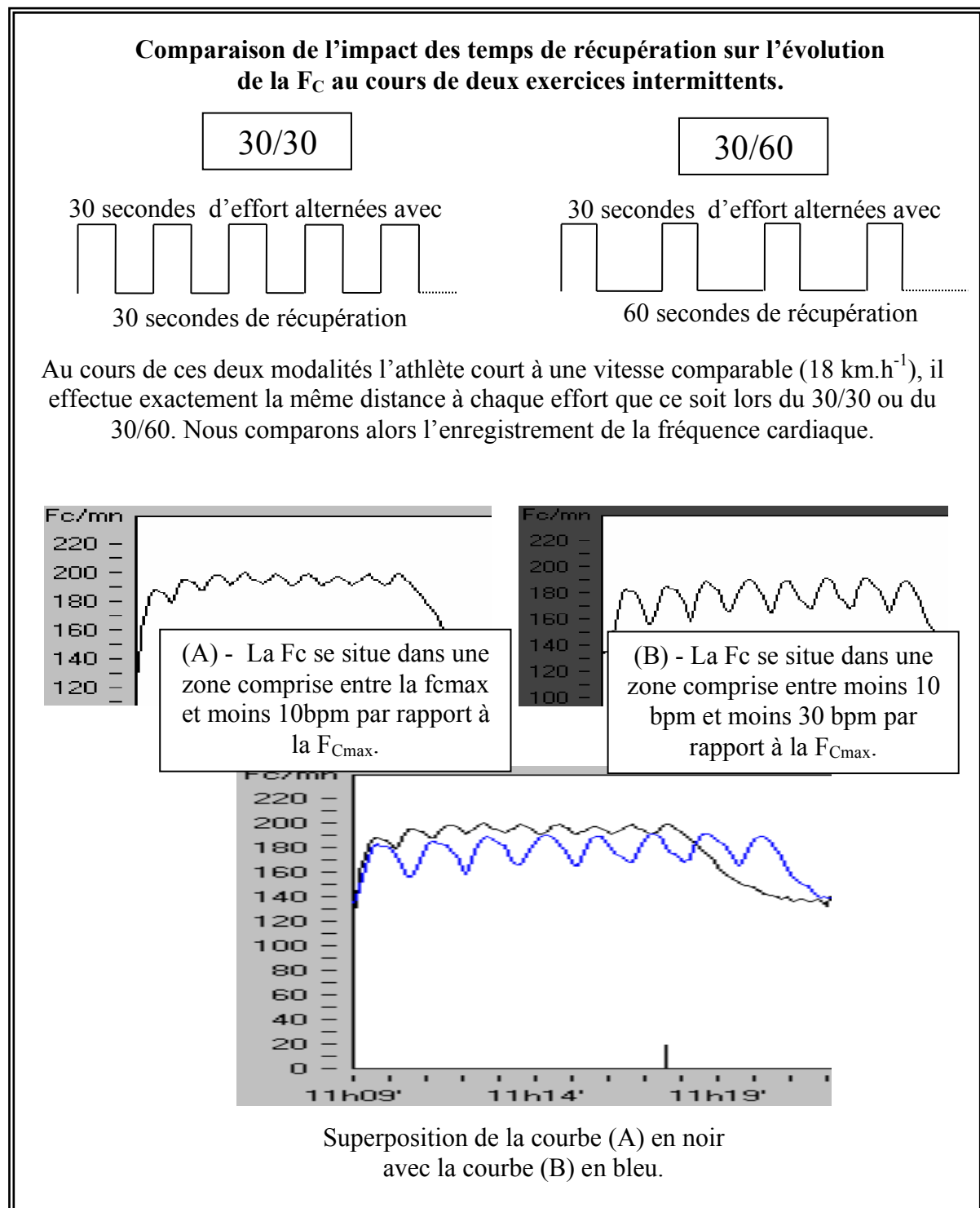
La prise en compte dans le calcul de la charge d'entraînement de la durée et de l'intensité de la récupération, en plus de la durée et de l'intensité des périodes d'effort, est une approche plus récente de l'entraînement par intervalles. Au début des années 1980, G. Gacon (entraîneur national français de 1984 à 1994), s'appuyant sur les travaux de P.O. Astrand (1970), introduit le terme "d'entraînement intermittent" (Gacon, 1984). Cette approche particulière consiste à prendre en compte le fait que la durée de la récupération influence directement l'intensité de l'effort. Les entraîneurs cherchent une forme d'exercice qui permette d'obtenir une sollicitation globale (effort + récupération) qui soit élevée, c'est-à-dire qu'au cours de la récupération, la diminution de la F_C soit limitée (Figure 1) ; l'exercice intermittent qui alterne des efforts d'une durée de 30 secondes avec des récupérations d'une durée de 30 secondes (30s-30s) apparaît alors comme une méthode appropriée pour améliorer les performances (Gacon, 1993). ***Dans cette conception, ce qui distingue un entraînement intermittent d'un entraînement par intervalles, c'est le fait que la F_C ne redescende pas de plus de 10 à 15 battements lors de la récupération dans le premier exercice, alors qu'elle redescend de 20 à 40 battements dans le second.*** Ceci a d'ailleurs comme conséquence de modifier considérablement la sollicitation du processus aérobie en pourcentage de la consommation maximale d'oxygène (Karlsson et coll, 1978).

Sebastien Coe, athlète Britannique champion Olympique du 1500 mètres en 1980 et 1984, détenteur en 1980 des records du monde du 800 mètres, 1000 mètres, 1500 mètres et mile, mais surtout premier coureur au monde à descendre sous la barrière des 1 min 42 s au 800 mètres (1 min 41, 73s en 1981), record qu'il conservera jusqu'en 1997, était également un adepte du travail intermittent. Aux questions posées à son père et entraîneur P. Coe, celui-ci répondait qu'il réalisait, lors d'une séance, de 20 à 30 fois une distance de 200 mètres, courus en 27s, entrecoupées de période de 30s de récupération: « La caractéristique de l'entraînement de Sebastien Coe est du travail à très grande intensité avec de très faibles temps de récupération et non d'une quantité importante. » (Coe, 1982). L'exercice intermittent 30s-30s est une méthode dont l'objectif est de développer les aptitudes aérobies de l'athlète.

A la même époque, l'intermittent 30s-30s trouvera des applications dans le milieu scolaire et plus particulièrement dans l'amélioration de la vitesse maximale aérobie (VMA) (Gacon et Assadi, 1990 ; Assadi, 1996). Le développement de la VMA, comme facteur de la performance en course à pied (Lacour, 1989), et l'utilisation des exercices intermittents dans l'entraînement, sont souvent devenus indissociables (Gacon, 1990 et 1995 ; Corbi, 1994).

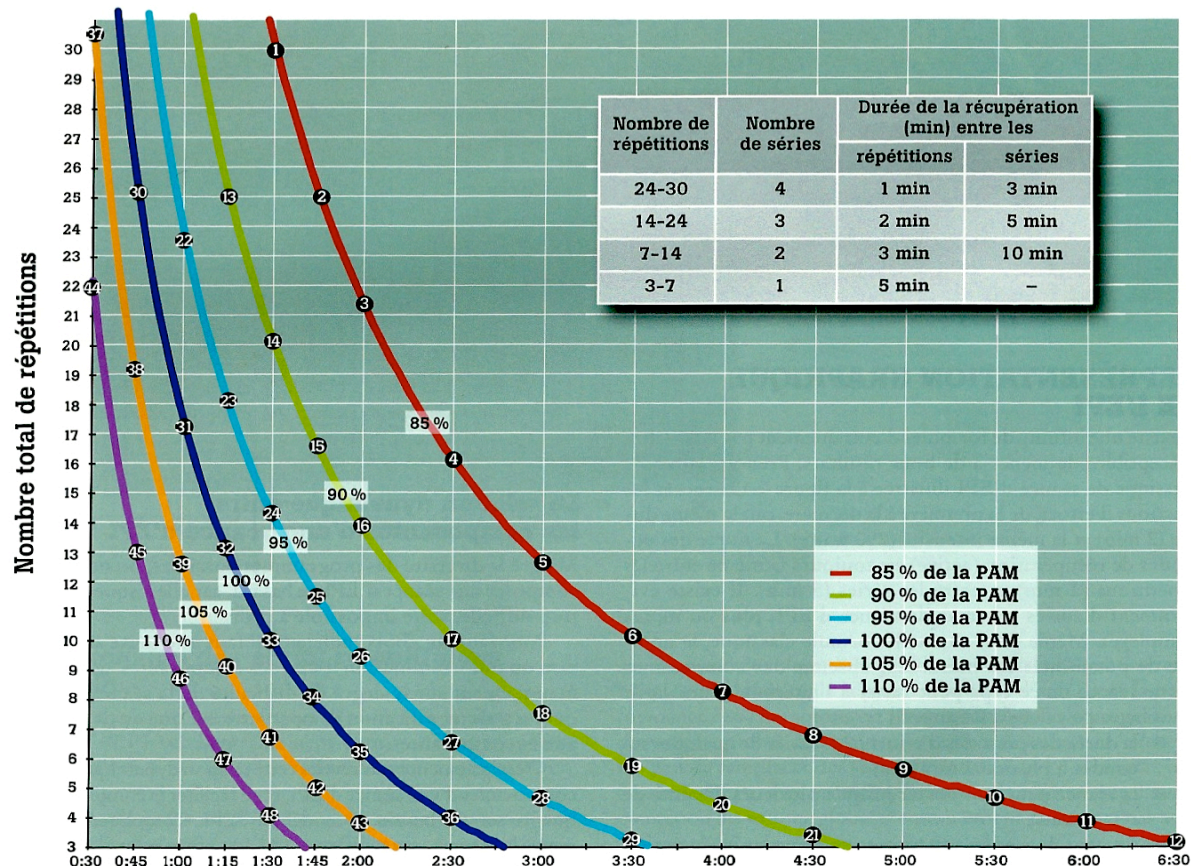
Figure 1. - Enregistrement de la F_C au cours d'un exercice (A) dans lequel un athlète alterne des périodes de 30 s courues à 18 km.h^{-1} avec des périodes de récupération passive de 30s, et d'un exercice (B) dans lequel le même athlète alterne des périodes de 30s courues à 18 km.h^{-1} avec des périodes de récupération de 60s.

En comparant la courbe (A) et la courbe (B) nous observons que, la fréquence cardiaque dans le cas (A), non seulement, baisse moins entre la fin de l'effort et la fin de la récupération, mais atteint également un niveau plus élevé au cours de l'effort, que dans le cas (B) (Assadi et Cometti, 2007)



Guy Thibault (2009) va même, dans une présentation récente sur l'entraînement des sports d'endurance, jusqu'à proposer un modèle pour calibrer une séance d'entraînement par intervalles en fonction d'un pourcentage de la puissance maximale aérobie (PMA) souhaité (Figure 2). Selon cet auteur, il existe une infinité de formules d'entraînement par intervalles susceptible de mener à de bons résultats. Dans cette approche de l'entraînement par intervalles, il n'y a pas de distinction entre « intermittent » et « interval training », les deux termes sont utilisés comme des synonymes, ce qui d'ailleurs était déjà le cas précédemment (Fox et Mathews, 1974).

Figure 2. - Schéma de l'entraînement par intervalles (EPI). Chaque point de la courbe représente une séance qui est une combinaison particulière entre durée de l'effort, nombre de répétitions, nombre de séries, durée de la récupération entre chaque effort et entre les séries. L'ensemble des séances, qui appartiennent à une même courbe, seront réalisées à une intensité similaire. En effectuant les séances n°1 et 11, ou toute autre séance de cette même courbe, vous adopterez spontanément une intensité qui correspond à environ 85% de votre PMA si vous vous poussez à fond ou un peu moins si vous vous ménagez (Thibault, 2009).



En même temps qu'il favorisa considérablement l'utilisation du 30s-30s par les entraîneurs de demi-fond Français, G. Gacon, développa également, au début des années

1980, ce qu'il appellera « l'intermittent force » (Gacon, 1983 et 1990). Ce travail intermittent mettait en avant des situations permettant d'augmenter les tensions pliométriques (foulées bondissantes, sauts en contre-bas...) au cours des « appuis athlétiques » (Piron, 2008) effectués par le coureur. Ce travail sera repris et utilisé dans le cadre de la préparation des joueurs de sport collectifs par G. Cometti (Assadi et Cometti, 2007).

D'autres auteurs comme Dupont et Bosquet (2007), proposent de classer les exercices intermittents en trois catégories (tableau II) qui dépendent du temps d'effort (court, moyen ou long) et de l'effet recherché (Augmentation de l'endurance, de $\dot{V}O_{2\max}$, de la capacité anaérobie). A noter que dans cette proposition de classification des exercices intermittents, s'il y a de nombreuses similitudes avec la proposition de Fox et Mathews (1974), le fait que soient données des recommandations sur la vitesse (en pourcentage de la VMA) à laquelle les exercices sont courus est une précision supplémentaire.

Tableau II. - Classification et objectifs des séances intermittentes selon Dupont et Bosquet (2007)

Type de séances	Phase d'exercice	Phase de récupération	Nombre de répétitions	Nombre de série(s)	Objectifs
Long-long	3 à 10 min 90 à 100% VMA	2 à 3 min récupération active	De 3 à 5	1	↑ Endurance aérobie ↑ $\dot{V}O_{2\max}$
Moyen-moyen	30s à 2 min 100 à 110% VMA	30s à 3 min récupération active	De 5 à 12	De 1 à 3	↑ $\dot{V}O_{2\max}$
Court - court	10s à 20s 110 à 130% VMA	10 à 20s récupération active ou passive	De 10 à 15	De 3 à 5	↑ $\dot{V}O_{2\max}$ ↑ Capacité anaérobie

1.4 - RESUME.

A partir des années 1930, quelques uns des meilleurs coureurs du monde intègrent dans leur entraînement des exercices alternant des périodes d'effort avec des périodes de récupération. Cette méthode mise au point par un cardiologue, le Professeur Reindell, a ensuite été popularisée par des entraîneurs de renom comme Stampfl et Gerschler sous l'appellation "d'Interval-Training". Cette méthode d'entraînement par intervalles regroupe des formes d'exercices assez différentes, qui sont constituées de périodes d'effort de 10 s à 10 min alternées avec des périodes de récupération de 30 s à 5 min (Fox et Mathews, 1974 ; Thibault, 2009). L'entraînement par intervalles a pour intérêt de permettre aux coureurs d'augmenter l'intensité d'entraînement, pour un volume donné, par rapport à l'entraînement continu. Dans cette méthode d'entraînement par intervalles, une forme particulière se distingue lorsque les temps de récupération sont courts et que les efforts sont courus à la VMA, il s'agit des exercices intermittents (Gacon, 1984 ; Dupont et Bosquet, 2007). L'entraînement intermittent consiste à prendre en compte le fait que la durée de la récupération influence directement l'intensité de l'effort. Ce qui distingue un entraînement intermittent d'un entraînement par intervalles, c'est le fait que la fréquence cardiaque ne redescende pas de plus de 10 à 15 battements lors de la récupération dans le premier exercice, alors qu'elle redescend de 20 à 40 battements dans le second.

L'ETUDE SCIENTIFIQUE DES EXERCICES INTERMITTENTS

2.1 - APPROCHE HISTORIQUE

Newsholme et coll, (1994) attribuent la paternité de la première approche scientifique de l'entraînement par intervalles au cardiologue Allemand H. Reindell dans les années 1930. Ce dernier montra que ce type d'entraînement avait des répercussions sur l'augmentation du volume cardiaque, sur le volume d'éjection systolique et sur l'augmentation de la consommation maximale d'oxygène de ses patients. Ce type d'exercices permettait, pendant l'effort, d'atteindre des valeurs de F_C élevées (180 bpm) qui redescendaient, en dessous de 120 bpm pendant la récupération (Reindell et coll, 1959). A partir de cette première approche scientifique des exercices intermittents, quatre périodes peuvent être distinguées (Billat, 2001a).

La première débute dans les années 1960, avec les travaux d'Astrand et coll (Astrand et coll, 1960a, 1960b et 1960c). Cette période est caractérisée par la mesure systématique de la consommation d'oxygène au cours des exercices intermittents. Cette étape permettra de mettre en évidence le rôle fondamental de la myoglobine dans les mécanismes énergétiques propres à ces exercices (Astrand et coll, 1960a et 1960b ; Medbo et coll., 1990). Elle permettra aussi d'expliquer l'intérêt d'une forme particulière d'exercices intermittents courts-courts (Newsholme, 1994) qui influencera profondément les pratiques des entraîneurs (et des scientifiques) (Billat, 2001a). Le terme « Intermittent court-court mode scandinave » sera même utilisé pour qualifier ce type d'intermittent en référence à ces travaux (Gacon, 1993). A noter que sur le plan scientifique près de 50% des publications qui sont parus sur les exercices intermittents font référence à ces travaux des années 1960.

Au début des années 1970, les travaux de Fox et Mathews (1974 ; 1981) sont le point de départ de la seconde période. Ces auteurs vont en effet comparer les différences d'adaptations physiologiques qui découlaient d'un travail intermittent versus continu.

Au début des années 1980, les concepts de vitesse associée à la $\dot{V}O_{2\max}$ ($v\dot{V}O_{2\max}$) et de VMA apparaissaient (Daniels et coll, 1978 ; Di Prampero, 1986 ; Léger et Boucher, 1980) comme des indices pertinents permettant de calibrer les intensités de course lors des exercices intermittents. A partir de cette troisième période débute une recherche constante des caractéristiques (intensité des efforts et des récupérations) permettant à la fois d'atteindre un pourcentage de sollicitation aérobie et un temps d'effort les plus importants possibles. Dans la continuité de ces travaux, la relation $v\dot{V}O_{2\max}$ avec le temps limite sera aussi appréhendée

(Billat, 1994a, 1994b, 1999a). Le but était de proposer une méthode de calcul de la durée des exercices intermittents en référence au temps limite des coureurs (Billat, 1996).

Au début des années 1990, le fait de considérer que l'entraînement de force permettrait d'accroître les performances lors d'épreuves sollicitant de façon importante le système aérobie (Paavolainen et coll, 1999a et 1999b), peut constituer le début de la quatrième période. Au cours de cette période, des exercices intermittents utilisant des contractions isométriques (Bangsbo, 1994), ainsi que la fatigue neuromusculaire engendrée par des exercices alternant des périodes d'effort très intensifs de quelques secondes avec des récupérations courtes (Perrey et coll, 2010), ont été étudiés. La quatrième période est le début de l'étude des mécanismes de la fatigue neuromusculaire au cours des exercices intermittents.

2.2 - MESURE DE LA CONSOMMATION D'OXYGENE AU COURS DES EXERCICES INTERMITTENTS

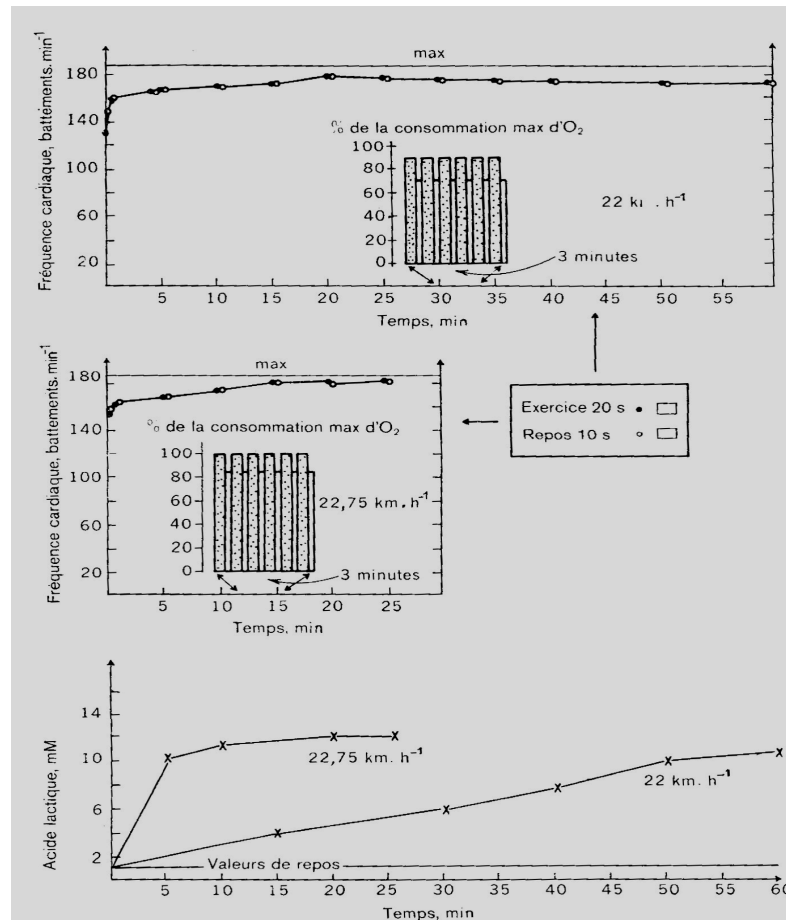
L'évolution des connaissances en physiologie de l'exercice est liée à l'évolution des techniques de mesure. Au début des années 1960, le développement des analyseurs électroniques a facilité la mesure des échanges respiratoires, et la quantification du métabolisme énergétique (Willmore et Costill, 1994). Un des premiers dans ce domaine, en particulier dans les exercices intermittents, a été le physiologiste Suédois Per Olof Astrand (Billat, 2001a). Sur le plan physiologique, $\dot{V}O_{2\max}$ fût le premier facteur identifié comme un déterminant de la performance en demi-fond (Bassett et Howley, 2000 ; Midgley et coll, 2006a). Archibald Vivian Hill (prix Nobel de physiologie et médecine en 1922), en 1923, a défini le concept de $\dot{V}O_{2\max}$ et l'atteinte d'un état stable maximal au dessus duquel la consommation d'oxygène n'augmente plus (Bassett et Howley, 2000). La stabilité de la consommation d'oxygène, à partir d'une certaine intensité, a été confirmée par les travaux d'Astrand et Rodahl (1970). Hill et Lupton, en 1923, proposaient déjà qu'un niveau élevé de $\dot{V}O_{2\max}$ serait nécessaire pour réaliser des performances élevées dans les courses de ½ fond (Bassett et Howley, 2000). Même si aujourd'hui, il est admis que la performance en endurance est corrélée avec un ensemble de facteurs comme le seuil lactique (Grant et coll, 1997), l'économie de course (Conley et coll, 1980), la capacité anaérobie (Sinnott et coll, 2001), l'index d'endurance (Péronnet et Thibault, 1987), $\dot{V}O_{2\max}$ reste, pour de nombreux auteurs, un facteur majeur de la performance en endurance (Pollock et coll, 1980 ; Foster, 1983 ; Brandon, 1995).

2.2.1 - ATTEINTE DE LA $VO_{2\max}$ AU COURS DES EXERCICES INTERMITTENTS

Les premiers travaux sur les exercices intermittents ont montré qu'il existait des effets physiologiques différents suivant la forme de l'exercice intermittent (Christensen et coll, 1960 ; Astrand et coll, 1960a). Il a été observé, que lors d'un exercice intermittent de type 10s-5s (périodes de 10 s de course entrecoupées par des périodes de 5 s de récupération passive) réalisé pendant 20 min (à une vitesse qui ne pouvait être soutenue que 4 min en

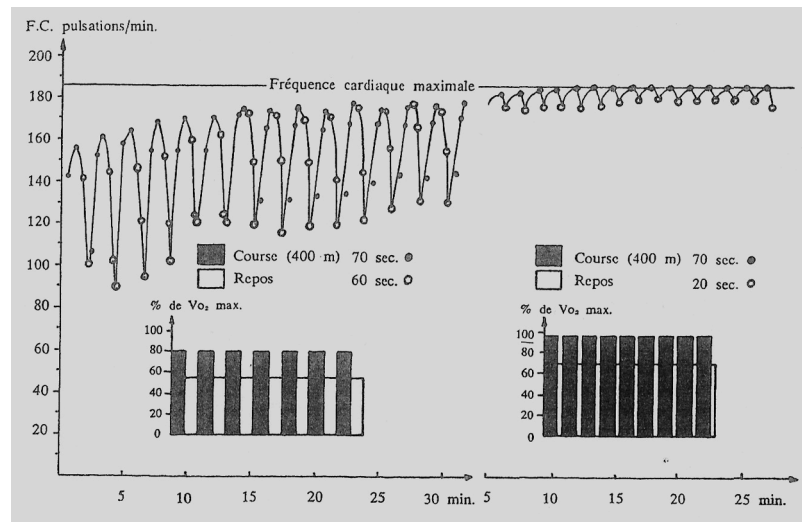
continu), le coureur atteignait $\dot{V}O_{2\max}$ à la fin de chaque période d'exercice (Christensen et coll, 1960). Ces mêmes auteurs ont montré que la $\dot{V}O_2$ n'atteignait pas les valeurs maximales si la période de récupération était allongée à 10 s et qu'elle était plus élevée, mais restait sous-maximale lors d'un exercice de type 15s-15s. Astrand et coll (1960b) ont montré, qu'à une puissance de 350 W, un exercice continu sur bicyclette ergométrique ne pouvait être maintenu plus de 9 min, à la même intensité l'exercice intermittent 30s-30s était réalisé pendant 30 min. Dans cette étude, parmi quatre formes d'exercices intermittents étudiés (30s-30s, 1 min-1min, 2min-2min et 3min-3min), ce sont les modalités alternant des périodes d'effort de 2 ou 3 min avec des périodes de récupération de 2 ou 3 min qui permettaient d'atteindre $\dot{V}O_{2\max}$ avec des valeurs de lactates élevées (16,6 mmol/L). Saltin (1968) confirma qu'un exercice intermittent 3min-3min réalisé à une vitesse correspondant à $v\dot{V}O_{2\max}$ permettait d'atteindre des valeurs maximales de F_C et de $\dot{V}O_2$. Lors d'un exercice intermittent de type 20s-10s (Figure 3), une augmentation de la vitesse de course de seulement 3,4% (de 22 km.h⁻¹ à 22,75 km.h⁻¹) conduit à une sollicitation de 90% à 100% de $\dot{V}O_{2\max}$ (Karlsson et coll, 1967). Cette augmentation de l'intensité de l'exercice a aussi pour conséquence une réduction importante du temps d'effort (de 60 min à 25 min) alors que la concentration sanguine du lactate reste identique à l'arrêt des deux exercices. En accord avec les observations sur le terrain, les recherches ont montré que l'intensité de l'effort était le facteur le plus important dans l'augmentation de la sollicitation de $\dot{V}O_{2\max}$ et les progrès des athlètes (Shephard, 1968 ; Fox et coll, 1973 ; Wenger, 1986), et ceci d'autant plus que $\dot{V}O_{2\max}$ était élevé (Midgley et coll, 2006). Une connaissance précise de l'intensité des efforts à réaliser, pour atteindre un niveau élevé de sollicitation aérobie lors des exercices intermittents, apparaît primordiale pour leur efficacité (Billat, 2001a ; Fox et coll, 1973 ; Fox et coll, 1977 ; Laursen et Jenkins, 2002 ; Laursen, 2010). Par contre, une augmentation de la fréquence et de la durée de l'entraînement intermittent (de 2 fois à 4 fois par semaine) ne permettait pas une amélioration significative de $\dot{V}O_{2\max}$ (Fox et coll, 1975 ; Gjovaag et Dahl, 2008). **Il semble que ce soit avant tout l'intensité des exercices intermittents plutôt que le volume total d'entraînement qui soit en relation avec des adaptations physiologiques significatives** (Laursen et Jenkins, 2002 ; Laursen et coll, 2002b).

Figure 3. - Consommation d'oxygène, fréquence cardiaque et lactatémie au cours de deux exercices intermittents 20s-10s courus respectivement à 22km.h⁻¹ et 22,75 km.h⁻¹ (Karlson et coll, 1967).



Un autre facteur, qui influence l'intensité globale des exercices intermittents, mis en évidence très tôt par Karlson et coll (1978), est la durée de la récupération entre les efforts (figure 4). Dans cette étude, les auteurs mettaient en évidence que la réduction de la phase de récupération de 60 s à 20 s entre des 400 m courus en 70 s augmentait la sollicitation aérobie de 80% à 100% de $\dot{V}O_{2\max}$.

Figure 4. - Consommation d'oxygène et fréquence cardiaque au cours de deux exercices intermittents : 400 mètres courus en 70s alternés avec des récupérations passives de 60 s dans le premier exercice ou de 20 s dans le deuxième exercice (Karlson et coll, 1978).



2.2.2 - LA RESERVE D'OXYGENE LOCALE : LA MYOGLOBINE

La myoglobine (MHbO₂) est une protéine musculaire, composée d'une chaîne unique de 153 acides aminés contenant un noyau phosphorique avec ion fer II au centre, découverte en 1957 par John Kendrew (prix Nobel de chimie en 1962). Elle se trouve dans les muscles squelettiques (elle donne une coloration rouge aux fibres oxydatives) et le muscle cardiaque. Lorsque l'hémoglobine du sang libère l'O₂ dans les muscles, la myoglobine musculaire en récupère une partie pour constituer une réserve locale. Au début de l'activité physique aérobie intense, la demande en O₂ est souvent plus importante que l'apport (cela est dû au délai mis pour atteindre un niveau de $\dot{V}O_2$ élevé et au fait que la contraction des muscles s'accompagnant d'une constriction des artérioles au moment même où le besoin en O₂ est le plus important) ; la myoglobine libère alors sa réserve d'O₂ pour compenser l'insuffisance de l'apport sanguin (Wittenberg, 1975 ; Mc Ardle et coll, 1987). La myoglobine facilite le transfert d'oxygène aux mitochondries, particulièrement au cours d'exercices intenses et intermittents (Wittenberg, 1975). Les réserves d'O₂ fixées à la myoglobine sont estimées à 2 mmol O₂.kg⁻¹ de muscle, ce qui correspond à 3 mmol ATP.kg⁻¹ de muscle (Harris et coll, 1975).

La myoglobine permet à un sujet de réaliser un exercice intermittent (10s-20s), à une intensité supérieure à la puissance maximale aérobie (PMA) sans qu'il y ait une implication majeure du système anaérobie lactique, alors qu'à cette même puissance (412 W) les sujets ne pouvaient effectuer un exercice continu plus de 4 min (Astrand et coll, 1960c). A cette intensité, le sujet devrait contracter un déficit maximal d'oxygène accumulé (DMOA) (Medbo et coll, 1988 ; Scott et coll, 1991), qui correspond à une quantité d'énergie empruntée à des mécanismes énergétiques non oxydatifs ; la réserve d'oxygène fixée à la myoglobine permet de limiter le déficit en O₂ (Astrand et coll, 1978).

Lors d'un exercice aérobie maximal et supramaximal ($\geq 100\%$ de $\dot{V}O_{2\max}$) (Billat, 1998), le déficit en oxygène correspond à la production d'énergie par la glycolyse (Margaria et coll (1933), parlaient de dette « lactique »). Les méthodes d'évaluation du déficit en oxygène lors d'un effort supérieur à la PMA ont largement évoluées (Cerretelli, 1988) et le concept d'ECOPE (« Excess Post-Exercise Oxygen Consumption ») a été critiqué (surtout la composante lactique) (Gaesser et Brooks, 1984 ; Brooks et coll, 2004) au bénéfice du concept de DMOA (Medbo et coll, 1988).

Astrand (1960a) a mis en évidence qu'il n'y a pas de déficit en oxygène contracté au cours de l'exercice 10s-20s (figure 5), alors qu'un déficit calculé d'oxygène de ~ 2 l apparaissait lors de l'exercice 60s-120s. Cette différence était expliquée par le rôle central que joue la myoglobine dans la fourniture d'oxygène au processus aérobie (Astrand et coll, 1960c). La réserve d'oxygène, estimée à 0,43 l contenue dans la myoglobine, est utilisée au cours de l'effort et reconstituée au cours de la récupération (Essén et coll, 1977 ; Astrand, 1992). Elle correspondrait au cours d'exercices intermittents 10s-20s, à près de 50%, de la quantité d'oxygène consommée lors des 10 s d'effort (Astrand, 1992) et à 20% de cette quantité lors d'un exercice de type 15s-15s effectué pendant 1 heure (Essén et coll, 1977). Cette réserve d'oxygène avait également été estimée à 10% de la DMOA lors d'un exercice maximal de 2 min (Medbo et Tabata, 1990). Lorsque l'effort était maintenu pendant 60 s (intermittent 60s-120s, figure 5b), la réserve d'oxygène contenue dans la myoglobine ne suffisait plus pour limiter la dette en oxygène et la contribution du processus anaérobie lactique à la resynthèse d'ATP. La concentration du lactate ([La]) sanguin, dans ce cas, augmentait tout au long de l'exercice pour atteindre des valeurs de 15,7 mmol. Au cours de l'exercice intermittent 30s-60s, [La] augmentait au début de l'exercice pour ensuite se stabiliser, voire redescendre pendant les 30 min du temps total d'effort. Bien qu'au cours du 30s-60s les valeurs de [La] soient plus élevées que lors du 10s-20s, le fait que [La]

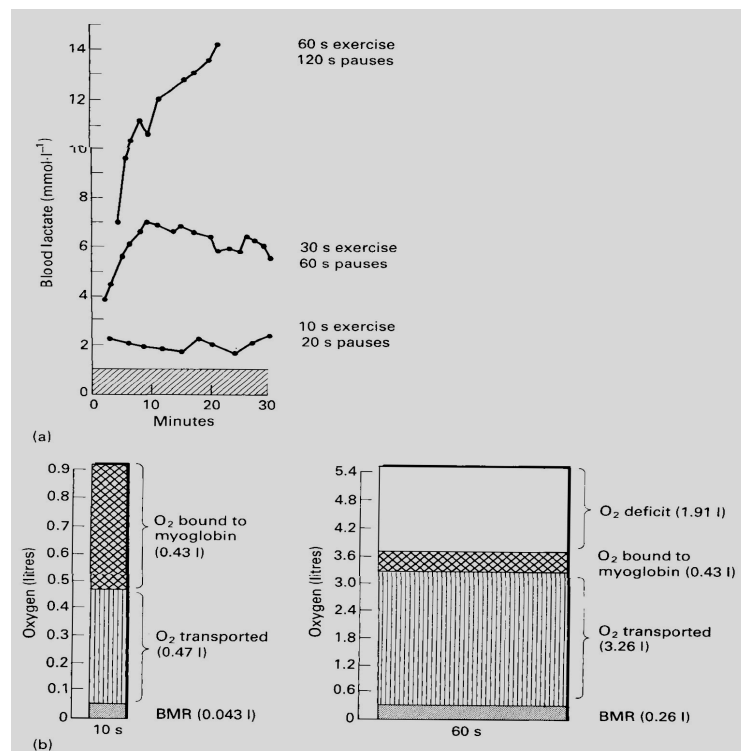
n'augmente plus à partir de 10 min (sur 30 min), était le résultat d'un équilibre entre la production et l'utilisation du lactate (Di Prampero, 1988). Allonger la durée de l'effort, lors des exercices intermittents a donc des conséquences sur le niveau de sollicitation de la glycolyse. Il semble qu'un effort de plus de 30 s à la PMA, lors d'un exercice intermittent, conditionne le fait que la réserve d'oxygène fixée à la myoglobine ne soit plus suffisante et qu'alors en conséquence la [La] soit plus importante. Si la durée de l'effort n'excède pas 30 s, alors l'implication de la glycolyse dans la fourniture d'énergie sera moindre (Christensen et coll, 1960). L'enchaînement des efforts est possible car lors des récupérations, les réserves d'oxygène locales, d'adénosine triphosphate (ATP) et de phosphocréatine (PC), sont reconstituées (Astrand, 1992). Au cours de la récupération les réserves de MbO₂ sont reconstituées 20 secondes après la fin de l'effort (Richarson et coll, 1995). Il a été montré, en comparant les exercices intermittents de type 10s-20s, 30s-60s et 60s-120s, que même lors du 60s-120s, après les 5 premières minutes d'exercice, il pouvait y avoir un équilibre entre production et élimination du lactate (Saltin et Karlsson, 1971a). Les exercices intermittents étaient réalisés en état stable de lactatémie (bien que la [La] soit plus élevée que dans l'expérience d'Astrand et coll, 1960a). Les différences entre ces deux études peuvent être attribuées aux différentes populations étudiées. Dans l'étude d'Astrand et coll (1960a), il s'agissait de sujets non entraînés alors que dans l'étude de Saltin et Karlsson (1971a), il s'agissait d'athlètes de niveau Olympique. L'entraînement permettrait d'améliorer le contenu musculaire en myoglobine de 75% à 80% des réserves musculaires initiales (De Pattengale et Holloszy, 1967 ; Wilmore et Costill, 1994 ; Goodman et coll, 1997) et ceci dans les muscles actifs. Il est donc possible de faire l'hypothèse qu'une plus grande réserve d'oxygène locale a été constituée et qu'elle a conduit à prolonger le temps d'effort, lors de l'exercice intermittent de type 60s-120s, en limitant la glycolyse.

Dans les exercices intermittents courts (10 s d'effort), [La] augmente rapidement si la récupération est courte (10 s) alors qu'elle augmente modérément si la récupération est de 30 secondes (Margaria et coll, 1969). Cette observation pourrait être en relation avec le fait qu'un délai de 20 s étant nécessaire pour reconstituer les réserves de MbO₂ (Richarson et coll, 1995), une récupération de 10 secondes est insuffisante, alors qu'une récupération de 30 secondes est suffisante pour une reconstitution complète de cette réserve d'oxygène.

Plusieurs études montrent également que l'entraînement en altitude provoque une augmentation du niveau de myoglobine (Terrados et coll, 1990 ; Terrados, 1992 ; Green, 2000) ; à la lumière de ces travaux et de ceux de Stepto et coll (2001), qui considèrent que les

exercices intermittents intenses produisent un effet similaire à un stress hypoxique, Laursen et Jenkins (2001) font l'hypothèse que le travail intermittent induirait des contraintes de travail similaires à l'altitude.

Figure 5. - (a) Evolution de la lactatémie au cours de trois exercices intermittents réalisés à la puissance de 412 W pendant 30 minutes: 10s-20s ; 30s-60s ; 60s-120s. La zone grisée correspond à la concentration de lactate au repos. (b) Calcul des fractions d'oxygène utilisées (par le métabolisme basal, lié à la myoglobine et transporté par le sang) et du déficit en oxygène au cours du 10s-20s et du 60s-120s (Astrand et coll, 1978).



En résumé, au cours des exercices intermittents, l'O₂ fixé à la myoglobine peut assurer jusqu'à 50% des besoins de la cellule en oxygène. La réserve d'oxygène est restaurée pendant la récupération. Ce mécanisme permet d'accroître globalement la dégradation du glucose par le système aérobie et il en découle que la production d'ATP est plus importante, par unité de glucose, comparée à une production due essentiellement à la glycolyse, conduisant au lactate (Billat, 2001a).

2.2.3 - LA CINÉTIQUE DE $\dot{V}O_2$: ASPECTS GÉNÉRAUX ET SPÉCIFIQUES AUX EXERCICES INTERMITTENTS

Le déficit en oxygène étant limité au cours des exercices, il était probable que, suite à un entraînement intermittent, la cinétique de $\dot{V}O_2$ puisse être modifiée.

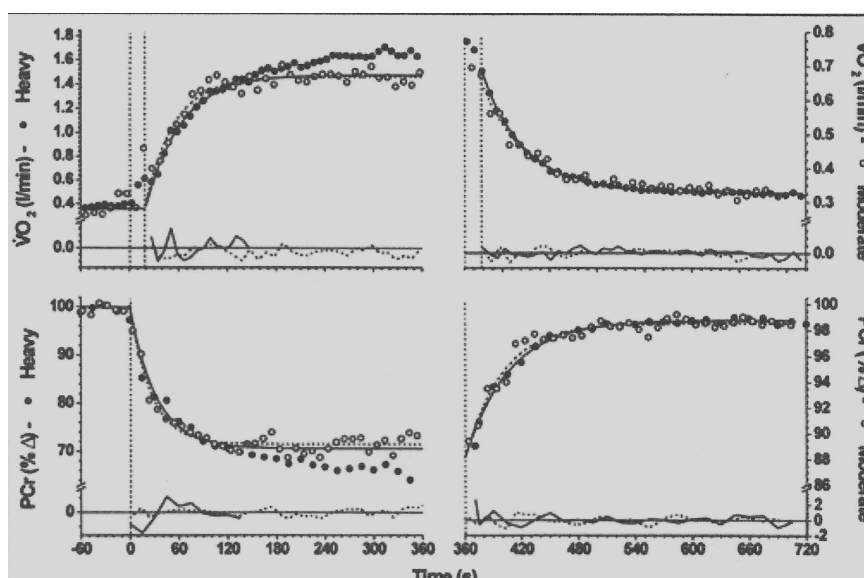
2.2.3.1 - LA CINÉTIQUE DE $\dot{V}O_2$, DU REPOS À L'EXERCICE ET DE L'EXERCICE AU REPOS.

Lors d'une transition repos-exercice à intensité constante, la cinétique de $\dot{V}O_2$ suit une évolution de type exponentielle pour tendre vers un état plus ou moins stable. Trois phases ont été identifiées (Barstow, 1994) dans l'ordre chronologique suivant : Phase I. D'une durée de 15 à 20 s après le début de l'effort, elle est également appelée phase cardio-respiratoire. Phase II. Elle correspond à une augmentation exponentielle de $\dot{V}O_2$ pour tendre vers un état stable après environ 3 à 4 min d'exercice. La constante de temps, exprimant la vitesse de cette phase, serait en rapport avec la capacité du muscle à utiliser l'O₂ localement, et à désaturer le sang artérielle en O₂ (Murias et coll, 2011). Elle est également appelée composante rapide de $\dot{V}O_2$. Phase III. Aux intensités modérées (en dessous du seuil lactique), elle correspond à un état stable de $\dot{V}O_2$. Aux intensités supérieures au seuil lactique, la $\dot{V}O_2$ continue à s'élever mais plus lentement que dans la phase II. Soit cette élévation conduit à un nouvel état stable de $\dot{V}O_2$ vers 6 à 12 minutes d'exercice, soit l'augmentation se poursuit jusqu'à l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$. Cette phase est aussi appelée composante lente de $\dot{V}O_2$. La composante lente dépendrait de l'intensité du travail musculaire et du niveau de PC dans le muscle (Poole et coll, 1991 ; Rossiter et coll, 2000), mais ses mécanismes ne sont pas complètement élucidés (Barstow et coll, 1996 ; Rossiter et coll, 2001). Par ailleurs, il a été montré que cette composante était significativement réduite, quand un effort intense ou une succession d'efforts intenses étaient réalisés (Rossiter et coll, 2001 ; Tordi et coll, 2002), avant un effort continu (6 min à 85% de PMA). Dans ces conditions, ces mêmes auteurs ont montré que la phase II était aussi réduite (Rossiter et coll, 2001 ; Tordi et coll, 2002).

Après l'arrêt de l'exercice et avant le retour aux valeurs de repos, la $\dot{V}O_2$ suit également une cinétique en deux phases, une phase rapide et lente (di Prampero et coll, 1970 ; Margaria et coll, 1980 ; Cerretelli, 1988). Juste après l'arrêt de l'exercice, commence une première phase au cours de laquelle la $\dot{V}O_2$ descend rapidement. La demi-vie ($t_{1/2}$) de cette phase est d'environ 30 secondes, et associée à la reconstitution des réserves d'ATP, de PC_r, de MHbO₂ et d'hémoglobine (HbO₂). Suit une deuxième phase où la $\dot{V}O_2$ baisse lentement, avec un $t_{1/2}$ de 15-18 min. Cette phase a d'abord été attribuée uniquement au temps mis pour éliminer le lactate accumulé (Cerretelli, 1988). Elle est en réalité due au coût énergétique supplémentaire pour synthétiser du glycogène à partir du lactate, pour éliminer le lactate et les ions H⁺, pour lutter contre l'élévation de la température suite à l'exercice, pour compenser l'élévation du coût énergétique de la respiration et du travail cardiaque, et pour lutter contre une élévation de la concentration de catécholamine (Gaesser et Brooks, 1984 ; Sahlin, 1992 ; Poortmans, 2009). L'évaluation de cette dernière phase est un indice pertinent de l'efficacité du système de transport et d'utilisation de l'O₂, que ce soit au niveau médical (Pavia et coll, 1999) ou au niveau sportif (Short et Sedlock, 1997 ; Billat et coll, 2002).

La figure 6 montre que la cinétique de la $\dot{V}O_2$ est négativement corrélée à la cinétique de PC (Rossiter et coll, 2002), que ce soit au début d'exercices intenses ou modérés, ou après l'arrêt de ces exercices

Figure 6. - Cinétiques de VO₂ et de Phosphocréatine (PC) avant et après un exercice modéré (cercles vides) ou intense (cercles pleins).



Différents facteurs interagissent pour déterminer la cinétique de $\dot{V}O_2$. La nature des processus énergétiques, au début de l'exercice, est limitée en particulier par des facteurs cellulaires (activation des signaux métaboliques et des enzymes) et la disponibilité de l'oxygène au niveau local (Casas, 2008). Ces facteurs locaux influencent la vitesse à laquelle se déroule la respiration cellulaire. Il s'agit en particulier du potentiel de phosphorylation oxydative, du potentiel d'oxydo-réduction et de la pression mitochondriale en O_2 (P_{mitoO_2}) de la cellule (Tschakowsky et Hughson, 1999). Ces facteurs locaux sont très influencés par les exercices intermittents, en particulier l'accroissement de $[Ca^{2+}]$ musculaire et le ratio ATP/ADP qui s'adaptent aux demandes soudaines et répétées lors des tensions musculaires en rapport avec l'intensité des exercices (Casas, 2008).

2.2.3.2 - INFLUENCE DE L'ENTRAÎNEMENT INTERMITTENT SUR LA CINÉTIQUE DE $\dot{V}O_2$

Il a été montré qu'un entraînement continu en endurance réduisait de façon importante les phases II et III, au cours desquelles la $\dot{V}O_2$ augmente jusqu'à atteindre un équilibre entre les besoins et l'apport en oxygène (Billat et coll, 2002). De même, il a été montré qu'un entraînement intermittent (8 semaines à raison de 2 séances d'exercices intermittents par semaine à 93% de $v\dot{V}O_{2max}$) conduisait à une réduction significative du déficit en O_2 (figure 6 : phase II), mesuré lors d'un exercice réalisé à la même intensité avant et après la période d'entraînement (Demarle et coll, 2001). Billat et coll (2002) ont aussi montré que la baisse de $\dot{V}O_2$ lors de la récupération était également accélérée à la suite d'un programme d'entraînement intermittent. Dans cette dernière étude, la composante lente de $\dot{V}O_2$ était également accélérée (figure 6 : phase III), alors que Demarle et coll (2002) ne rapportaient aucune modification de cette phase. Si les programmes d'entraînement sont comparables entre ces deux études (forme et périodicité des séances d'exercices intermittents), le niveau physique des sujets était considérablement différent. Dans l'étude de Billat et coll (2002), il s'agissait de sujets non entraînés, alors que dans l'étude de Demarle et coll (2001), il s'agissait de sujets très entraînés. Il est probable qu'une adaptation au niveau de la phase III ait déjà eu lieu chez les sujets entraînés et que par conséquent l'entraînement n'avait plus d'effet.

2.2.4 - LE TEMPS PASSE A PLUS DE 90% DE $\dot{V}O_{2\max}$ ($T90\% \dot{V}O_{2\max}$)

Dans la période 1960 à 1980, si la plupart des études mettent en avant le fait que lors des exercices intermittents les sujets puissent atteindre leur $\dot{V}O_{2\max}$, le temps passé à $\dot{V}O_{2\max}$ ou à un fort pourcentage de celle-ci n'était pas mesuré (Billat, 2001a). La mesure du temps passé à 100% de $\dot{V}O_{2\max}$ (Billat et coll, 2000b), ou à plus de 90% et de 95% de $\dot{V}O_{2\max}$, lors d'un exercice intermittent, apparaît aujourd'hui comme un critère majeur dans l'appréciation de l'impact sur le système aérobie (Dupont et coll, 2003a ; Thévenet et coll, 2007a et 2007b). Cette mesure est en adéquation avec le fait qu'une amélioration significative de la capacité aérobie correspond directement au temps passé entre 90% et 100% de la $\dot{V}O_{2\max}$ lors de l'entraînement (Robinson et coll, 1991). Cependant, il a également été montré que des progrès significatifs de l'aptitude aérobie pouvaient être observés lorsque des sujets (non entraînés) réalisaient des exercices intermittents courts et intensifs, sans que le temps passé entre 90% et 100% de la $\dot{V}O_{2\max}$ soit important (Burgomaster et coll, 2005 ; Gibala et coll, 2009).

2.2.4.1 - INFLUENCE DE LA VITESSE DE COURSE SUR LE $T90\% \dot{V}O_{2\max}$

L'intensité à laquelle est réalisée un exercice intermittent est un facteur déterminant de son efficacité (Laursen et Jenkins, 2002), dans ce sens il paraît probable que la vitesse de course influence le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$.

Dans une étude, où de jeunes coureurs de demi-fond effectuaient deux sessions d'exercices intermittents 30s-30s (au cours des deux sessions, la récupération était effectuée à 50% de VMA), l'une à 100% de VMA et l'autre à 110% de VMA, Thévenet et coll (2007) ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative de $T90\% \dot{V}O_{2\max}$. Cependant le temps limite était significativement ($P < 0,01$) plus long pour l'exercice à 100% comparé à 110% ; les auteurs ont suggéré que 100% de VMA était une intensité suffisante pour développer les capacités aérobies. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Platonov (1987) sur les zones d'intensité pour le développement de la capacité aérobie des sportifs. Pour cet auteur, faire des exercices à une intensité comprise entre 80% et 100% de $\dot{V}O_{2\max}$, serait suffisant pour

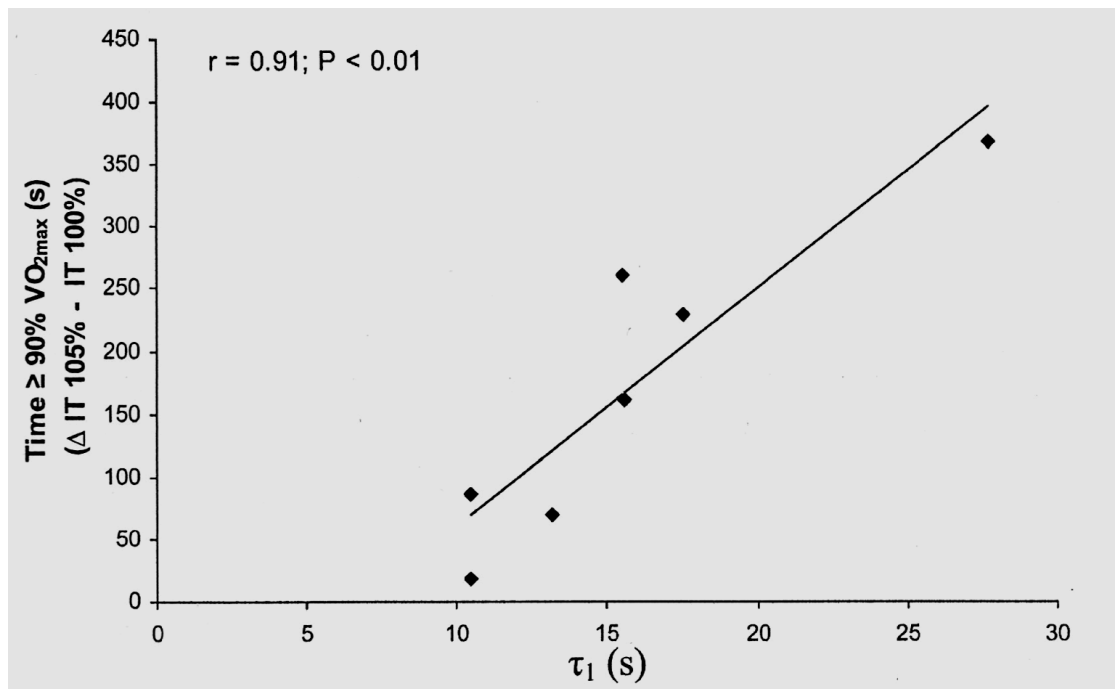
développer les capacités aérobies chez les jeunes débutants ; une intensité comprise entre 90% et 100% de $\dot{V}O_{2\max}$ serait nécessaire pour les athlètes entraînés ; et une intensité comprise entre 95% et 100% serait adaptée pour les athlètes très entraînés. Robinson et coll (1991) ont aussi suggéré que, pour des athlètes entraînés, une intensité comprise entre 90% et 100% de $\dot{V}O_{2\max}$ était la plus adaptée au développement des capacités aérobies. Selon l'étude de Thévenet et coll (2007), courir à 100% de VMA ou à 110% de VMA lors des exercices intermittents, pour de jeunes athlètes, sollicitait le système aérobie de manière identique. Pour de jeunes athlètes, il ne serait donc pas nécessaire de rechercher absolument une augmentation d'intensité des exercices intermittents, ceci n'influencerait pas le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$.

Chez une population de triathlètes entraînés, il a été montré qu'une augmentation de 100% de VMA (IT_{100}) à 105% de VMA (IT_{105}), de la vitesse de course lors d'un exercice intermittent 30s-30s, permettait d'avoir une augmentation significative ($P<0,01$) du $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ (Millet et coll, 2003b). Dans cette étude le $tlim$ n'a pas été mesuré. Par ailleurs, ces auteurs avaient montré que les sujets, ayant une cinétique plus lente de VO_2 au cours d'un test $tlim$ continu, étaient ceux qui accroissaient le plus le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$, lorsque l'intensité de l'exercice passait de 100% à 105% de VMA (figure 8).

En comparant 4 exercices intermittents de type 15s-15s réalisés à 110%, 120%, 130% et 140% de $v \dot{V}O_{2\max}$, il a été montré que les vitesses de course correspondant à 110% et 120%, étaient celles qui induisaient le plus grand $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ (Dupont et coll, 2002). Il a également été montré qu'il n'y avait pas de différence significative sur le $T95\% \dot{V}O_{2\max}$, entre des exercices intermittents (20s-20s ; 25s-20s ; 30s-20s) réalisés à 105 et 115% de VMA (Wakefield et Glaister 2009).

Cependant, réaliser l'exercice intermittent à une vitesse de course élevée, ne suffit pas toujours à optimiser le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$; ainsi Zafeiridis et coll (2010) ont montré lors d'un exercice intermittent (3min-3min) à 95% de VMA que le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ était plus grand que lors d'un exercice intermittent (30s-30s) à 110% de VMA.

Figure 8. - Relation entre la constante de temps (s) de la première phase d'augmentation de $\dot{V}O_2$ au cours d'un test tlim continu et la différence entre le $T_{90\%VO_{2MAX}}$ lors du 30s-30s à 105% de VO_{2max} (IT_{105}) et le $T_{90\%VO_{2MAX}}$ lors du 30s-30s à 100% de VO_{2max} (IT_{100}) (Millet et coll, 2003b).

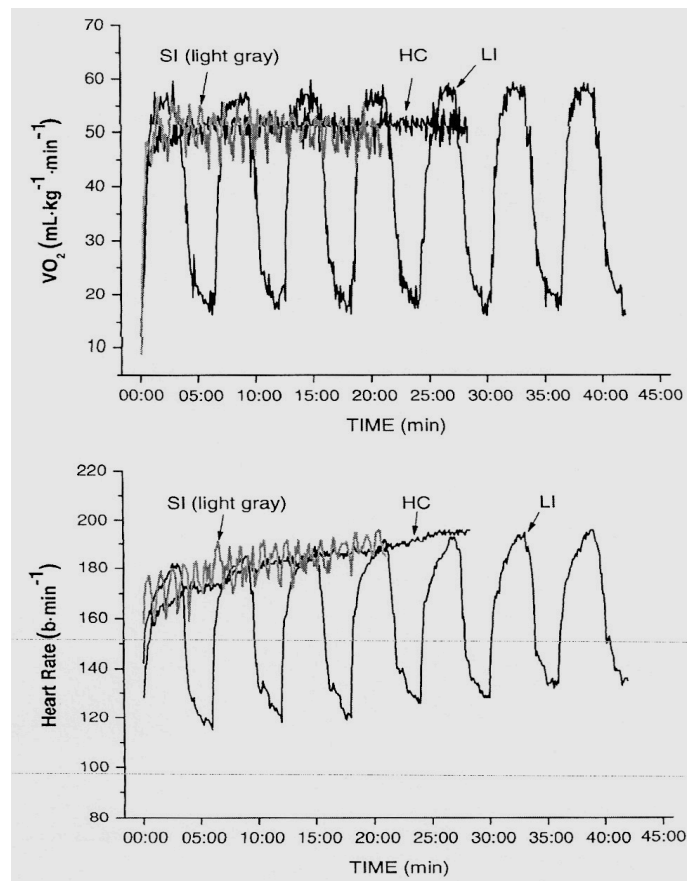


2.2.4.2 - INFLUENCE DU TEMPS D'EFFORT SUR LE $T_{90\%}\dot{V}O_{2max}$

Les travaux de Franck et coll (1998) confirment les observations et les hypothèses d'Astrand et coll (1960), selon lesquelles un temps d'effort suffisamment long (2 à 4 min) permet une sollicitation énergétique plus importante, par rapport à des temps d'effort plus courts (15 s). Un entraînement, à base d'exercices intermittents longs (4min-2min) comparés à des exercices intermittent courts (15s-15s), conduit à une amélioration plus importante de la $\dot{V}O_{2max}$ (+6% vs +3,6%) et du coût énergétique (+3% vs 0,9%) (Franck et coll, 1998). Le fait d'allonger le temps d'effort, de 30 s à 60 s, à la $\dot{V}O_{2max}$, conduit à un allongement du $T_{90\%VO_{2MAX}}$, de 149 ± 33 s à 531 ± 187 s (Millet et coll, 2003a), chez des adultes entraînés. Ce constat est confirmé chez les enfants (figure 9) non entraînés ; un allongement du temps d'effort lors des exercices intermittents (de 30s à 110% de $\dot{V}O_{2max}$ à 3 min à 95% $\dot{V}O_{2max}$)

conduit à un $\tau_{90\%} \dot{V}O_{2\max}$ plus long (392 s vs. 149 s), et une sollicitation aérobie globalement plus importante (Zafeiridis et coll, 2010).

Figure 9. - Evolution, chez un sujet, de la $\dot{V}O_2$ et de la F_C en fonction du temps, au cours d'un exercice continu intense (HC), d'un exercice intermittent long (LI), et d'un exercice intermittent court (SI), (Zafeiridis et coll, 2010).



De même, Vuorimi et coll (2000) ont montré que l'augmentation du temps d'effort lors d'un exercice intermittent (60s-60s vs 120s-120s à $v \dot{V}O_{2\max}$) permettait d'accroître la sollicitation aérobie (+12% de $\dot{V}O_{2\max}$) et anaérobie (+79% [La]). Quand le temps d'effort est allongé de 20 à 30 secondes, alors que la récupération est d'une durée constante de 20 s, le $\tau_{95\%} \dot{V}O_{2\max}$ est significativement plus grand (Wakefield et Glaister, 2009). Ces auteurs ont suggéré qu'il faut un temps au minimum égal à 30 secondes couru à une vitesse de 105% de $v \dot{V}O_{2\max}$ pour avoir un $\tau_{90\%} \dot{V}O_{2\max}$ suffisamment long.

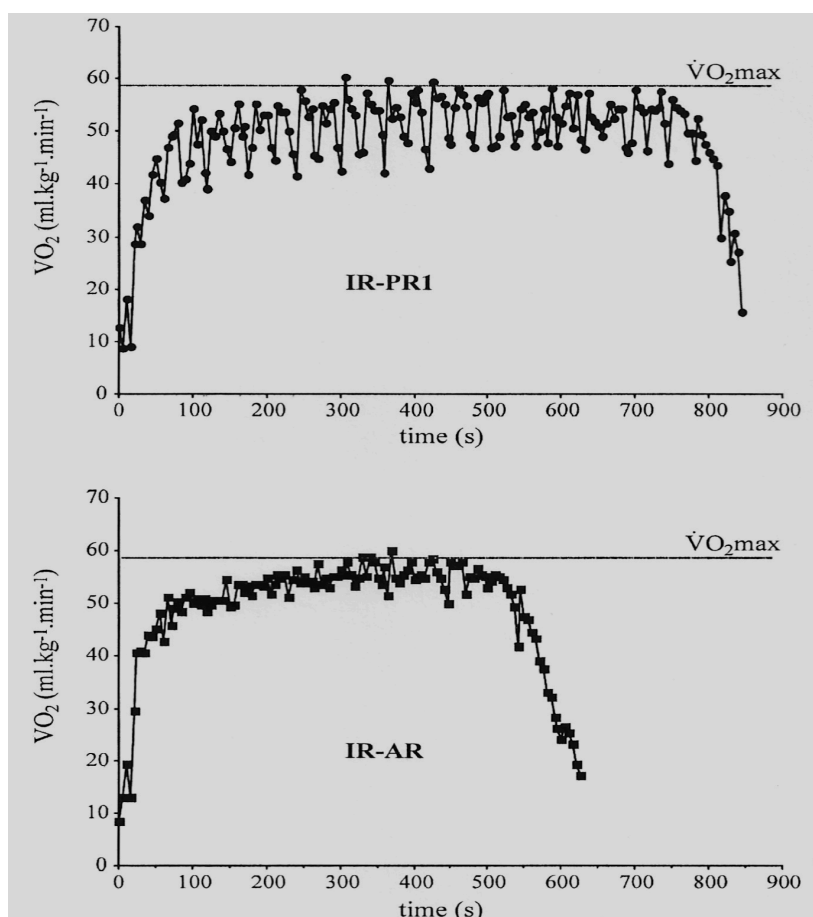
2.2.4.3 - INFLUENCE DU MODE DE RECUPERATION (ACTIVE OU PASSIVE) SUR LE $T_{90\% \dot{V}O_{2\max}}$

La diminution du temps de récupération a pour effet d'augmenter l'intensité globale de l'exercice intermittent (Christensen et coll, 1960). Plus récemment, il a été montré que les adaptations au niveau des enzymes oxydatifs (citrate synthase) et ceux de la glycolyse (lactate déshydrogénase), lors des exercices intermittents, sont en rapport avec une diminution des temps de récupération entre les efforts (Gairanos et coll, 1993 ; Rodas et coll, 2000). Il a aussi été montré que le t_{lim} était influencé par le mode de récupération (active ou passive) lors d'un exercice intermittent de type 15s-15s effectué à 120% de $v \dot{V}O_{2\max}$ (Dupont et coll 2003). Dans cette étude, le temps limite lors du 15s-15s avec récupération active (50% de $v \dot{V}O_{2\max}$) était de 445 ± 79 s, alors qu'il était de 745 ± 171 s dans la modalité récupération passive. Les auteurs expliquent cette différence par l'hypothèse selon laquelle une part de l'oxygène consommé lors de la récupération active est utilisée pour maintenir l'intensité de récupération, et que ceci ne permet plus de recharger complètement les réserves d'oxygène fixées à la myoglobine et l'hémoglobine. Dupont et coll (2004) ont aussi suggéré que la récupération passive permettait une meilleure réoxygénation de la myoglobine, ainsi qu'une resynthèse de PC plus rapide. Cependant, lors de ces études, le $T_{90\% \dot{V}O_{2\max}}$ n'avait pas été mesuré et la comparaison de l'effet des modes de récupération ne reposait que sur le t_{lim} . D'ailleurs, les différences moyennes de $\dot{V}O_{2\max}$ atteintes au cours des deux formes d'exercices n'étaient pas significativement différentes. La figure 10 (Dupont et coll, 2003) fait tout de même apparaître des différences dans la relation $\dot{V}O_2$ /temps entre la modalité récupération passive vs récupération active. Il semble que les variations de $\dot{V}O_2$ (entre les valeurs maximales atteintes à la fin des efforts successifs et les valeurs minimales atteintes à la fin des récupérations) au cours du 15s-15s version récupération active soient limitées par rapport aux mêmes variations enregistrées avec récupération passive. Cependant dans une étude ultérieure, Dupont et Berthoin (2004) ont montré, pour le même type d'exercice intermittent, qu'il n'y avait pas de différence entre les $T_{90\% \dot{V}O_{2\max}}$.

Lors d'une comparaison entre un exercice intermittent (30s-30s couru à 105% de $v \dot{V}O_{2\max}$) effectué avec des récupérations actives (50% de $v \dot{V}O_{2\max}$) ou passives, il a aussi été montré que le t_{lim} lors du 30s-30s (récupération active) était plus court que lors du 30s-30s

(récupération passive) ; ils étaient respectivement de 1072 ± 388 s vs 2145 ± 829 s (Thevenet et coll, 2007). Dans cette étude le $\tau_{90\% \dot{V}O_{2\max}}$, en valeur absolue (exprimé en s), n'était pas significativement différent entre les deux modalités; mais lorsqu'il était exprimé en temps relatif au tlim, il était significativement ($P < 0,001$) plus grand lors de la modalité récupération active par rapport à la modalité récupération passive ($67,7 \pm 19\%$ vs $24,2 \pm 19\%$). Ces auteurs ont suggéré que la modalité récupération passive permettait d'atteindre un tlim plus grand, tout en permettant un $\tau_{90\% \dot{V}O_{2\max}}$ aussi long que lors de la modalité récupération passive.

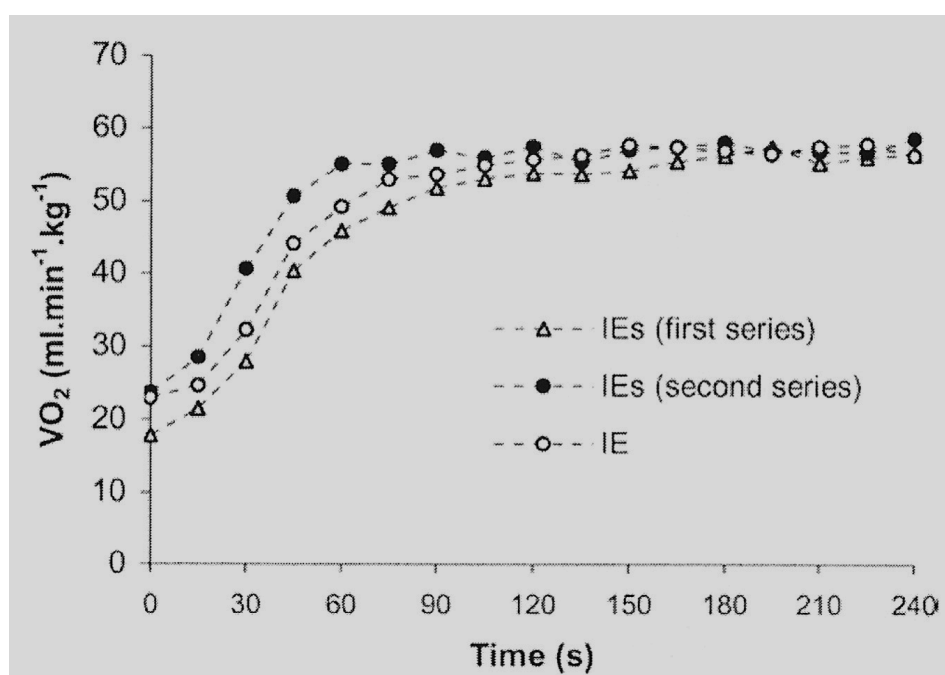
Figure 10. Relation entre la $\dot{V}O_2$ et le temps au cours d'un exercice intermittent 15s-15s avec récupération passive (IR-PR1) ou active (IR-AR) (Dupont et coll, 2003)



D'autre part, il a été montré que si des récupérations plus longues (4 min dont 30 s passive puis 3 min à 50% de VMA puis 30 s passive) (IEs) sont intercalées toutes les 6 répétitions d'un exercice intermittent (30s-30s couru à 110% de VMA avec récupération active à 50% de VMA), la durée totale des efforts était plus grande que lorsqu'il n'y avait qu'une seule série

(IE) réalisée jusqu'à l'épuisement (Tardieu-Berger et coll, 2004a). Bien que le tlim IEs était significativement plus grand que le tlim IE, respectivement 960 ± 102 s vs 621 ± 56 s, il n'y avait pas de différence entre les $T90\% \dot{V}O_{2max}$ en valeur absolue, alors qu'en valeur relative au tlim, il était significativement ($p < 0,05$) plus grand ($58,3 \pm 8,7\%$ vs $36,4 \pm 10,4\%$) lors de IE. Il a également été montré, lors de cette même étude, que la cinétique de $\dot{V}O_2$ était plus rapide lors d'IEs à partir de la 2^{ème} série, comparativement à la 1^{ère} série et à la cinétique de $\dot{V}O_2$ au début de IE (figure 11). Les auteurs ont conclu que, si le but était de trouver une organisation permettant d'augmenter le tlim, tout en ayant un niveau de sollicitation proche de 90% de $\dot{V}O_{2max}$ important, alors la modalité IEs serait la plus adaptée, alors que si le but était d'atteindre un niveau le plus élevé possible de $\dot{V}O_2$, la modalité IE serait alors la plus efficace.

Figure 11. Evolution de la $\dot{V}O_2$, pour un sujet représentatif, entre la 1^{ère} et la 2^{ème} série lors de IEs, comparée à la cinétique de $\dot{V}O_2$ au début de IE (Tardieu-Berger et coll, 2004).



Le mode de récupération influence l'intensité globale des exercices intermittents, quand celle-ci est quantifiée par le $T90\% \dot{V}O_{2max}$. Mais la vitesse de course adoptée pendant la récupération active a aussi un effet sur l'intensité globale de l'exercice. Thevenet et coll (2008), ont comparé des exercices intermittents 30s-30s, courus à 105% de la VMA, avec une

récupération réalisée à 50% (IE₅₀), à 67% (IE₆₇) ou à 84% (IE₈₄) de la VMA. Le temps passé à $T_{90\%} \dot{V}O_{2max}$ en % du temps limite (T90%tlim), a augmenté avec l'intensité de la récupération [68±19% (IE₅₀), 77±12% (IE₆₇), 84±10% (IE₈₄)], alors que le temps limite a diminué [1072±338 s (IE₅₀), 705±320 s (IE₆₇), 394±81 s (IE₈₄)]. Les auteurs ont suggéré que la modalité IE₅₀ serait le meilleur compromis entre intensité et volume de l'exercice.

2.2.5 - RESUME

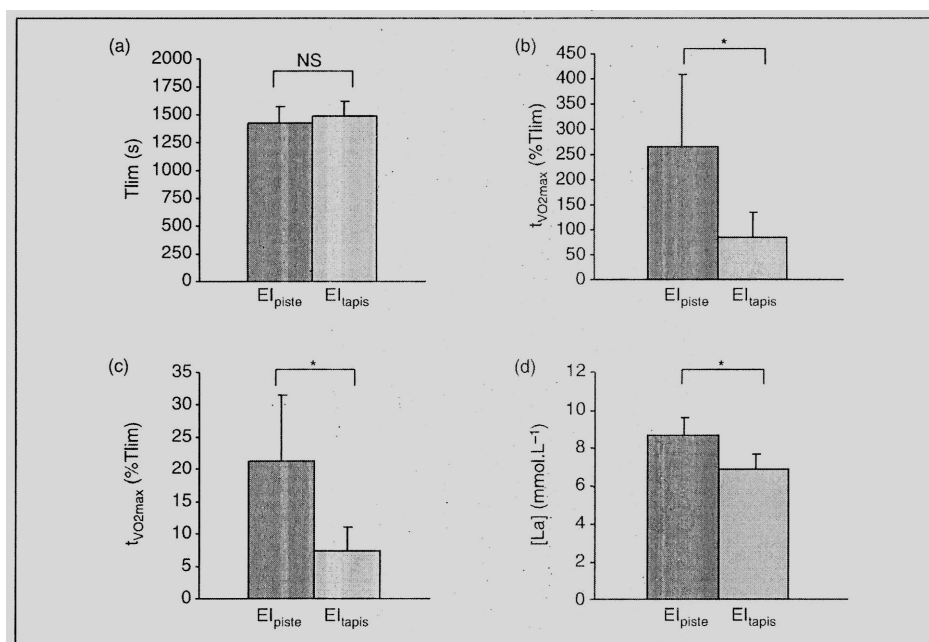
Le pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$ atteint et plus particulièrement le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ sont des indicateurs pertinents du niveau de sollicitation aérobie au cours des exercices intermittents. La durée et l'intensité de l'effort, la durée et l'intensité de la récupération sont des facteurs qui peuvent influencer considérablement le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$. Une intensité de course comprise entre 100% et 120% de VMA permet d'avoir un $T90\%$ important lors d'un exercice intermittent de type 30s-30s. L'intensité choisie doit dépendre du niveau des coureurs et aussi du temps de travail recherché. Pour des coureurs débutants, une intensité correspondant à 100% de VMA semble suffire, alors que pour des athlètes entraînés, il est nécessaire de réaliser les exercices intermittents à 120% de VMA. Ceci est d'autant plus important que le temps de course sera réduit ; ainsi pour des temps d'effort de 5 s à 60 s, une intensité représentant 120% de VMA est nécessaire pour avoir un $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ suffisamment long, alors que pour des temps de 2 à 4 min, une vitesse de course de 100% de VMA sont suffisants. Dans le même ordre d'idée, la récupération active augmente l'intensité de l'exercice en pourcentage de $\dot{V}O_2$, ceci semble nécessaire si la vitesse de course ne dépasse pas 100% de VMA. Dans le cas où la vitesse de déplacement est supérieure à 100% de VMA et surtout lorsqu'elle se rapproche de 120% de VMA, alors la récupération passive sera préconisée.

Cependant, une augmentation trop importante de l'intensité, par une combinaison des différents facteurs énoncés, peut réduire le temps pendant lequel l'exercice peut-être maintenu et altérer le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$.

2.3 - COMPARAISON PISTE VS SUR TAPIS ROULANT

Un problème relatif à la comparaison des différentes expérimentations, portant sur les exercices intermittents, peut-être lié à la modalité d'exercice utilisée, tapis roulant versus piste. Pour compenser la part relative due à la résistance de l'air à l'avancement dans l'augmentation de la $\dot{V}O_2$ (+2 à +7,8% pour des vitesses de déplacement de 5 à 7,8 m.s⁻¹), en conditions extérieures par rapport au laboratoire (Davis, 1980), il a été proposé une augmentation de l'inclinaison de la pente du tapis roulant de 1% (Jones et Doust, 1996). Il a cependant été montré que la dépense énergétique, lors d'un exercice intermittent (30s-30s à VMA, récup à 50% de VMA) sur tapis vs sur piste, n'était pas identique, malgré une inclinaison de +1% du tapis roulant (Tardieu et coll, 2004). Dans cette étude, le tlim était identique lors des deux exercices intermittents, piste (EI_{piste}) et tapis roulant (EI_{tapis}), par contre le T95% $\dot{V}O_{2max}$ et la lactatémie étaient significativement plus grands lors de EI_{piste} comparé à EI_{tapis} (figure 12).

Figure 12. - Valeurs moyennes de tlim (a), de T95%VO_{2MAX} en valeur absolue (b), de T95%VO_{2MAX} en valeur relative (c) et de lactatémie [La] (d) mesurées lors des exercices intermittents (30s-30s) réalisés sur piste (EI_{piste}) et sur tapis roulant (EI_{tapis}). * : P<0,005 ; NS : non significatif (Tardieu et coll, 2004).



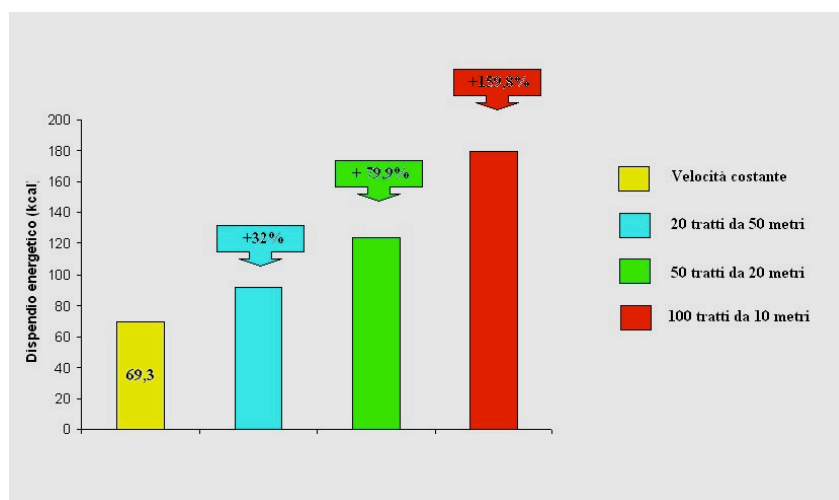
La résistance de l'air ne pouvant permettre d'expliquer ces différences, les auteurs ont proposé trois explications: 1) le pattern de course serait modifié sur tapis roulant et pourrait induire une dépense énergétique moindre à une vitesse donnée; 2) le poids des sujets, lors de chaque intervalle de récupération pourrait réduire la vitesse réelle du tapis et, par conséquence, induire une dépense énergétique moindre; et 3) sur piste le sujet doit fournir une accélération importante pour courir à une vitesse moyenne l'amenant à dépasser celle-ci, alors que sur le tapis roulant, la vitesse est imposée, le sujet ne dépasse jamais la vitesse ciblée.

Cette différence pourrait d'ailleurs être d'autant plus grande que l'exercice intermittent alterne des périodes courtes d'effort avec des périodes courtes de récupération, imposant un nombre d'accélérations importantes par minute d'exercice, mais cela reste à vérifier. En partant de la formule du calcul du coût énergétique total lors d'une course composée d'une phase d'accélération, du maintien de la vitesse et d'une décélération, Bisciotti (2000) a calculé, pour différentes modalités, la dépense énergétique totale d'une course de 1000 mètres (figure 13).

$$C_{\text{tot}} = (0,9 \text{ Kcal.kg}^{-1}.\text{km}^{-1}) + (1/2 MV^2/0,25) + (1/2 MV^2/1,2)$$

Dans l'équation ci-dessus, $0,9 \text{ Kcal.kg}^{-1}.\text{km}^{-1}$ représente le coût énergétique moyen d'une personne à vitesse constante, $1/2 MV^2/0,25$ représente le coût énergétique de l'accélération, et $1/2 MV^2/1,2$ le coût énergétique de la décélération.

Figure 13. - Dépense énergétique totale lors d'une course de 1000 mètres réalisée à la vitesse de 5 m.s^{-1} pour un individu de 77 kg. Jaune : effort continu ; Bleu : 20 x 50 m ; Vert : 50 x 20 m ; Rouge : 100 x 10 m.

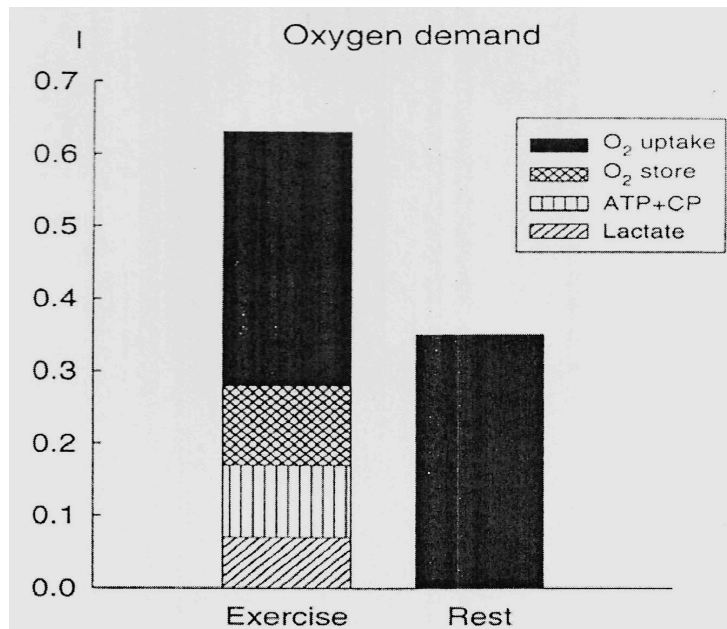


Alors que la dépense énergétique était de 69,3 Kcal lors d'une course continue, elle augmentait de 32% si le 1000 mètres était réalisé en 20 répétitions de 50 mètres, de 80% s'il était effectué en 50 répétitions de 20 mètres, et de 160% s'il était couru en 100 répétitions de 10 mètres. *Accroître le nombre d'accélération et de décélération pour parcourir une même distance totale, conduit à une augmentation significative de la dépense énergétique.*

2.4 - MECANISMES ENERGETIQUES AU COURS DES EXERCICES INTERMITTENTS

La contribution énergétique au cours des exercices intermittents peut-être illustrée par la figure 14 (Essén, 1978a). Comme nous avons étudié précédemment la contribution du système aérobie et la part que pouvait prendre la MbO₂, nous n'aborderons que la part relative à l'ATP, la PC et la glycolyse. Nous ferons également une synthèse sur l'activité enzymatique aérobie et anaérobie et sur l'utilisation des hydrates de carbone (HC) et des acides gras (AG) lors des exercices intermittents.

Figure 14. - Contribution énergétique au cours d'un exercice intermittent de type 15s-15s, en litre (L) d'oxygène (Essén et coll, 1978).



2.4.1 - ADÉNOSINE TRIPHOSPHATE (ATP) ET PHOSPHOCREATINE (PC)

Les adaptations physiologiques périphériques à l'exercice sont en rapport avec une augmentation de la capacité musculaire à utiliser et à resynthétiser les molécules d'ATP et de PC (Poortmans, 2009).

Lorsqu'il s'agit de formes particulières d'exercices intermittents, comme les sprints répétés (efforts ≤ 10 s alternés avec des récupérations de 60 à 300 s), la capacité à répéter ces efforts et maintenir un niveau de puissance élevé est corrélée ($r=0,84$; $p<0,05$) au taux de

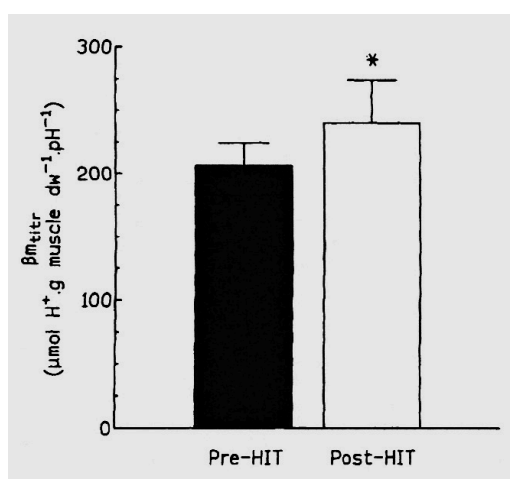
resynthèse de PC (McCartney et coll, 1986 ; Bogdanis et coll, 1995 et 1996a) et au niveau des réserves de PC (Hargreaves et coll, 1998). Lors de ce type d'exercice (exemple: 10x 6s-30s), les efforts sont réalisés le plus vite possible, la concentration en PC passe de 57% après le 1^{er} effort, à 16% après le dernier (des réserves initiales) (Gaitanos et coll, 1993). Dawson et coll (1997) ont confirmé ces résultats dans un protocole où l'enchaînement d'effort de 6 s se faisait avec une récupération de 24 secondes. Ils ont montré qu'au bout de 3 min de récupération après le dernier effort, la réplétion du stock de PC était de 84%. Ces résultats montrent que la resynthèse de PC n'est pas complète après seulement 30 s de récupération, dans le cas où les efforts sont réalisés à des vitesses bien supérieures à la VMA. La cinétique de resynthèse de PC, après un exercice ayant conduit à une forte déplétion du stock initial (jusqu'à 90% des réserves initiales), a une composante lente et une composante rapide qui sont décrites par une double exponentielle, le demi temps de resynthèse est compris entre 21 et 57 secondes (Harris et coll, 1976 ; Bogdanis et coll, 1995 ; Jones et coll, 2007). Jones et coll, (2007) ont d'ailleurs montré que la phase lente était réduite consécutivement à un programme d'entraînement intermittent, à des intensités comprises entre 100% et 125% de la PMA. Lorsque la récupération est suffisante, lors des exercices intermittents courus à des vitesses inférieures ou égales à la VMA, le stock de PC est reconstitué entièrement pendant la récupération (Fox et Mathews, 1981). Les exercices intermittents courts, du type 5s-15s (Assadi et Cometti, 2007), courus à des vitesses correspondants à 110% de $\dot{V}O_{2\max}$, pourraient se voir limiter par une diminution du stock de PC au cours des répétitions. Lors d'un exercice intermittent, 15s-15s réalisé à $\dot{V}O_{2\max}$, il a été montré qu'il y avait d'importantes variations de PC entre la fin de l'effort et la fin de la récupération (Essèn et coll, 1977). Lors de cette étude, les concentrations de PC variaient de 40% des réserves de repos à la fin des efforts à 70% des réserves de repos à la fin des récupérations.

Au cours d'un exercice intermittent, la resynthèse de PC lors de la récupération, se fait grâce au système aérobie, d'ailleurs sans apport d'oxygène cette resynthèse n'est pas possible (Yoshida et Watari, 1997 ; Colliander et coll, 1988). Pour Tomlin et Wenger (2001), il existe d'ailleurs un lien direct entre le niveau d'aptitude aérobie des sujets et leur capacité à resynthétiser la PC lors de la récupération.

La réplétion des réserves d'ATP est également assurée, et cela dès les premières secondes de l'exercice par la glycolyse et glycogénolyse (Spencer et coll, 2005), conduisant à une production de lactate et une accumulation intracellulaire d'ions hydrogène (H^+). La concentration de lactate peut ainsi varier de 1,5 mmol.l⁻¹ au repos à une valeur de 45mmol.l⁻¹ à

l'effort ; ce qui a pour conséquence une diminution du pH musculaire d'une valeur moyenne de 7,09 au repos à une valeur moyenne minimale de 6,4 (Péronnet et Aguilaniu, 2005). Cette accumulation d'ions H^+ pourrait être une cause de la fatigue musculaire lors des exercices intermittents (Hargreaves et coll, 1998 ; Spriet et coll, 1989). La capacité du muscle à tamponner la production d'ions H^+ permet de retarder la fatigue musculaire (Sharp et coll, 1986 ; Bell et Wenger, 1988). Cette capacité tampon des ions bicarbonate (HCO_3^-) permet de supprimer 20 à 25% des ions H^+ (Hultman et Sahlin, 1980). L'entraînement intermittent (6 sessions, de 8x 5min-1min, à 80% de $\dot{V}O_{2max}$) contribuait de façon significative à une augmentation de la capacité tampon du muscle (figure 15), qui est elle-même corrélée à une amélioration des performances (Weston et coll, 1997). Dans cette étude, l'augmentation de 16% du pouvoir tampon du muscle, sans amélioration de l'activité enzymatique (aérobie et anaérobie), était observée dans un groupe de sujets très entraînés et de niveau homogène, ce qui confère un caractère particulièrement pertinent à ces résultats, même si pour les auteurs ils restent insuffisants pour établir une relation de cause à effet entre l'amélioration des performances et le fait que le travail intermittent permette d'accroître le pouvoir tampon du muscle.

Figure 15. - Pouvoir tampon du muscle avant et après un entraînement intermittent. * = $P < 0,05$, (Weston et coll, 1997).



La réduction du pH, comme facteur expliquant la fatigue musculaire, est cependant controversée (Bangsbo, 1994). Des études ont montré que la réduction du pH, autour de 6,6, était négligeable sur l'activité enzymatique (PFK) et que cela ne réduisait pas la glycolyse (Dobson et coll, 1986 ; Spriet et coll 1987). Bangsbo et Johansen (Bangsbo, 1994) ont montré

que lors d'un effort intermittent (30s-1min à 31% de la force maximale volontaire), l'utilisation de la PC augmentait progressivement et les réserves de PC diminuaient.

L'accumulation de lactate dépend de la durée des périodes de récupération. Par exemple elle varie de 8,9 mmol.l⁻¹ à 2,6 mmol.l⁻¹ au cours respectivement d'un exercice 15s-15s versus 15s-30s réalisés à la même vitesse (Christensen et coll, 1960). Elle est aussi dépendante de la durée de l'effort, même si le ratio temps d'effort/temps de récupération reste de 1 pour 2 (Saltin et Essén, 1971b). Si les exercices intermittents du type 10s-20s et 20s-40s n'engendrent qu'une faible augmentation de quantité de lactate accumulé en fin d'exercice, ceux du type 30s-60s et 60s-120s provoquent une augmentation beaucoup plus grande (Bangsbo, 1994). Cette augmentation est aussi dépendante de la vitesse de course, ainsi le fait de passer d'une vitesse de course de 100% de VMA à 110% de VMA, lors d'un exercice intermittent 30s-30s, chez de jeunes adolescents entraînés, conduit à une réduction du temps de travail et une augmentation de la [La] (Thévenet et coll, 2007).

D'une manière plus générale, certains auteurs ont montré qu'il existait un lien entre le niveau d'aptitude aérobie des sujets ($\dot{V}O_{2max}$ et endurance) et la capacité qu'ils ont à éliminer rapidement le lactate lors des efforts intermittents (Tomlin et Wenger, 2001).

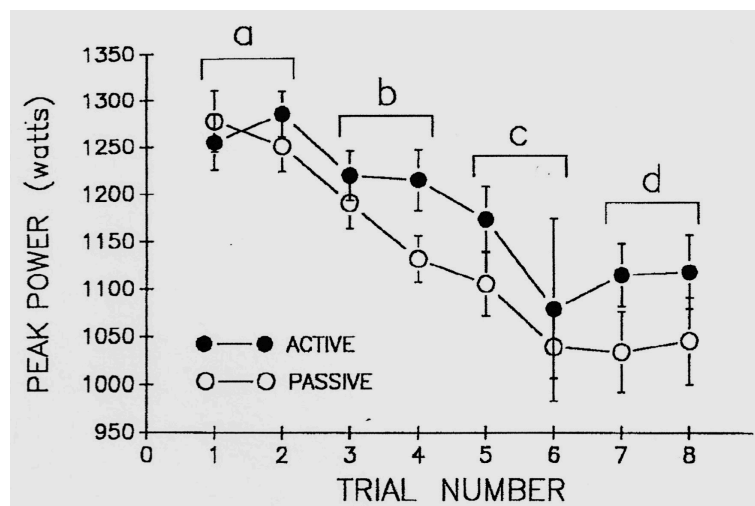
2.4.2 - INFLUENCE DE LA RECUPERATION ACTIVE OU PASSIVE SUR LA VITESSE D'ELIMINATION DU LACTATE LORS D'UN EXERCICE INTERMITTENT

Il est établi qu'après un exercice continu, ayant provoqué une augmentation du lactate sanguin, une récupération active permet d'augmenter la cinétique d'élimination du lactate par rapport à une récupération passive (Newsholm, 1986). La cinétique de disparition du lactate sanguin serait plus rapide pour un exercice de récupération dont l'intensité se situe entre 28% et 68% du $\dot{V}O_{2max}$ (Belcastro et Bonen, 1975 ; Boileau et coll, 1983 ; Bonen et Belcastro, 1976 ; Gisolfi et coll, 1966 ; Hermansen et Stensvold, 1972). Il a également été observé dans cette étude que les coureurs avaient adopté spontanément l'intensité de course appropriée à une récupération optimale (Belcastro et Bonen, 1975).

En ce qui concerne les exercices intermittents, il semble bien que la récupération active facilite l'élimination du lactate lorsque l'intensité de l'effort dépasse la vitesse au seuil lactique (Laursen et Jenkins, 2001 ; Toubekis et coll, 2005). Même lorsque les efforts sont relativement courts (Intermittent: 6s-30s), une contribution de plus en plus importante de la glycolyse est observée au cours des répétitions ; dans ce cas, la récupération active augmente

considérablement la capacité des sujets à produire un niveau d'intensité et un travail plus élevé, que lorsqu'ils effectuaient une récupération passive (Signorile et coll, 1993). Ces auteurs montrent également que l'effet de la récupération active était d'autant plus efficace que le nombre de répétitions était important (Figure 16). Pour Dorado et coll (2004), la récupération active permettrait aussi de réduire la part de la glycolyse dans la production d'énergie en augmentant la part du processus aérobie. La récupération active aurait pour effet, d'accélérer la cinétique de VO_2 au début de l'effort (Balsom et coll, 1994 ; Gerbino et coll, 1996), et de réguler l'action des enzymes oxydatifs maintenant l'activité aérobie à un niveau élevé (Bangsbo et coll, 1994 ; Saltin et coll, 1992). Globalement, la capacité de récupération, et en particulier l'élimination du lactate et la réduction des ions H^+ , semble être en rapport avec l'aptitude aérobie des sujets (Tomlin et Wenger, 2001). Pour ces auteurs, la part dans la fourniture d'énergie du processus aérobie, lors des exercices intermittents courts, serait significativement augmentée par rapport à la part des processus anaérobies, pour les sujets ayant une capacité aérobie élevée.

Figure 16. - Comparaison de l'effet de la récupération active vs passive sur la puissance maximale au cours de 8 répétitions d'un exercice intermittent 6s-30s (Signorile et coll, 1993).



Le fait que le niveau de travail soit plus élevé lors des exercices intermittents avec une récupération active versus passive a aussi été expliqué par une resynthèse plus rapide de PC au cours de la récupération. Ceci serait dû à une accélération de la resynthèse dans les fibres de types II plutôt que dans celles de type I (Yoshida et coll, 1996), mais ce mécanisme n'est pas clairement élucidé aujourd'hui. D'ailleurs Toubekis et coll (2005) ont montré que si la récupération active était en relation avec une diminution de la $[\text{La}]$, la performance réalisée

lors d'une épreuve standard qui suivait l'exercice intermittent, était significativement plus basse que lorsque la récupération était passive. Si les mécanismes, suivant lesquels la récupération active améliorerait la capacité de travail ne sont pas clairement connus, il semblerait que ce type de récupération permette d'accélérer l'élimination du lactate et des ions H^+ (Signorile et coll, 1993), ainsi que le retour à une valeur de pH proche de celle du repos (Sairyo et coll 2003). La récupération active permettrait un flux sanguin plus important améliorant ainsi l'oxygénation des cellules et la resynthèse de PC (Bangsbo et coll, 1994). La récupération aurait aussi un rôle de stimulateur sur le fonctionnement de la pompe sodium-potassium ($Na^+-K^+ ATP_{ase}$), ce qui aurait pour conséquence un retour plus rapide à un équilibre entre la concentration des ions potassiums (K^+) et des ions sodiums (Na^+) entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule, permettant ainsi une meilleure propagation des influx le long des fibres musculaires (Sjogaard, 1990 ; Bangsbo et coll 1992 ; Saltin et coll, 1992).

La récupération active semble avoir un effet globalement positif sur le maintien du niveau d'activité lors des exercices intermittents (Dorado et coll, 2004), cependant cet effet est à nuancer si la récupération est courte (≤ 30 s). Dupont et coll (2003) ont montré que lors d'un exercice intermittent, de type 15s-15s couru à 120% de VMA, la récupération active (à 50% de VMA) engendrait une diminution du temps d'effort et du niveau de performance par rapport à la récupération passive. La réduction du tlim d'effort lors des exercices intermittents, suite à une récupération active versus passive, est d'ailleurs un fait souvent observé par les expérimentateurs (Dupont et coll, 2003 ; Thévenet et coll, 2007b) ; si l'intensité de la récupération est trop élevée cela semble également affecter le tlim (Thevenet et coll, 2008). Pour Dorado et coll (2004), la récupération active ne doit d'ailleurs pas dépasser une intensité supérieure à 20% de la $\dot{V}O_{2max}$, ce qui semble en contradiction avec les propositions de Billat et coll (2000b) qui suggéraient que l'intensité de la récupération lors des exercices intermittents devrait être égale à 50% de la $\dot{V}O_{2max}$.

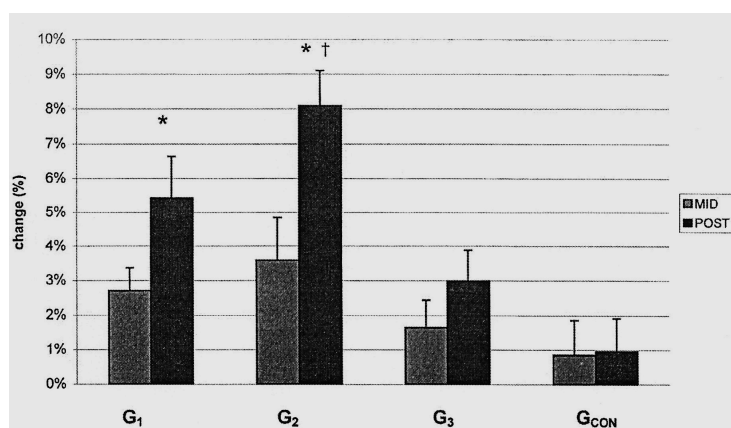
Finalement pour Casas (2008), le choix d'une récupération active ou passive devrait se faire en fonction du niveau de performance et d'entraînement de l'athlète considéré. Il a été suggéré que l'entraîneur pourrait utiliser la baisse du nombre de pulsations cardiaques durant les 30 secondes de récupération d'un exercice intermittent 30s-30s pour conseiller aux athlètes une récupération passive ou active (Assadi et Cometti, 2007). Ainsi, si la différence entre la F_C à la fin de l'effort et celle à la fin de la récupération est inférieure à 15 bpm, la récupération passive serait conseillée ; si elle est supérieure à 15 bpm alors la récupération active serait préconisée. Cette proposition s'appuie sur le fait qu'une diminution de la F_C est en relation

avec une diminution de la consommation d'oxygène et donc une intensité globale de l'exercice diminuée (Karlson et coll, 1978).

Il a été montré que si l'exercice intermittent (30s-30s couru à 110% de VMA et récupération à 50% de VMA) était réalisé en plusieurs séries (n fois 6 min entrecoupées de 4 min de récupération active) plutôt qu'en une seule série, la [La] avait tendance à redescendre entre chaque série, ce qui était corrélé ($r=0,76$; $P<0,05$) à un tlim plus grand (Tardieu-Berger, 2004). Dans ce sens Millet et coll (2003a) ont proposé que les séries de 30s-30s soient d'une durée de 8 min.

Plus globalement encore, Laursen et coll (2002) ont montré, dans un programme d'entraînement pour des cyclistes, que l'amélioration des performances et de la $\dot{V}O_{2max}$ étaient plus importantes dans le groupe qui réalisait les exercices intermittents aérobie avec des récupérations actives, par rapport aux deux autres groupes qui réalisaient des récupérations passives (figure 17).

Figure 17. - Evolution de la VO_{2max} après 4 semaines pour 4 modalités d'entraînement différentes. Pour G1 et G2, les sujets réalisent 8 efforts dont la durée est calibrée à 60% du tlim continu, l'intensité correspond à la PMA, la récupération est de même durée, mais passive pour G1 et active pour G2. Pour G3, il s'agit de réaliser 12 efforts de 30 s à une intensité correspondant à 175% de PMA, la récupération passive est de 4,5 min. G1, G2, G3 effectuent la session de travail intermittent deux fois par semaine et complètent leur entraînement par un travail continu traditionnel pour atteindre le kilométrage habituellement réalisé. G4 effectue le travail continu habituel. (Laursen et coll, 2002)



2.4.3 - MODIFICATION DE L'ACTIVITE ENZYMATIQUE AEROBIE ET ANAEROBIE SUITE A L'ENTRAINEMENT INTERMITTENT

Les activités enzymatiques oxydatives et de la glycolyse sont des indicateurs de la vitesse à laquelle les molécules de glucose sont dégradées pour fournir des molécules d'ATP (Poortmans, 2009). Une augmentation de cette activité peut donc contribuer à augmenter le débit d'énergie par unité de temps, fourni par les différents processus énergétiques. L'entraînement avec des exercices intermittents, concourt à l'augmentation de l'activité enzymatique aérobie et anaérobie (3-Hydroxyacyl-CoA déshydrogénase : HADH, Oxoglutarate déshydrogénase : OGDH, Citrate synthase : CS, Créatine kinase : CK, Phosphofructo kinase : PFK, lactate déshydrogénase : LDH) (Simoneau et coll, 1987 ; Gairanos et coll, 1993 ; Rodas et coll, 2000). Cependant, le fait que cette activité enzymatique puisse être augmentée par l'entraînement intermittent, a des limites. Costill et coll (1988) ont d'ailleurs montré que le fait de doubler le volume d'entraînement intermittent, chez une population de sportifs déjà entraînés, n'avait pas d'effet sur la capacité des enzymes oxydatifs du muscle. Ces résultats sont aussi en accord avec ceux mis en évidence par Sjodin et coll (1982), qui n'observaient pas de changement dans l'activité de la CS, avec une population comparable. Il en est de même avec l'augmentation de l'activité des enzymes de la glycolyse, qui ne s'améliore pas, alors que la performance progresse significativement, dans un groupe de sportifs très entraînés (Weston et coll, 1997). L'amélioration de l'activité enzymatique semble donc être en rapport avec le statut (entraînés vs non entraînés) des sujets. Le temps de récupération, qui suit les séances de travail intermittent, pourrait également avoir un effet significatif sur le fait d'observer des améliorations, ou pas, de l'activité enzymatique (Parra et coll, 2000). Si le temps de récupération est allongé, période de repos et arrêt de l'entraînement, alors l'activité des enzymes de la glycolyse (PFK et LDH) ne décroît pas alors que celle des enzymes oxydatifs (HADH et OGDH) baisse de façon importante (Simoneau et coll, 1987). La continuité de l'entraînement intermittent reste donc un facteur important dans le maintien des performances, ce qui ne diffère pas de l'entraînement continu. Dans une revue de questions sur les adaptations qui font suite au travail intermittent, Laursen et Jenkins (2001) suggéraient que l'amélioration du pouvoir tampon du muscle, est sûrement une des causes essentielles de l'amélioration de performance chez des sportifs très entraînés qui pratiquent ce type d'entraînement.

Quand la durée d'entraînement est suffisamment longue et intensive, des adaptations importantes ont toutefois été observées au niveau enzymatique, à la fois au niveau des fibres lentes et rapides (Gjovaag et Dahl, 2008). Après un entraînement à base d'exercices intermittents courts (8 à 12x 15s-45s pendant 14 jours à raison d'une séance par jour), il a été montré une augmentation significative de l'activité enzymatique musculaire, et ceci à la fois pour les processus aérobie et anaérobie (créatine kinase +44% ; Phosphofructo kinase +106% ; lactate déshydrogénase +60% ; Citrate synthase +38%) (Rodas et coll, 2000).

2.4.4 - UTILISATION DU GLUCOSE ET DES ACIDES GRAS LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS

L'oxydation des acides gras, chez le rat est plus importante lors des exercices intermittents que lors des exercices continus (Chilibeck et coll, 1998). Christmass et coll (1999a) ont confirmé ces résultats chez l'homme en montrant que lors de la comparaison d'un exercice intermittent et continu, dont la dépense énergétique totale était identique, que l'oxydation des acides gras était 3 fois moins importante, et l'oxydation des hydrates de carbones 1,2 fois plus grandes lors de l'exercice intermittent versus l'exercice continu. Il semblerait que l'entraînement, constitué d'exercices intermittents (8x 5min-60s à $86 \pm 2\%$ VO_{2max}), tout en maintenant un niveau élevé d'oxydation du glycogène ($340 \mu\text{mol.kg}^{-1}$), contribue à augmenter l'oxydation des acides gras (de $6 \pm 8 \mu\text{mol.kg}^{-1}$ lors du 1^{er} effort à $25 \pm 3 \mu\text{mol.kg}^{-1}$ lors du 7^{ème} effort) (Stepto et coll, 2001). Les travaux de Essèn et coll (1978a et 1978b) n'ont montré aucune différence dans l'utilisation des acides gras (AG) et du glucose (GLU), entre un exercice intermittent (15s-15s à 300W) et continu (60 min à 157W), cependant pour cet auteur la déplétion du stock de glycogène au cours d'exercices intermittents (15s-15s pendant 1 heure) serait la cause majeur de la fatigue. Cette déplétion serait plus marquée dans les fibres le plus souvent utilisées. Ceci aurait pour conséquence de réduire probablement le nombre de fibres pouvant être recruté pour compenser la diminution de la force musculaire, et conduirait à une baisse des tensions musculaires pouvant être soutenues lors des exercices intermittents (Bangsbo, 1985). Pour Hargreaves et coll (1998), la réduction de l'intensité de travail, dans des exercices intermittents courts, ne serait pas liée à la baisse du glycogène musculaire, mais à la réduction de la disponibilité de PC, à l'augmentation des ions H^+ et à la baisse des fonctions du réticulum sarcoplasmique (en particulier la libération des ions Ca^{2+}). Fosskett et coll (2007) ont également montré que l'endurance dans les exercices intermittents, n'était pas seulement due au niveau du stock de

glycogène musculaire, mais surtout au fait que la concentration de glucose plasmatique soit importante (ingestion d'une solution liquide contenant des hydrates de carbone) et disponible pour le système nerveux central (SNC). Ces auteurs avaient également fait l'observation que l'arrêt de l'activité n'était pas due à une baisse des réserves de PC, ni à une augmentation de la de la lactatémie, minimisant le rôle de ces facteurs sur la fatigue lors des exercices intermittents.

Christmass et coll (1999b) ont comparé deux exercices intermittents, 6s-9s (IE1) vs 24s-36s (IE2), réalisés pendant 40 min à respectivement une intensité de 71% et de 64% de $\dot{V}O_{2max}$. Ils ont montré que pour une même dépense d'énergie totale, l'oxydation des AG était 3 fois moins importante et l'oxydation des hydrates de carbone (HC) 1,3 fois plus importante, lors de IE1 vs IE2.

En résumé, les résultats actuels montrent qu'il n'y a pas un consensus sur la part respective des HC ou des AG oxydés au cours des exercices intermittents et continus, et entre les exercices intermittents eux-mêmes. Il n'est pas encore possible de relier d'une façon précise l'intensité et la forme des exercices avec la part respective de HC et AG utilisés. La relation entre réserve de glycogène musculaire et la fatigue lors des exercices intermittents n'est pas non plus clairement élucidée et les avis divergent. Cependant, la prise d'une boisson enrichie en glucose avant et pendant l'exercice semble avoir des effets importants sur l'endurance lors des efforts intermittents (Foskett et coll, 2007).

2.4.5 - PART RELATIVE DES PROCESSUS ANAEROBIE ET AEROBIE LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS

Si la vitesse de déplacement correspond à des intensités inférieures ou égales à la VO_{2max} , alors la part aérobie de l'exercice serait plus importante et ceci dès les premières répétitions (Christensen et coll, 1960). Inversement plus la vitesse de course est supérieure à cette intensité et plus la part anaérobie lactique devient importante (Bisciotti, 2000).

A des vitesses proches de $v \dot{V}O_{2max}$, la part de chacun des processus dépend alors du temps d'effort (Astrand et coll, 1960a). Il semble bien que dès que le temps d'effort s'allonge au delà de 15 secondes de course, la part de la glycolyse dans la resynthèse d'ATP, augmente considérablement, et ceci bien que le temps de récupération s'allonge d'autant (Astrand et coll, 1978 ; Buccheit et coll, 2008). Si la part de la glycolyse s'accroît avec l'augmentation du temps d'effort, allonger le temps d'effort conduit également à augmenter la sollicitation du

système aérobie, en pourcentage du temps passé à plus de 90% de $\dot{V}O_{2\max}$ (Millet et coll, 2003a). Une augmentation jusqu'à 3 min (exercice intermittent 3min-3min) contribue à obtenir une sollicitation la plus importante possible du système aérobie, mais une augmentation de la contribution de la glycolyse en est le corolaire (Vuorimi et coll, 2000).

La réduction du temps de récupération conduit également à une augmentation de la sollicitation du système aérobie (Karlson et coll, 1978). Si cette diminution est trop importante (en dessous de 30 s), la part aérobie diminue au détriment de la part anaérobie, conséquence probable de la reconstitution partielle des réserves de MbO₂ (Astrand et coll, 1992 ; Richardson et coll, 1995). En réduisant la récupération en dessous de 30 s, le temps total d'effort s'en trouve également réduit (Dupont et coll, 2003).

Une récupération active peut conduire également à augmenter la sollicitation aérobie et à diminuer la part de la glycolyse au cours des exercices intermittents (Saltin et coll 1993; Balsom et coll, 1994 ; Gerbino et coll, 1996 ; Dorado et coll, 2004). Cependant, si la récupération est réalisée à une intensité trop importante, la part de la glycolyse augmente à nouveau et le temps d'effort en est réduit (Thévenet et coll, 2008). Sur le modèle de Billat et coll (2000b), beaucoup d'auteurs suggèrent une récupération active à une vitesse correspondant à 50% de la $v\dot{V}O_{2\max}$, ce qui paraît toutefois élevé pour certains auteurs qui suggèrent qu'au dessus de 20% de la $v\dot{V}O_{2\max}$ la vitesse de récupération aura pour conséquence une augmentation trop importante de la glycolyse (Dorado et coll, 2004). Il existe une vraie controverse sur l'utilité de la récupération active versus passive. Il est souvent constaté que la récupération active a pour effet de réduire le temps total de travail, sans pour cela que le $\tau_{90\%}\dot{V}O_{2\max}$ soit plus important (Dupont et coll, 2003 ; Dupont et Berthoin, 2004 ; Thévenet et coll, 2007). Pour retrouver un temps total de travail qui soit comparable aux exercices intermittents avec récupération passive, il faut alors introduire des récupérations plus longues (4 min) toutes les 6 à 8 répétitions d'exercices intermittents avec récupération active (Tardieu-Berger et coll, 2004 ; Millet et coll, 2003).

2.4.6 - RESUME

Les exercices intermittents permettent à la fois une amélioration de la capacité aérobie et anaérobie, et concourent à une amélioration des performances sportives (Laursen et coll, 2005). Pour Gaitanos et coll (1993), la production d'ATP lors des premières répétitions d'exercices intermittents courts (6s-10s), courus à des vitesses supérieures à la $v\dot{V}O_{2\max}$, provient à part égale de la dégradation de PC et de la glycolyse. Il y a cependant un accroissement de la part du métabolisme aérobie au fur et à mesure que ces répétitions se succèdent.

Finalement la forme, couramment utilisée dans le cadre de l'entraînement et étudiée sur le plan scientifique (Billat et coll, 2000b ; Billat, 2001a), d'exercices intermittents de type 30s-30s, courus à des vitesses proches de $v\dot{V}O_{2\max}$ avec des récupérations actives ou passives, pourrait constituer une sorte de "prototype" des exercices intermittents (Gacon, 1993). "Prototype", car le rapport entre les temps d'effort et les temps de récupération permettrait de solliciter une charge aérobie plus importante que les autres formes et ceci quelque soit le niveau des athlètes.

2.5 - APPROCHE COMPARATIVE DES EXERCICES INTERMITTENTS ET CONTINUS

Initiée dès le début des années 70, par Fox et Mathews (1981), la comparaison des effets des exercices intermittents et continus n'a jamais cessé d'alimenter la recherche scientifique dans le domaine de la physiologie de l'exercice musculaire. Deux types d'études peuvent être distinguées : celles qui comparent les effets physiologiques aigus entre ces deux modalités d'exercices et celles qui étudient les effets "chroniques" consécutifs à un programme d'entraînement.

2.5.1 - EFFETS PHYSIOLOGIQUES AIGUS : COMPARAISON INTERMITTENT VS CONTINU

2.5.1.1 - SOLLICITATION D'UN FORT POURCENTAGE DE $\dot{V}O_{2\max}$

Quand il s'agit de solliciter un très fort pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$ les exercices intermittents sont plus adaptés, car ils permettent de maintenir des durées d'effort plus longues que lors des efforts continus.

Billat et coll (2000b) ont montré que le temps passé à $\dot{V}O_{2\max}$ est significativement plus grand (471 ± 398 s vs 162 ± 189 s) lors d'un exercice intermittent, couru jusqu'à l'épuisement (tlim 30s-30s couru à $v \dot{V}O_{2\max}$ et récupération active à 50% de $v \dot{V}O_{2\max}$), qu'après un exercice tlim en continu (vitesse correspondant à la vitesse au seuil lactique (v_{LT}) + 50% de l'écart de vitesse entre v_{LT} et $v \dot{V}O_{2\max}$). En pourcentage du tlim, le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ est également plus grand lors de l'intermittent comparé au continu ($83 \pm 45\%$ vs $63 \pm 10\%$). Il a été confirmé que le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ était significativement plus long lors d'un exercice intermittent de type 15s-15s (réalisé à 110% ou 120% de $v \dot{V}O_{2\max}$) comparé à un exercice continu réalisé à 100% de $v \dot{V}O_{2\max}$ (Dupont et coll, 2002). Zafeiridis et coll (2010) ont montré dans un groupe d'enfants ($14 \text{ ans} \pm 0,6 \text{ ans}$) que, lors de la comparaison de trois modalités d'exercice [intermittent long (LI), 3 min-3min à 95% de VMA et récupération à 35% de VMA ; Intermittent court (CI), 30s-30s à 110% de VMA et récupération à 50% de VMA ; Continu intense (HC), 83% de VMA], le $T95\% \dot{V}O_{2\max}$ et le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ étaient significativement

plus longs dans la modalité LI par rapport à HC et CI. Par contre, le $T85\% \dot{V}O_{2max}$ et le $T80\% \dot{V}O_{2max}$ étaient significativement plus longs au cours des modalités HC et LI par rapport à CI. Le tlim et la distance parcourue étaient plus longs lors des modalités LI et HC comparées à CI. La modalité LI apparaît être la plus adaptée pour solliciter le système aérobie de façon importante et maximale en comparaison des deux autres modalités. Les modalités HC et LI semblaient les plus adaptées si le but est de maintenir un temps de travail le plus long possible.

2.5.1.2 - LACTATEMIE AU COURS DE L'EXERCICE INTERMITTENT VS CONTINU

La concentration de lactate en fin d'exercice, est plus importante pour un exercice intermittent (30s-30s à $\dot{V}O_{2max}$) que pour un exercice continu (50% de $\dot{V}O_{2max}$), pour un même travail total (Edwards et coll, 1973). Pour des intensités d'effort similaires, Essén et coll (1978b) ont montré qu'un exercice continu à $\dot{V}O_{2max}$, ne pouvait être soutenu que pendant quelques minutes seulement alors qu'un exercice intermittent, pouvait être soutenu pendant 1 heure à la même intensité. Cette comparaison a montré que [La] était plus importante après le continu versus l'intermittent. Il a également été montré que la diminution du stock de glycogène et l'accumulation de [La] étaient moindres à la suite d'un exercice intermittent (15s-15s) comparé à un exercice continu de même intensité ($\dot{V}O_{2max}$) (Essén, 1978a). A intensité identique, l'accumulation de lactate est moins importante lors des exercices intermittents comparativement aux exercices continus (Gorsotiaga et coll, 1991 ; Gharbi et coll, 2008 ; Casas, 2008).

2.5.2 - EFFETS D'UN PROGRAMME D'ENTRAÎNEMENT CONSTITUE D'EXERCICES INTERMITTENTS VS CONTINUS

2.5.2.1 - AMELIORATION DE LA VMA

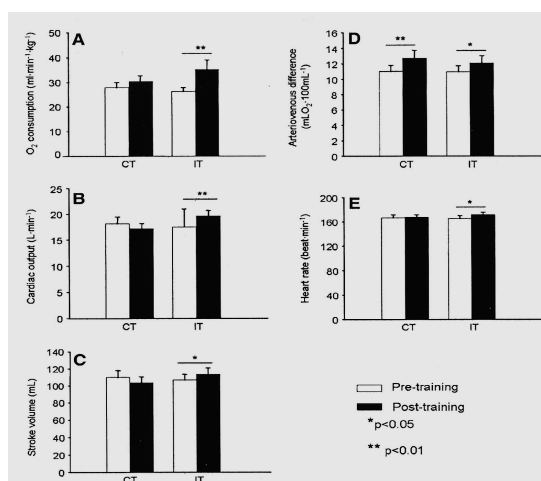
Il a été montré qu'à volume identique, un programme d'entraînement intermittent (100 à 120% de VMA) a permis une augmentation significative (+5%) de la VMA, par rapport à un programme d'entraînement continu (80 à 90% de VMA) (Berthoin et coll, 1995). Par

contre, Tuimil et coll (2011), ont montré que l'amélioration de la VMA n'était pas plus élevée après un entraînement de 8 semaines (à raison de 3 séances par semaine), intermittent ou continu. La charge de travail totale était équivalente entre les deux programmes. L'entraînement intermittent était constituée de 3 séances répétées tout au long des 8 semaines, la première séance était constituée d'exercices intermittents 2min-2min (à 100% de VMA récupération 50% de VMA), la seconde de 3min-3min (à 95% de VMA récupération à 45% de VMA) et la troisième de 4min-4min (à 90% de VMA récupération à 40% de VMA). L'entraînement continu était constitué de 3 séances à des intensités respectives de 75, 70 et 65% de VMA. A la fin de la période d'entraînement, les auteurs n'ont enregistré aucune amélioration du tlim à 100% de VMA.

2.5.2.2 - AMELIORATION DE LA $\dot{V}O_{2max}$ ET DE LA CAPACITE AEROBIE

Daussin et coll (2007), ont montré qu'à la suite d'un entraînement (24 séances en 8 semaines), intermittent ou continu, la différence artério-veineuse en oxygène ($D_{a-v}O_{2max}$) s'était améliorée de façon significative ($P<0,05$). Alors que l'amélioration de la $\dot{V}O_{2max}$ et celle du débit cardiaque maximal (Q_{max}) n'ont été effectives qu'après l'entraînement intermittent. Ces auteurs ont conclu que la composante centrale et périphérique de la consommation d'oxygène s'était surtout améliorée à la suite des exercices intermittents, alors que l'entraînement continu conduisait à une meilleure désaturation du sang en O_2 (Figure 18).

Figure 18. - Comparaison des effets de l'entraînement, intermittent vs continu, sur : VO_{2max} (A) ; Q_{max} (B) ; Volume d'éjection systolique (C) ; $D_{a-v}O_{2max}$ (D); Fc (E).



Franck et coll (1998) ont montré que le travail continu (CONT), en comparaison du travail intermittent long (LIT, 6x4min-2min) ou court (SIT, 40x15s-15s) avait permis une plus grande amélioration (+94% en CONT vs +67% LIT et +65% SIT) de la performance spécifique en endurance (tlim à 87% de $\dot{V}O_{2max}$). Les adaptations physiologiques étaient plus importantes suite au LIT et au CONT en comparaison du SIT ($\dot{V}O_{2max}$ +6% vs +3,6% ; coût énergétique +3% vs 0,9%). Il a aussi été montré que l'exercice intermittent de type 30s-30s à 100% v $\dot{V}O_{2max}$ permettait une augmentation de $\dot{V}O_{2max}$ (+9 à 11%) plus importante que l'exercice continu à 70% de v $\dot{V}O_{2max}$ (+5 à 7%), alors que ce dernier conduisait à une réduction du taux de lactate et une augmentation de la capacité oxydative du muscle (activité accrue de la citrate synthase) évaluées lors d'un test continu de référence (Gorostiaga et coll, 1991). Lors de cette étude, l'intensité moyenne maintenue tout au long de l'entraînement (30 min/j, 3j/s pendant 12 semaines) était de 70% de $\dot{V}O_{2max}$, pour les deux formes d'exercices.

Poole et Gaesser (1985) ont montré que l'amélioration du seuil ventilatoire était plus importante à la suite d'un entraînement (8 semaines, 3 jours/semaines) intermittent (10x 2min-2min à 105% de $\dot{V}O_{2max}$) plutôt que continu (groupe 1 : 1h55 min à 50% de $\dot{V}O_{2max}$; groupe 2 : 35 min à 70% de $\dot{V}O_{2max}$). Les améliorations du seuil lactique et de la $\dot{V}O_{2max}$ étaient similaires dans les deux groupes.

Mc Kay et Coll (2009) ont comparé, suite à un entraînement (8 séances en 3 semaines) intermittent (8 à 12x 1min-1min à 120% de v $\dot{V}O_{2max}$) et continu (90 à 120 min à 65% de $\dot{V}O_{2max}$), la cinétique de $\dot{V}O_{2max}$ et la désaturation du sang en O₂. Le temps pour atteindre un plateau de VO₂ était considérablement réduit (40%) après les deux modalités d'entraînement. Il y avait une meilleure adaptation locale du flux sanguin et de l'apport en O₂ sans qu'il y ait une meilleure extraction de l'O₂. Pour un volume d'entraînement moins important (représentant au total 1800 kJ), l'entraînement intermittent a permis d'obtenir des adaptations au niveau de la cinétique de VO₂, comparables à celle d'un entraînement continu beaucoup plus volumineux (représentant au total 8500 kJ).

Gjovaag et Dahl (2008) ont montré que l'entraînement continu améliorait l'activité de la SDH dans les fibres lentes (I) et rapides (II) et que cette amélioration était plus importante à la suite

d'un entraînement intermittent. L'activité de α -GPDH était également plus importante dans les fibres de type I et de type II, suite à l'entraînement intermittent versus continu. Les auteurs montraient également que ces améliorations n'étaient pas sensibles à l'augmentation du volume d'entraînement. Donc si l'intensité est suffisante, l'activité enzymatique aérobie et anaérobie semble être améliorée dans les deux types de fibres et de façon plus importante suite à l'entraînement intermittent.

Si les effets, suite à la comparaison des deux méthodes d'entraînement, varient d'une étude à l'autre, c'est que les méthodologies appliquées sont souvent très différentes. Globalement, il ressort que les effets adaptatifs liés au processus oxydatif (augmentation de la $\dot{V}O_{2\max}$, du seuil ventilatoire, des enzymes oxydatifs) suite au travail intermittent sont souvent plus importants que ceux observés suite au travail continu.

2.5.2.3 - AMELIORATION DES CAPACITES ANAEROBIES

Gharbi et coll (2008) ont montré que la lactatémie, et le temps mis pour atteindre le pic de lactatémie (lors d'un exercice maximal de 30 s, suivi de 30 min de récupération pour étudier la cinétique de [La]) étaient similaires suite à un entraînement intermittent (2min-1min de 90% à 100% de VMA pendant 35 à 75 min) ou continu (60 à 70% de VMA pendant 35 à 75 min), d'une durée de 6 semaines à raison de 6 séances par semaine. L'amélioration de la VMA (+15,1±2,4% vs +10,3±3,2%) et de la vitesse d'élimination du lactate après l'effort étaient significativement plus importantes après l'entraînement intermittent en comparaison de l'entraînement continu. Tabata et coll (1996) avaient également montré que l'entraînement (pendant 6 semaines à raison de 5 fois par semaine) intermittent (8x 20s-10s à 170% de PMA) conduisait à une amélioration significative des capacités aérobies (+ 15% de $\dot{V}O_{2\max}$) et anaérobies (+28% DMOA) des sujets, alors que l'entraînement continu (60 min à 70% de $\dot{V}O_{2\max}$) conduisait uniquement à une amélioration des capacités aérobies (+ 9,4% de $\dot{V}O_{2\max}$).

2.5.2.4 - LE CAS DES SPORTIFS TRES ENTRAINES

Si l'entraînement avec des exercices continus (intensité proche du seuil lactique) permet d'accroître le potentiel aérobie, chez des sujets initialement non entraînés, celui-ci est

souvent inefficace pour des sujets très entraînés (Londeree, 1997). Il faut alors avoir recours à des exercices d'intensité très élevée (proche de $\dot{V}O_{2\max}$) pour envisager d'obtenir des adaptations chez les sujets très entraînés. Les études portant sur la comparaison des méthodes d'entraînement, chez des sportifs entraînés, ont été relativement tardives par rapport à l'intérêt qu'avait suscité la comparaison des exercices intermittents et continus, dès le début des années 70, dans cette même population. Il faudra attendre 1989 pour que l'une des premières études mette en évidence qu'un entraînement intermittent (8 semaines à 90% de $\dot{V}O_{2\max}$), par rapport à un entraînement continu, permet une amélioration significative de la performance de 3,0% sur 10km, sans qu'il y ait de changement des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ chez les sujets (Acevedo et Godfarb, 1989). Depuis, un grand nombre d'études ont montré que l'entraînement intermittent avait des effets plus importants que le travail continu, sur l'amélioration des performances sportives (Lindsay et coll, 1996 ; Westgarth-Taylor et coll, 1997 ; Stepko et coll, 1999).

Plus récemment, Esfarjani et Laursen (2006) ont montré que les améliorations des variables physiologiques et de la performance ont été significativement plus importantes pour les sujets qui réalisaient des exercices intermittents longs comparativement aux sujets qui réalisaient des exercices intermittents courts. Ces auteurs ont comparé les effets de trois modalités d'entraînement, deux modalités avec des exercices intermittents (HIT_{long} à $v \dot{V}O_{2\max}$ et HIT_{court} à 130% de $v \dot{V}O_{2\max}$) et une modalité avec des exercices continus (60 min à 75% $VO_{2\max}$), sur la performance au 3000 mètres en course à pied, $\dot{V}O_{2\max}$, $v \dot{V}O_{2\max}$, t_{lim} à $v \dot{V}O_{2\max}$, vitesse au seuil lactique (V_{LT}). Aucun changement n'a été observé dans le groupe continu, alors que dans les groupes HIT_{long} et HIT_{court} des améliorations significatives, de la performance au 3000 m, de $\dot{V}O_{2\max}$, de $v \dot{V}O_{2\max}$, du t_{lim} et de V_{LT} , avaient été observées.

Laursen et Jenkins (2001), dans une revue de questions, ont proposé que l'entraînement intermittent serait la solution la plus pertinente, en comparaison de l'entraînement continu, pour continuer à accroître le potentiel aérobie et la performance chez des sujets très entraînés. Dans ce sens, Laursen et coll (2002b) ont montré qu'un entraînement intermittent (20 x 60s-120s à PMA), de 4 séances en 2 semaines, produit des améliorations significatives des seuils ventilatoires et de la $\dot{V}O_{2\max}$ chez des cyclistes très entraînés, alors qu'en comparaison, le travail continu traditionnel ne conduit plus à aucune amélioration. Ces

auteurs ont également montré que la combinaison d'un entraînement continu et d'un entraînement intermittent conduisait à une amélioration significative des performances sur une épreuve spécifique (40km contre la montre) chez des cyclistes très entraînés alors qu'ils ne réalisaient plus de progrès avec un entraînement uniquement composé d'exercices continus (Laursen et coll, 2002a).

Il semble aujourd'hui démontré que les sportifs pratiquants traditionnellement des séances d'exercices continus tirent un profit important à introduire des exercices intermittents dans leur entraînement. Il semble également que les sportifs pratiquants des activités à caractère intermittent, telles que le football, le basket-ball, le handball, pour ne citer que celles-ci tirent également un profit de leurs pratiques spécifiques. Ostojic et coll (2010) ont montré à ce propos que les sportifs pratiquants des activités constituées d'exercices intermittents voyaient leur F_C diminuer plus rapidement dans les 20 premières secondes suivant l'arrêt d'un exercice que ceux qui ne pratiquaient que des activités composées d'exercices continus.

2.5.2.5 - LE CAS DES SUJETS AYANT UNE PATHOLOGIE PARTICULIERE

La pratique d'un entraînement intermittent a été à l'origine mise en œuvre par le cardiologue H. Reindell (Newsholme et coll, 1994), pour contribuer à améliorer la santé des malades. Aujourd'hui encore cette méthode de travail trouve des applications dans le milieu médical.

Sabapathy et coll (2004) ont montré qu'un exercice intermittent (60s-60s à 70% de $\dot{V}O_{2max}$) permettait une meilleure adaptation à l'effort que l'exercice continu (à 70% de $\dot{V}O_{2max}$) chez des personnes atteintes de maladies pulmonaires obstructives chroniques. Dans une autre étude, Tjonna et coll (2008) ont étudié deux groupes de sujets atteints de syndrome métabolique qui avaient effectué deux protocoles d'entraînement différents. Le premier groupe (AIT) avait suivi un entraînement (3 x par semaine, pendant 16 semaines) constitué d'exercices intermittents (10 min + 4 x 4min à une intensité correspondant à 90% de F_{Cmax} suivi par 3 min de récupération active à 70% de F_{Cmax} + 5min). Le second groupe (CME) avait suivi un entraînement constitué d'exercices continus (47 min à 70% F_{Cmax}), pour une dépense énergétique similaire avec le groupe AIT. L'amélioration de la $\dot{V}O_{2max}$ était respectivement de 35% dans AIT et de 16% dans CME. C'était dans le groupe AIT que le plus de facteurs liés au

syndrome métabolique avaient déclinés, en particulier une augmentation de la capacité aérobie, une amélioration des fonctions endothéliales, une diminution de la pression sanguine systolique et diastolique, une amélioration de la sensibilité à l'insuline et une diminution des réserves intracellulaires d'acides gras. Pour ces auteurs, le choix des exercices intermittents aérobies dans le traitement du syndrome métabolique est adapté ; ils suggéraient que l'intensité des exercices intermittents, plutôt que le volume de travail, serait à l'origine des améliorations fonctionnelles observées.

Si les risques d'accidents cardio-vasculaires sont réduits de façon significative à la suite d'un travail continu (Tanasescu et coll, 2002 ; Lee et coll, 2003 ; Andersen et coll, 2000), il a été montré que les exercices intermittents intensifs permettaient de limiter ces risques tout en réalisant un volume de travail moindre (Wisloff et coll, 2006).

Plus généralement, Guiraud et coll (2012) ont montré, dans une revue de question exhaustive portant sur l'utilisation des exercices intermittents dans l'entraînement des patients atteints de pathologies cardio-vasculaires, que d'une part le travail intermittent intensif était mieux toléré que le travail continu à intensité modérée et que d'autre part les adaptations centrales et périphériques étaient plus importantes lors du travail intermittent. Dans cette revue de question il a également été montré que les exercices intermittents répondaient aux mêmes exigences pour les patients que pour les sujets entraînés, à savoir solliciter un fort pourcentage de la consommation d'oxygène au cours de l'exercice.

2.5.3 - SYNTHÈSE DE LA COMPARAISON : INTERMITTENT VS CONTINU

INTERMITTENT	CONTINU
Charge de travail : Se définit par le rapport effort/récupération, par la durée et l'intensité de l'effort et par la durée et l'intensité de la récupération.	Charge de travail : Se définit par l'intensité et le volume de travail.
A intensité identique 2,5 fois plus de volume que le continu (Billat et coll, 2000b).	Pour un individu donné le tlim à vVO_{2max} est plus court que lors de l'intermittent (Billat et coll, 2000b).
Remboursement d'une partie de la dette en O_2 pendant l'exercice lui-même (Fox et Mathews, 1981 ; Essén et coll, 1977).	Remboursement de la dette à la fin de l'exercice (Di Prampero et coll, 1970 ; Cerretelli, 1988).
Un entraînement peu volumineux mais intensif conduit à des améliorations de la cinétique de VO_2 (Mc Kay et coll, 2009).	Un entraînement volumineux conduit à des améliorations de la cinétique de VO_2 (Mc Kay et coll, 2009).
A 110 et 120% de vVO_{2max} le $T_{90\%VO_{2MAX}}$ est plus long qu'à 100% de vVO_{2max} en continu (Billat et coll, 2000b ; Dupont et coll 2002).	A ~85% de vVO_{2max} le $T_{80\%VO_{2MAX}}$ est plus long en continu (Zafeiridis et coll, 2010).
Amélioration de VO_{2max} plus importante suite à un programme d'entraînement (Gorostiaga et coll, 1991 ; Laursen et coll, 2002b ; Esfarjani et Laursen, 2006 ; Seiler et coll, 2011).	Amélioration de VO_{2max} identique suite à un programme d'entraînement (Poole et Gaesser, 1985 ; Franck et coll, 1998).
Amélioration de la puissance au seuil ventilatoire plus importante (Poole et Gaesser, 1985 ; Seiler et coll, 2011).	
A une intensité donnée la lactatémie est moins importante à la fin de l'exercice intermittent (Essén et coll, 1978a et 1978b ; Gorostiaga et coll, 1991 ; Gharbi et coll, 2008 ; Casas, 2008).	A W total égal, la lactatémie est moins importante à la fin de l'exercice continu vs intermittent (Edwards et coll, 1973).

A intensité identique la diminution du stock de glycogène est moindre (Essén et coll, 1978a).

Resynthèse du stock de glycogène après un exercice épuisant de 5 à 24 h (Fox et Mathews, 1981).

Amélioration des capacités aérobies et anaérobies (Tabata et coll, 1996 ; Seiler et coll, 2011). Activité enzymatique aérobie et anaérobie améliorées dans les fibres lentes et rapides (Gjovaag et Dahl, 2008).

Amélioration de la VMA plus importante au cours d'un programme d'entraînement (Berthoin et coll, 1995 ; Gharbi et coll, 2008).

Amélioration du tlim à vVO_{2max} plus importante à la suite d'un programme d'entraînement intermittent (Esfarjani et Laursen, 2006).

Amélioration de la performance spécifique plus importante à la suite d'un programme d'entraînement intermittent (Acevedo et Godfarb, 1989 ; Westgarth-Taylor et coll, 1997 ; Stepko et coll, 1999 ; Laursen et coll, 2002a et 2002b et ; Esfarjani et Laursen, 2006).

Sollicitation des fibres FT_{IIa} , FT_{IIb} et ST à toutes les intensités (Essén et coll 1978a ; Edgerton et coll, 1975 ; Fox et Mathews, 1981 ; Yoshida et coll, 1996 ; Billat, 2001b ; Krstrup et coll, 2004).

Fatigue neuromusculaire plus importante à une charge de travail identique (Theurel et Lepers, 2008)

La variabilité de la F_C est plus basse à la suite d'un exercice intermittent vs continu (Buchheit et coll, 2007)

Resynthèse du stock de glycogène après un exercice épuisant de 10 à 46 h (Fox et Mathews, 1981).

Amélioration des capacités aérobies (Tabata et coll, 1996).
Activité enzymatique aérobie améliorée surtout dans les fibres lentes (Gjovaag et Dahl, 2008).

Amélioration similaire de la VMA à la suite d'un programme d'entraînement continu ou intermittent (Tuimil et coll, 2011).

Amélioration de l'endurance plus importante suite à un programme d'entraînement continu (Franch et coll 1998).

Sollicitation surtout des fibres lentes aux intensités submaximales par rapport à la vVO_{2max} (Essén et coll 1978a ; Edgerton et coll, 1975 ; Fox et Mathews, 1981 ; Yoshida et coll, 1996).

2.6 - DU CONCEPT DE VMA A LA GESTION DE L'INTENSITE LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS AEROBIES

Si $\dot{V}O_{2\max}$ est généralement positivement corrélée à la performance (Foster, 1983 ; Midgley et coll, 2006a), dans le cas où les sujets ont des $\dot{V}O_{2\max}$ comparables, la corrélation entre $\dot{V}O_{2\max}$ et la performance est faible (Conley et Krahenbuhl, 1980) voire non significative (Lacour et coll, 1989 et 1990). La vitesse maximale aérobie (VMA), qui peut-être définie comme la vitesse suffisante permettant d'atteindre la $\dot{V}O_{2\max}$ au cours d'un test incrémental (Léger et Boucher, 1980), est à la fois l'expression de la $\dot{V}O_{2\max}$, de la fraction de $\dot{V}O_{2\max}$ soutenue au cours de l'effort, et du coût énergétique (Di Prampero et coll, 1986). Alors que chacun des paramètres pris séparément n'est que faiblement corrélé à la performance en ½ fond (800 mètres au marathon), la VMA est corrélée positivement à la performance (Léger et coll, 1986 ; Lacour et coll, 1989 ; Lacour et coll, 1991 ; Padilla et coll, 1992).

Pour définir la vitesse suffisante permettant d'atteindre la $\dot{V}O_{2\max}$, certains auteurs préfèrent le concept de vitesse à la $\dot{V}O_{2\max}$ ou $v\dot{V}O_{2\max}$ à celui de VMA (Billat et Koralsztein, 1996 ; Berthoin et coll, 2001), d'autres préfèrent utiliser le concept de VMA (Léger et Boucher, 1980 ; Cazorla, 1990 ; Brue, 1985 ; Lacour, 1989 ; Thibault, 2009). Ces deux concepts peuvent d'ailleurs être employés comme des synonymes ; Billat (1998) définissait

« La vitesse aérobie maximale (ou vitesse maximale aérobie) (VAM ou VMA ou $v\dot{V}O_{2\max}$) : vitesse ou puissance minimale qui sollicite la consommation maximale d'oxygène. » Dans les études citées nous emploierons le concept que l'auteur a utilisé dans la rédaction de son article.

2.6.1 - LE CONCEPT DE $v\dot{V}O_{2\max}$ ET DE VMA

Le concept de vitesse associée à $\dot{V}O_{2\max}$ est apparu en 1984 (Billat et Koralsztein, 1996). La $v\dot{V}O_{2\max}$ a été alors définie comme la vitesse associée à l'atteinte de $\dot{V}O_{2\max}$ au

cours d'un test incrémental réalisé sur un tapis roulant (Daniels et coll, 1986). Elle peut-être calculée au moyen de différentes méthodes :

a) A partir de la relation linéaire, entre la vitesse de course à des allures sous maximales et la consommation d'oxygène, la $v\dot{V}O_{2max}$ est calculée en prolongeant la droite jusqu'à la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ connue (Morgan et coll, 1989).

b) En se référant à l'équation (Di Prampero, 1986 et Di Prampero et coll, 1986) qui lie la vitesse (V en m.s⁻¹) à la puissance métabolique (E en W.kg⁻¹) et le coût énergétique (C_r en J.kg⁻¹.m⁻¹) dans des conditions maximales aérobies, il est possible d'écrire l'équation suivante :

$$V_{max} = \frac{\dot{V}O_{2max}}{C_r}$$

Dans cette équation V_{max} représente $v\dot{V}O_{2max}$.

c) La vitesse atteinte à la fin d'un test progressif et maximal est retenue. Le rythme peut-être imposé, par l'incrémentation de la vitesse sur un tapis roulant (Daniels et coll, 1986), par des repères sonores qui correspondent à une distance parcourue (Léger et Boucher, 1980 ; Cazorla, 1990 ; Gerbeaux et coll, 1991), par un cycliste qui impose au sujet de maintenir une allure donnée (Brue, 1985 ; Lacour, 1989).

2.6.2 - LES TESTS VMA

Lacour et coll (1991) montrent que, dans une population d'athlètes de haut niveau (coureurs de ½ fond), il existe des différences entre la $v\dot{V}O_{2max}$ calculée et la VMA obtenue lors du test sur piste de l'Université de Montréal (TPUM), mais ces différences restent faibles (0,3 km.h⁻¹) et les vitesses obtenues sont fortement corrélées (r=0,92 ; P<0,001). Dans une population de sportifs moyennement entraînés (étudiants en STAPS), Berthoin et coll (1996) n'observent pas de différence entre un test sur tapis roulant et le TPUM; ils ne trouvent pas non plus de différences significatives entre les VMA mesurées lors de ces tests et la $v\dot{V}O_{2max}$ calculée, ainsi qu'entre la $\dot{V}O_{2max}$ mesurée et celle estimée à partir de la VMA obtenue lors du TPUM. Des différences peuvent être importantes dans une comparaison entre les tests de

terrain et le test sur tapis roulant (Laiche et coll, 1996). La vitesse obtenue sur tapis roulant étant significativement supérieure ($P < 0,001$) à celle obtenue lors d'un test ayant les mêmes caractéristiques (durée des paliers, incrémentation de la vitesse) sur piste. Cette différence était attribuée, dans cette étude, au fait que les facteurs aérodynamiques et climatiques (résistance de l'air à l'avancement, vent, température, humidité) augmentent la difficulté des tests sur piste en comparaison des tests en laboratoire. Lors d'un test sur tapis roulant une élévation de la pente de 1% à 3% (Berthoin et coll, 1996 ; Berthoin et coll, 1997 ; Ahmaidi et coll 1992a et 1992b), permet d'accroître la résistance et compense les difficultés rencontrées lors des tests en extérieur, ce qui a pour conséquence de réduire complètement les différences de VMA obtenues lors de ces tests (Berthoin et coll, 1996).

En fonction des auteurs, la vitesse effectivement retenue à la fin du test peut varier. Certains auteurs retiennent la vitesse atteinte lors du dernier palier complètement effectué (Gerbeaux et coll, 1991 ; Berthoin et coll, 1994). D'autres auteurs calculent une vitesse pondérée en fonction du temps pendant lequel le sujet a couru lors de son dernier palier (Ahmaidi et coll, 1992), ou encore en augmentant la vitesse du dernier palier complètement effectué de $0,25 \text{ km.h}^{-1}$, de $0,50 \text{ km.h}^{-1}$, ou de $0,75 \text{ km.h}^{-1}$ suivant si le sujet a couru 30s, 60s, ou 90s lors du dernier palier, au cours d'un test dont l'incrément est de 1 km.h^{-1} par palier de 2 min (Lechevalier et coll, 1989). Pour Berthoin et coll (2001), incrémenter la vitesse du dernier palier complètement réalisé n'est pas nécessaire, d'autant plus qu'il semble probable que lors du dernier palier, voire de l'avant dernier palier, la $\dot{V}O_{2\text{max}}$ ait déjà été atteinte, en particulier lorsque les sujets évalués sont très entraînés (Laiche et coll, 1996 ; Lacour et coll, 1989 et 1991).

Finalement dans leur revue de questions sur la VMA, Berthoin et coll (2001) préconisent de choisir un test de terrain s'il s'agit d'évaluer la VMA pour des raisons liées à l'entraînement des coureurs, le TPUM (Léger et Boucher, 1980), le VAMEVAL (Cazorla, 1990) ou le test derrière cycliste (Brue, 1985) apparaissent alors comme des solutions pertinentes.

2.6.3 - RELATION ENTRE LA VMA ET LA PERFORMANCE

De nombreuses études ont montré des corrélations entre la VMA et la performance, (Berthoin et coll, 2001 ; Lacour et coll, 1989 et 1991). Nous retiendrons que la VMA est une vitesse qui se situe entre la vitesse spécifique d'une course de 1500 mètres et la vitesse

spécifique d'une course de 3000 mètres (Padilla et coll, 1992 ; Lacours et coll, 1989 et 1991) (figure 18), et, bien quelle soit corrélée avec les courses du 800 mètres au marathon, c'est avec la performance au 1500 mètres que la corrélation ($r=0,96$; $P<0,01$) est la plus élevée (Lacour et coll, 1989). Des valeurs maximales de $21,5 \text{ km.h}^{-1}$ chez les femmes et de $24,5 \text{ km.h}^{-1}$ chez les hommes, dans une population de coureurs de demi-fond de niveau international, ont été rapportées (Lacour et coll, 1991), mais il est probable que les meilleurs coureurs de demi-fond mondiaux puissent atteindre des valeurs de l'ordre de 25 km.h^{-1} chez les hommes et de plus de 22 km.h^{-1} chez les femmes (estimation réalisée à partir des records du monde du 1500 m et de la relation $y = 0,9527x$ établie à partir des données de Lacour et coll, 1989) (figure 20).

Figure 18. - Représentation schématique de la vitesse spécifique au 1500 m (V_{1500}), de la vitesse spécifique au 3000 m (V_{3000}) et de la VMA (test de Brue) dans une population de coureurs de $\frac{1}{2}$ fond très entraînés (d'après les données de Lacour et coll, 1989).

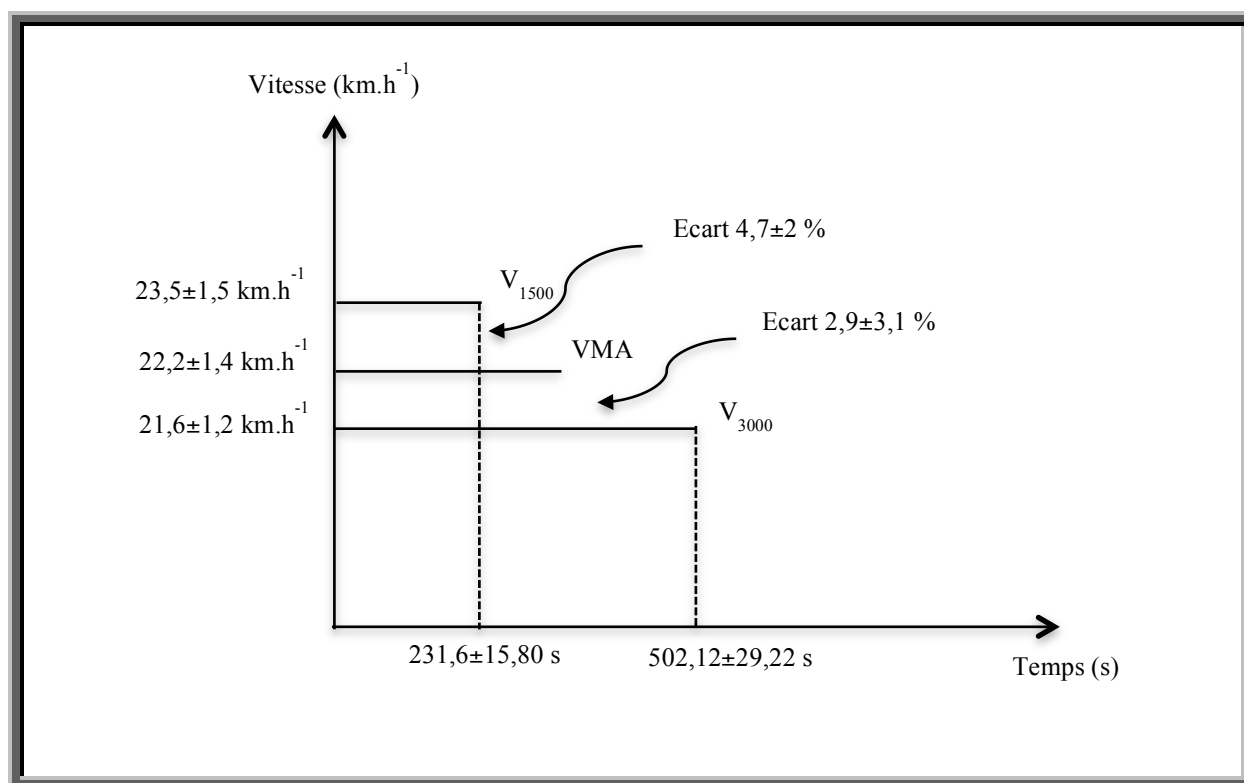
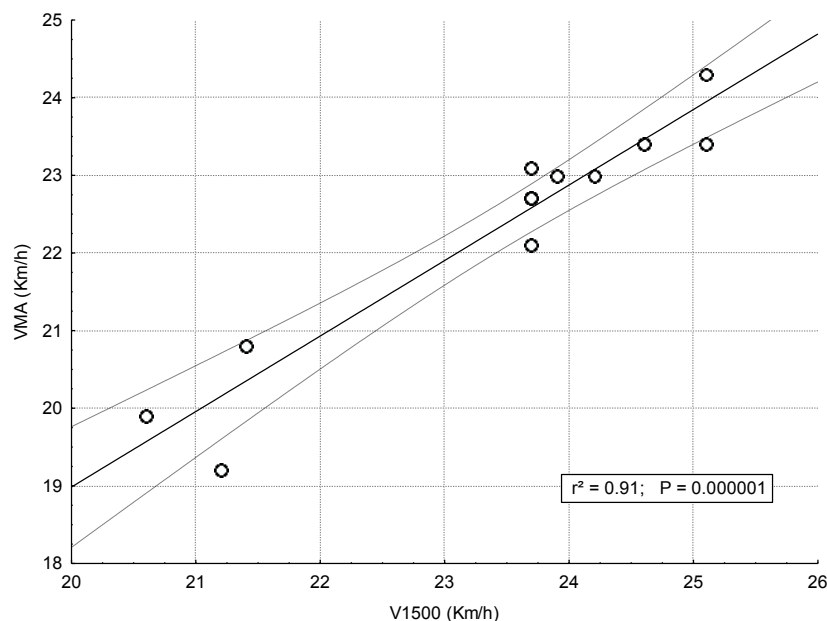


Figure 19. - Représentation graphique de la VMA en fonction de la V_{1500} ($y=0,9527x$) pour un groupe de coureurs de ½ fond entraînés (A partir de données recueillies dans Lacour et coll, 1989).



2.6.4 - LA VMA POUR PRESCRIRE LES ALLURES DES EXERCICES INTERMITTENTS AEROBIE

Comme nous l'avons vu précédemment la VMA est corrélée à la performance en ½ fond, il paraît donc approprié d'utiliser cette vitesse pour contrôler les allures de course dans l'entraînement en général (Lacours et coll, 1989 ; Ahmaidi et coll, 1992b ; Berthoin et coll, 1992 ; Hill et Rowell, 1997). Il en va de même pour l'entraînement intermittent, en particulier quand le but est d'atteindre une sollicitation maximale de la $\dot{V}O_2$ au cours de l'exercice (Billat, 2001a). L'entraînement à base d'exercices intermittents réalisés à la VMA, permet d'obtenir une augmentation significative dans la densité cellulaire en mitochondries, c'est-à-dire la capacité oxydative de la cellule, mais aussi dans la vitesse d'élimination du lactate musculaire (Brooks et coll, 2004). Cependant, le fait de courir à VMA lors d'un exercice intermittent ne suffirait pas pour garantir un niveau de sollicitation aérobie maximal (Gorostiaga et coll, 1991 ; Fox et coll, 1974). Billat et coll (2000b) ont proposé que, lors d'un exercice intermittent 30s-30s couru à la $v \dot{V}O_{2max}$, la récupération soit active (50% de $v\dot{V}O_{2max}$) afin que le temps passé à $\dot{V}O_{2max}$ soit significatif. Il est intéressant de constater que pour atteindre la sollicitation d'un fort pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ lors d'un exercice intermittent, les différentes études proposent de courir à des vitesses très diverses. Par exemple, avec

comme objectif d'atteindre une sollicitation maximale de $\dot{V}O_{2\max}$, il a été proposé de courir, lors d'un exercice intermittent 30s-30s, à des vitesses représentant 100% (Gorostiaga et coll, 1991), 105% (Millet et coll, 2003), 110% et 120% (Fox et coll, 1977 ; Dupont et coll, 2003 ; Berthoin et coll, 2006), de la VMA. Dans toutes ces expérimentations, la VMA avait été mesurée lors d'un test incrémental continu. Cela suggère que la VMA mesurée lors d'un test continu doit être adaptée afin de trouver une vitesse adéquate pour les exercices intermittents.

2.6.5 - INFLUENCE DU %VMA LORS D'UN EXERCICE INTERMITTENT SUR LA SOLLICITATION AEROBIE ET ANAEROBIE

Billat et coll (2000b) ont montré qu'un exercice intermittent 30s-30s (récupération active), couru à la VMA, permettait de maintenir $\dot{V}O_{2\max}$ de la 5^{ème} à la 18^{ème} minutes d'effort, ce qui est presque trois fois supérieur au temps pendant lequel un sujet pourrait maintenir sa $\dot{V}O_{2\max}$ au cours d'un tlim continu. Si cette forme d'exercice semble aujourd'hui complètement justifiée, dans un entraînement dont l'objectif est d'améliorer la capacité aérobie des sujets et plus particulièrement leur VMA, il reste de nombreuses questions quant au pourcentage de VMA auquel il est souhaitable de courir lors de ces exercices. En comparant trois exercices intermittents (10s-10s, 20s-20s, 30s-30s) à quatre intensités différentes (100%, 105%, 110% et 115% de VMA), il a été montré que lors de l'ensemble de ces exercices la $\dot{V}O_{2\max}$ était atteinte, mais que la part anaérobie était également de plus en plus importante (Bisciotti, 2004). Pour évaluer la part des processus anaérobies lactiques dans la fourniture d'énergie lors d'un exercice intermittent, cet auteur a observé l'évolution de [La] et considéré que la variation de cette concentration ($\Delta[La]$) rendait compte du caractère plus ou moins anaérobie de l'exercice. Ainsi, si $\Delta[La] < 1 \text{ mmol.l}^{-1}$, l'exercice était considéré comme aérobie ; si $1 \text{ mmol.l}^{-1} < \Delta[La] < 2 \text{ mmol.l}^{-1}$, il était considéré comme faiblement anaérobie lactique ; si $2 \text{ mmol.l}^{-1} < \Delta[La] < 3 \text{ mmol.l}^{-1}$, il était considéré comme anaérobie lactique ; et si $\Delta[La] > 3 \text{ mmol.l}^{-1}$, il était considéré comme fortement anaérobie lactique (voir tableau III). Dans cette étude, il est bien mis en évidence que les exercices intermittents deviennent de plus en plus anaérobie lactique en fonction de l'augmentation de la vitesse de course, cependant il n'a pas été mesuré le temps passé à un pourcentage élevé de la $\dot{V}O_{2\max}$ lors de chacune des modalités et intensités. Il est donc difficile de définir une relation entre le pourcentage de

VMA choisi et le niveau d'intensité aérobie de l'exercice, car il est possible qu'un exercice intermittent, qui solliciterait la glycolyse (avec une augmentation du lactate), permettrait aussi d'augmenter le temps passé à un fort pourcentage de la $\dot{V}O_{2\max}$. En comparant les exercices intermittents 15s-15s, réalisés à 110, 120, 130 ou 140% de VMA, il a été montré que la vitesse qui permettait de maintenir le plus long temps d'effort à la $\dot{V}O_{2\max}$ correspondait à 120% de VMA (Dupont et coll, 2002). Ces auteurs définissaient alors 120% de VMA comme étant la vitesse critique des exercices intermittents. S'agissant d'un exercice proche de ceux étudiés par Bisciotti (2004), cet exercice intermittent serait sûrement classé "fortement anaérobie lactique" et pourtant c'est celui qui permet d'atteindre la sollicitation aérobie la plus importante.

Allure en % de la VMA	Modalité de l'exercice intermittent	Classification
100	10s-10s	Aérobie
100	20s-20s	Aérobie
100	30s-30s	Aérobie
105	10s-10s	Faiblement Anaérobie Lactique
105	20s-20s	Faiblement Anaérobie Lactique
105	30s-30s	Faiblement Anaérobie Lactique
110	10s-10s	Anaérobie Lactique
110	20s-20s	Anaérobie Lactique
110	30s-30s	Anaérobie Lactique
115	10s-10s	Fortement Anaérobie Lactique
115	20s-20s	Fortement Anaérobie Lactique
115	30s-30s	Fortement Anaérobie Lactique

Tableau III. Classification des différentes modalités d'exercices intermittents réalisés à des intensités comprises entre 100% et 115% de la VMA (Bisciotti, 2004).

2.6.6 - LA DETERMINATION DE LA VMA POUR LES EXERCICES INTERMITTENTS

Au cours d'un test incrémental intermittent de type 30s-15s, il a été montré que la vitesse obtenue à l'arrêt du test était plus grande que celle obtenue au cours d'un test continu, alors que $\dot{V}O_{2\max}$, $F_{c\max}$, Q_r et RPE étaient similaires au test continu (Buccheit, 2005a ; Buccheit, 2008). La vitesse obtenue à la fin du 30s-15s, semble adaptée à la définition des vitesses de travail lors d'exercices intermittents de type 15s-15s en salle, réalisés sous forme d'aller retour, pour de jeunes joueurs de hand-ball (Buccheit, 2005b, 2005c, 2008). Il a été montré que lors d'un exercice intermittent, de type 15s-15s, il fallait courir à une vitesse représentant 110% de la VMA évaluée au test de piste de l'Université de Montréal, ou à une vitesse représentant 95% de la vitesse atteinte au 30s-15s, pour obtenir une F_C moyenne supérieure à 90% de la FC de réserve. La vitesse atteinte lors du 30-15_{FIT} nécessitait donc d'être pondérée pour obtenir une vitesse de travail adaptée à une sollicitation aérobie maximale lors d'un exercice intermittent.

Il existe un autre test intermittent élaboré par Bangsbo et coll (2008), dont l'objectif est la détermination d'un niveau de condition physique pour les footballeurs. Dans son étude portant sur la comparaison d'un test incrémental sur tapis roulant et le «Yo-Yo recovery test», Castagna et coll (2006) ont montré que les niveaux d'ATP, de PC, de glycogène baissaient, et que la [La] augmentait, ces résultats n'étant pas une explication de la fatigue lors de cet exercice intermittent. Lors du «Yo-Yo recovery test», le sujet réalise de nombreux aller-retour sur une distance de 20 mètres, qui nécessitent d'accélérer et de décélérer un grand nombre de fois ; cette forme de course aurait des répercussions sur la fatigue (Dellal, 2010). Il est possible de faire l'hypothèse selon laquelle ces nombreuses accélérations et décélérations augmentent la sollicitation musculaire et que cette fatigue supplémentaire ait une origine neuromusculaire.

Seiler et Hetlelid (2005) ont montré que la vitesse de course, spontanément choisie par les sujets (il est juste demandé aux sujets de courir comme s'ils voulaient atteindre la vitesse moyenne la plus élevée possible lors de chaque session d'intermittent), représentait en moyenne 87% de leur $\dot{V}O_{2\max}$. Cette allure de course lors d'exercices intermittents, alternant des efforts de 4 min avec des récupération de 1, 2 ou 4 min, permettait d'atteindre une sollicitation moyenne de 95% de $\dot{V}O_{2\max}$. Dans une autre étude, Seiler et Sjursen (2004) ont comparé les vitesses spontanément adoptées par les coureurs lors de quatre différentes

sessions d'exercices intermittents qui consistaient en : S₁ : 24 x 1 min - 1 min ; S₂ : 12 x 2 min - 2min ; S₃ : 6 x 4 min - 4 min ; et S₄ : 4 x 6 min - 6 min. Alors que la vitesse moyenne s'abaissait en même temps que le temps d'effort s'allongeait, la $\dot{V}O_{2\text{max}}$ moyenne (91-95% de $\dot{V}O_{2\text{max}}$), [La], et l'évolution des valeurs de perception de l'effort au cours du temps (mesure de la perception de la difficulté de l'effort suivant l'échelle de Borg, 1970), n'étaient pas significativement différents.

Dans ces deux études il est remarquable que, sans qu'il soit nécessaire d'imposer la vitesse de course sur la base d'une évaluation préalable, les sujets adoptent une allure de course tout à fait adaptée à une sollicitation élevée du système aérobie. *Ces observations pourraient nous amener à réfléchir sur l'utilité de contrôler la vitesse de déplacement des coureurs. Cependant, le contrôle et l'évaluation de la VMA qu'il y a en amont ont deux intérêts : trouver une intensité minimale qui permette de solliciter la $\dot{V}O_{2\text{max}}$ et évaluer les progrès au cours du cycle d'entraînement.*

2.6.7 - LA NOTION DE TEMPS LIMITE LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS

Billat et coll (1996) ont proposé également de calibrer la durée des efforts et des récupérations lors d'un exercice intermittent en fonction du temps limite continu à $v\dot{V}O_{2\text{max}}$. Le temps limite (tlim) est défini par la durée pendant laquelle un sujet est capable de maintenir 100% de sa $v\dot{V}O_{2\text{max}}$ (Billat, 1994b).

Dans les programmes d'entraînement, comme dans les études expérimentales, la durée des exercices est souvent la même pour tous les coureurs (Berthoin et coll, 2001). Cette organisation est en relation avec l'hypothèse selon laquelle tous les sujets sont capables d'effectuer la même durée d'effort à une intensité donnée (Billat et Koralsztein, 1996). En réalité, il existe des variations importantes d'un individu à l'autre par rapport au temps de maintien d'une intensité de course qui correspond à 100% de la $v\dot{V}O_{2\text{max}}$, qui peuvent aller de 3 à 9 min pour des adultes (Billat et Koralsztein, 1996), et de 4 à 11 min dans un groupe de sportifs entraînés en ½ fond (Billat et coll, 1994a, 1994b, et 1994c). Ces données rejoignent d'ailleurs la conception de l'index d'endurance défini par Péronnet et Thibault (1987) comme « la pente de la relation entre l'intensité moyenne tenue en compétition et le logarithme

naturel du temps de performance ». L'index d'endurance varie de façon importante d'un sujet à un autre, et est indépendant de la $\dot{V}O_{2\max}$ (Thibault, 2009). Hill et Rowell (1997) ont montré que les sujets (coureuses de ½ fond très entraînées) doivent courir en moyenne pendant 60% du tlim pour atteindre $\dot{V}O_{2\max}$. A partir de cette observation, il est couramment admis que 60% du tlim est un temps d'effort optimal pour calibrer la durée des efforts lors des exercices intermittents (Laursen et Jenkins, 2001 ; Laursen et coll, 2002).

Dans ce sens, Smith et coll (1999) ont montré qu'un entraînement intermittent, dont la durée des efforts correspondait à 60 et 75% du tlim (ratio temps d'effort-temps de récupération, 2 pour 1), permettait une amélioration de la VMA, du tlim et de la performance au 3000 mètres. Laursen et coll, (2002) ont également montré que le fait d'inclure dans leur programme d'entraînement des exercices intermittents, dont le temps d'effort représente 60% du tlim, était la modalité la plus efficace (par rapport à un exercice intermittent court alternant des périodes de travail de 30 s à 175% de PMA avec des récupérations de 4,5 min) pour développer la puissance maximale aérobie (PMA), et la performance lors d'une épreuve de 40 km, pour des cyclistes entraînés.

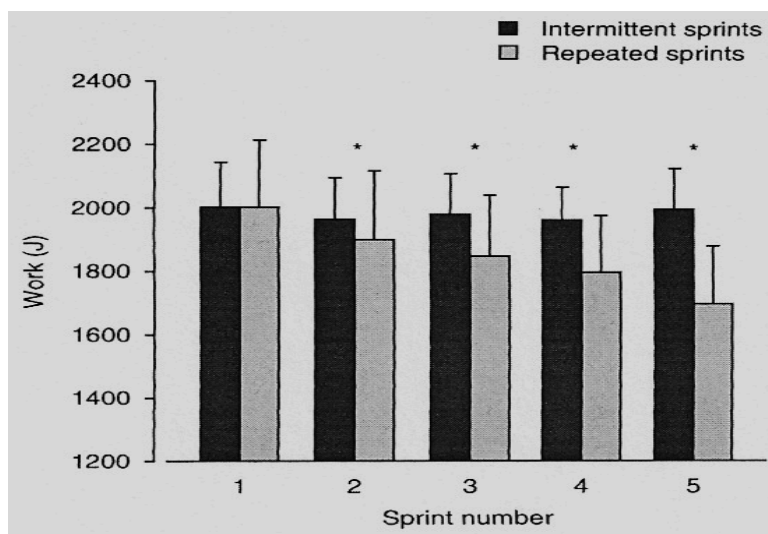
Lors d'une étude réalisée par Billat et coll (1996), le temps d'effort et de récupération de l'exercice intermittent ont été calibrés pour représenter 50% du tlim de chaque coureur. Cette forme d'intermittent individualisée a été comparée à un exercice intermittent aérobie, 2 min- 2min (Astrand et coll, 1960a). L'objectif de cette étude était de comparer la durée (tlim intermittent à 100% de $v \dot{V}O_{2\max}$) de l'exercice intermittent 2min-2min avec celle de l'exercice intermittent individualisé. Les résultats montraient qu'il n'y avait pas de différence significative entre les tlim des deux exercices intermittents, et qu'il n'y avait pas de corrélation entre le tlim continu des sujets et les tlim intermittents (Billat et coll, 1996). Millet et coll (2003a) ont confirmé ces observations en montrant que, le tlim et le T90% $\dot{V}O_{2\max}$ mesurés lors d'un exercice intermittent 60s-30s et lors d'un exercice intermittent ½ tlim-½ tlim, étaient identiques. Les auteurs concluaient que la calibration de la durée des exercices intermittents en fonction du tlim continu n'apportait rien de plus par rapport à la durée d'effort et de récupération d'exercices intermittents plus traditionnels. Il reste que cette étude met également en avant que l'endurance aérobie d'un individu est en relation avec la vitesse de déplacement mais aussi avec les modalités spécifiques de l'exercice.

Depuis les années 80, la VMA s'est imposée comme une mesure pertinente de l'évaluation du niveau des coureurs de demi-fond. Elle est aussi utilisée comme une intensité de travail propice au développement des qualités aérobies des coureurs. Cependant, il existe un décalage entre la VMA enregistrée lors des tests incrémentaux continus et la vitesse à laquelle il faut courir lors d'un exercice intermittent, pour atteindre une sollicitation aérobie maximale pendant un temps suffisamment long. Des tests progressifs intermittents ont vu le jour. Le fait qu'ils permettent de déterminer une vitesse adaptée aux exercices intermittents, mais supérieure à la VMA habituellement évaluée, pose la question suivante : n'y a-t-il pas une nécessité à redéfinir le concept de VMA et par là même à définir une intensité de travail adaptée aux exercices intermittents?

2.7 - DES EXERCICES INTERMITTENTS AUX SPRINTS REPETES (SR)

Il existe une filiation historique entre l'étude des exercices intermittents et l'étude de l'habileté à répéter des sprints. Les SR seraient un cas particulier des exercices intermittents concernant les activités acycliques, comme les sports collectifs (Girard et coll, 2011 ; Bishop et coll, 2011). Un sport collectif, comme le football, est considéré comme une activité constituée d'une succession d'exercices intermittents complexes, au cours de laquelle le joueur enchaîne 1000 à 1400 actions, principalement courtes, toutes les 4 à 6 secondes, dont 10 à 20 sprints, et une course à intensité élevée toutes les 70 secondes, l'ensemble sur un fond de jeu qui représente une distance moyenne parcourue de 10 à 12 kilomètres en moyenne (Stolen et coll, 2005). Il a été mis en évidence que le caractère intermittent de l'activité était primordial et particulier, et que le joueur devait développer une habileté à répéter des sprints pour être performant (Bangsboo, 1994). Plus généralement, les activités collectives de grand terrain, mais aussi les sports de raquette (tennis, squash, badminton) sont considérées comme une succession d'efforts intensifs et répétés (Glaister, 2005 ; Spencer et coll, 2005). Le ratio temps à haute intensité par rapport à temps à basse intensité varie de 1 pour 6 à 1 pour 14 (Glaister, 2005). Les RS sont considérés comme une habileté à répéter des sprints courts ≤ 10 s, alternés avec des temps brefs de récupération ≤ 60 secondes, ce qui devrait être distingué des exercices intermittents courts qui alterneraient le même type d'effort avec des récupérations plus longues de 30 à 300 secondes (Girard, 2011). Ce qui distinguerait les SR par rapport aux exercices intermittents courts, serait le fait que la récupération ne permettrait pas de conserver la vitesse de déplacement du premier effort lors des efforts suivants alors que lors du second, la vitesse pourrait-être entretenue sur l'ensemble du temps de travail (figure 20). Pour ces auteurs, un enchaînement de sprints d'une durée de 30 secondes alternés avec des périodes de 4 min de récupération ne constitue pas un SR, bien que ce type de méthodologie soit souvent utilisée dans de nombreuses études sur les SR (Bogdanis et coll, 1996a et 1996b ; McDougall et coll, 1998 ; Gibala et coll, 2008 ; Bayati et coll 2011). D'ailleurs ces exercices alternant 4 à 5 répétitions d'efforts d'une durée de 30s, courus le plus vite possible ($\sim 150\%$ de VMA), avec des périodes de 4 min de récupération passive, étaient déjà utilisés par les meilleurs coureurs de 400 mètres pour améliorer leur capacité à enchaîner des courses avec une [La] élevée (Heugas et coll, 1997) et classés comme des exercices intermittents anaérobies (Billat, 2001b).

Figure 20. - Effet de la durée de la récupération sur la vitesse lors d'efforts maximaux de 4 secondes alternés avec des récupérations de 2 min (Intermittent sprints) ou de 30 s (Repeated sprint) (Girard et coll, 2011).



Plus généralement encore dans une revue de questions récentes sur les SR, Girard et coll (2011) résument les paramètres qui influencent la fatigue lors des SR : le nombre et la durée des efforts, le temps et l'intensité des récupérations, le mode d'activité (cyclisme ou course), la nature de la résistance à l'avancement (en salle ou à l'extérieur, mécanique ou magnétique). Cet ensemble de paramètres est similaire à ceux qui définissent les contraintes des exercices intermittents. D'autre part, dans cette revue de question, les facteurs qui semblent également limiter la performance lors des SR sont également les mêmes facteurs qui ont été décrits précédemment pour les exercices intermittents. Ce qui semble donc différencier ces deux modes d'exercices, ce serait l'intensité par rapport à un pourcentage de VMA de l'ordre de 100 à 120% pour les exercices intermittents, alors qu'il s'agirait de courir à vitesse maximale lors des SR. Sur le plan physiologique, il a été constaté que, lors des SR, la dépense énergétique était assurée par un équilibre entre les trois processus énergétiques. La dépense énergétique devenait comparable, lors des derniers efforts, à ce qu'il avait été observé lors des exercices intermittents.

2.7.1 - DIFFERENCES ET SIMILITUDES ENTRE EXERCICES INTERMITTENTS ET LES SPRINTS REPETES (SR)

En comparant les effets d'un grand volume d'entraînement, constitué d'exercices intermittents longs à intensité modérée (304 W, $\sim 87\%$ de la $\dot{V}O_{2\max}$), avec les effets d'un petit volume d'entraînement constitué de SR réalisés à intensité maximale (643 W, $\sim 184\%$ de $\dot{V}O_{2\max}$), il a été montré que l'activité des marqueurs de la biogénèse des mitochondries était significativement augmentée sans différence entre les modes d'entraînement (Niklas et coll, 2010). Les auteurs en concluaient qu'il n'était pas utile de faire un entraînement volumineux si un petit volume d'efforts maximaux, répétés, conduisait aux mêmes résultats. Cette conclusion rejoint d'ailleurs les résultats de Rodas et coll (2000), qui avaient montré également qu'un petit volume d'entraînement de sprints répétés conduisait à une amélioration significative des capacités aérobies ($\dot{V}O_{2\max}$, PFK, CS) et anaérobies (Créatine kinase, LDH).

Plus récemment encore, il a été comparé un programme d'entraînement, de sprints répétés (G₁: 3 à 5 x 30s le plus rapidement possible alternés avec 4 min de récupération), avec un exercice intermittent (G₂: 6 à 10 x 30s-2 min à 125% de la PMA), au cours de quatre semaines à raison de trois séances par semaine (Bayati et coll, 2011). Les résultats de cette étude ont montré que les deux groupes avaient significativement amélioré leur $\dot{V}O_{2\max}$ (G₁: 9,6% vs G₂: 9,7%), le tlim à $\dot{V}O_{2\max}$ (G₁: 48% vs G₂: 54%), et leur puissance maximale au test Wingate (G₁: 10,3% vs G₂: 7,3%). Si globalement les capacités aérobies et anaérobies des deux groupes se sont améliorées, le G₁ avait une amélioration significativement plus importante des capacités anaérobies et le G₂ du tlim. Les auteurs concluaient que, conformément aux résultats expérimentaux antérieurs, les SR permettaient bien une amélioration des capacités aérobies et anaérobies. Cependant, un exercice intermittent permettait d'obtenir des résultats comparables avec une intensité de travail beaucoup moins élevée et un volume de travail seulement doublé.

Il a été montré que la capacité à répéter des sprints (2 x 15s-15s) était directement liée à l'amélioration des capacités aérobies des sujets à la suite d'un programme d'entraînement intermittent, constitué d'intervalles longs et/ou courts à des intensités de 90 à 115% de VMA (Buchheit, 2008c ; Buchheit et coll, 2010 ; Buccheit et Ufland, 2011). Il faut cependant pondérer l'influence du niveau de capacité aérobie en fonction du niveau des sujets. Ainsi

Buchheit et coll (2012) ont montré que dans un groupe homogène de cyclistes entraînés, cette relation était moins importante. Dans une étude portant sur la répétition de 15 x 40 mètres alternés avec 25 s de récupération active, il a été montré que la vitesse des sujets, au cours des répétitions, diminuait d'autant moins que la cinétique de la phase II de $\dot{V}O_2$ était rapide (Dupont et coll, 2005). Cette adaptation de la cinétique de $\dot{V}O_2$ permettrait de limiter la réduction des réserves de PC et une resynthèse plus rapide de MbO₂ selon les auteurs. Ces résultats seraient en accord avec d'autres résultats, lors d'études similaires, qui montraient que dès le deuxième effort, la part du processus aérobie augmentait considérablement dans la production d'énergie (Gaitanos et coll, 1993 ; Balsom et coll, 1994). Il a d'ailleurs été montré que la $\dot{V}O_{2max}$ était corrélée à la performance lors des SR (Gaitanos et coll, 1993 ; Balsom et coll, 1994). Dupont et coll (2005) ont montré que la $\dot{V}O_{2max}$ et la VMA étaient corrélées à la performance lors des sprints répétés ($r=0,70$, $p<0,05$) alors qu'elles ne l'étaient pas à la vitesse maximale des sujets ($r=0,26$, $p<0,05$). La vitesse moyenne des 15 sprints représentant ~120% de la VMA mesurée lors d'un test continu, fait que cet exercice s'apparente finalement autant à un exercice de sprints répétés qu'à un exercice intermittent.

2.7.2 - RESUME

La frontière entre SR et exercices intermittents ne semble pas clairement définie. Faut-il considérer les SR comme un sous ensemble des exercices intermittents? Il semble d'ailleurs qu'au cours de ces deux types d'exercices, il existe de nombreux points communs, comme par exemple le fait qu'il y ait une implication majeure du système aérobie dans la production d'énergie. D'ailleurs pour Dupont et coll (2005), la capacité à enchaîner des sprints dépend de la capacité aérobie, de la capacité à tamponner les ions H^+ , du temps de la récupération, et de la concentration en glycogène des muscles actifs. Ces facteurs limitants sont similaires à ceux relatifs aux exercices intermittents.

D'autre part, une autre question se pose concernant la possibilité d'entraîner l'habileté à répéter des sprints (Buchheit, 2012a et 2012b ; Bishop et Girard, 2012a et 2012b) : faut-il utiliser des SR pour entraîner cette habileté (Bishop et coll, 2011) ou faut-il utiliser des exercices intermittents (Buchheit, 2008c)?

2.8 - LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE LORS DES EXERCICES INTERMITTENTS

2.8.1 - LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE

D'une façon générale la fatigue peut-être définie comme l'incapacité à maintenir une force et une puissance requises ou espérées (Edwards, 1983), ou bien comme étant la réduction de la capacité à générer une force ou un couple de force (Bigland-Richie et Woods, 1984).

Les exercices intensifs ou prolongés produisent souvent des changements de l'activité neuromusculaire. L'amplitude de ces changements et la diminution de performance concomitante sont associées à différents types de fatigue neuromusculaire qui varient en fonction de la nature des contractions musculaires, des groupes musculaires testés, de l'intensité et de la durée de l'exercice (Viitasalo et Komi, 1981 ; Häkkinen et Komi, 1983 et 1986 ; Lepers et coll, 2000a et 2000b ; Millet et coll, 2002 ; Millet et Lepers, 2004 ; Place et coll, 2007). L'étude des mécanismes sous-jacents de la fatigue peut-être réalisée à partir du temps pendant lequel une contraction isométrique sous-maximale peut-être maintenue (Place et coll, 2005 et 2007), ou à partir de l'étude de la perte de force (Place et coll, 2005 et 2007). Au cours de ces deux modalités de travail, la fatigue neuromusculaire peut-être d'origine centrale ou périphérique (Edwards, 1983 ; Gandevia, 2001).

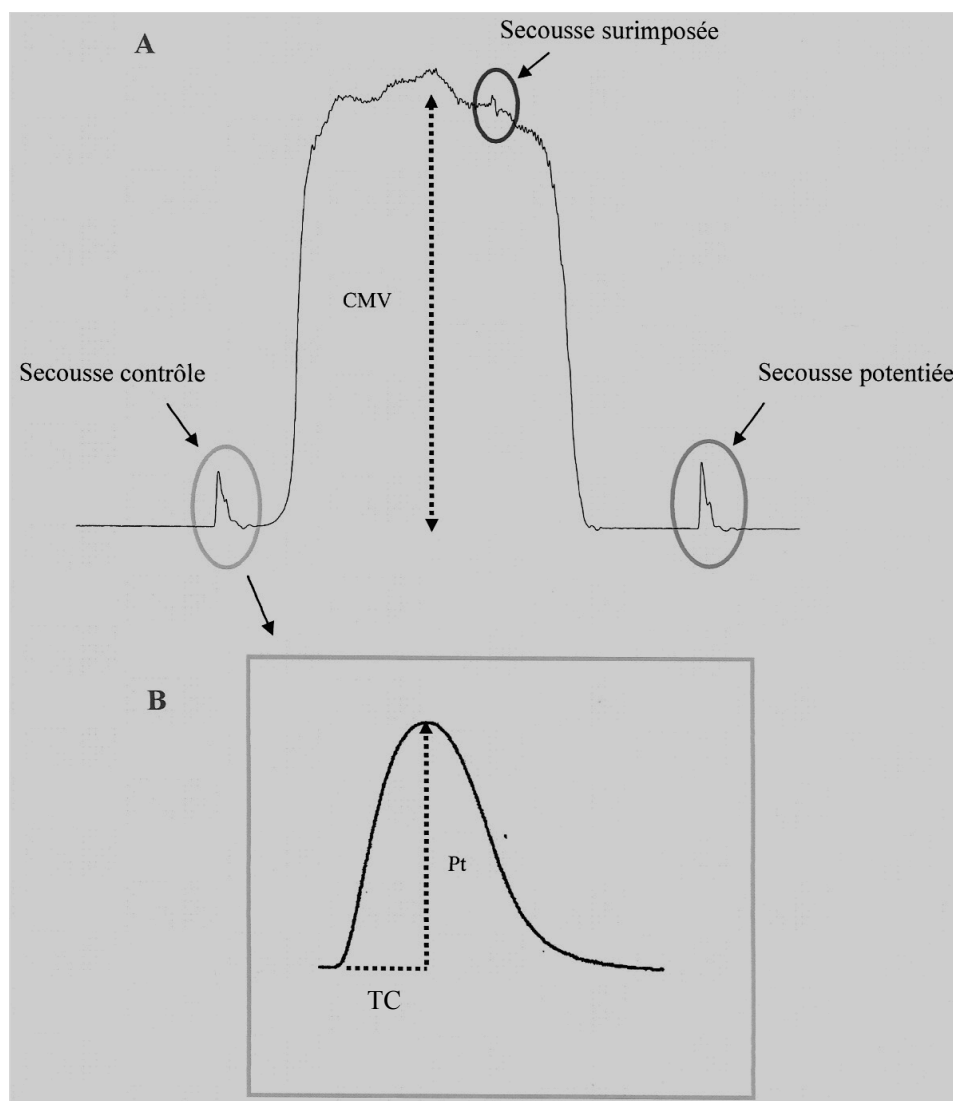
2.8.1.1 - ORIGINE CENTRALE DE LA FATIGUE

La fatigue centrale a été interprétée comme une altération de la commande nerveuse descendante survenant à la suite de contractions volontaires (Gandevia, 2001). L'altération de cette commande peut se faire au niveau supra spinal pour les raisons suivantes : une réduction de la commande nerveuse à destination des motoneurones α (Newham et coll, 1983), des modifications dans la concentration des neurotransmetteurs sérotonine et catécholamines (Guézennec, 2000), des facteurs psychologiques liés au « sens de l'effort » (Enoka et Stuart, 1992), ou encore une inhibition des aires motrices en rapport avec des signaux provenant du muscle (Gandevia, 2001). Au niveau spinal, la diminution de l'activité des motoneurones α est en rapport avec deux réflexes ayant une origine périphérique (Gandevia, 2001).

Pour étudier la fatigue liée à la commande descendante, deux techniques non invasives peuvent être utilisées : l'électromyographie (EMG) de surface et le niveau d'activation volontaire (NAV). Le signal EMG dépend de l'activité du cortex moteur, du recrutement des

unités motrices (UM) et leur fréquence de décharge (Bigland-Richie et coll, 1979). En utilisant une surimposition de stimulations électriques (twitch interpolation), il est possible d'estimer le NAV à partir de la valeur du moment développé par le groupe musculaire (figure 21).

Figure 21. - (A) Exemple de tracés mécaniques lors d'une contraction maximale isométrique volontaire (CMV) des extenseurs du genou. Trois stimulations du nerf fémoral sont effectuées, la première au repos avant (secousse contrôle), pendant (secousse surimposée), puis après (secousse potentiée) la CMV. (B) : Secousse contrôle du muscle vastus lateralis, obtenue à la suite de la stimulation du nerf fémoral, avec Pt : pic de moment ou amplitude de la secousse, et TC : temps de contraction.



Si l'ensemble des fibres musculaires est recruté de façon maximale, la stimulation exogène n'entraîne pas de réponse mécanique additionnelle. Si le moment augmente suite à

cette stimulation, alors le recrutement des UM et/ou la fréquence de décharge de ces UM sont incomplets (Belanger et McComas, 1981). Le NAV est évalué en faisant le rapport entre l'amplitude de la réponse mécanique induite (secousse surimposée), lors de la contraction volontaire maximale (CMV), et l'amplitude de la réponse mécanique évoquée (secousse contrôle), dans des conditions de repos qui précèdent la CMV (Maffiuletti et coll, 2001 ; Place et coll, 2005).

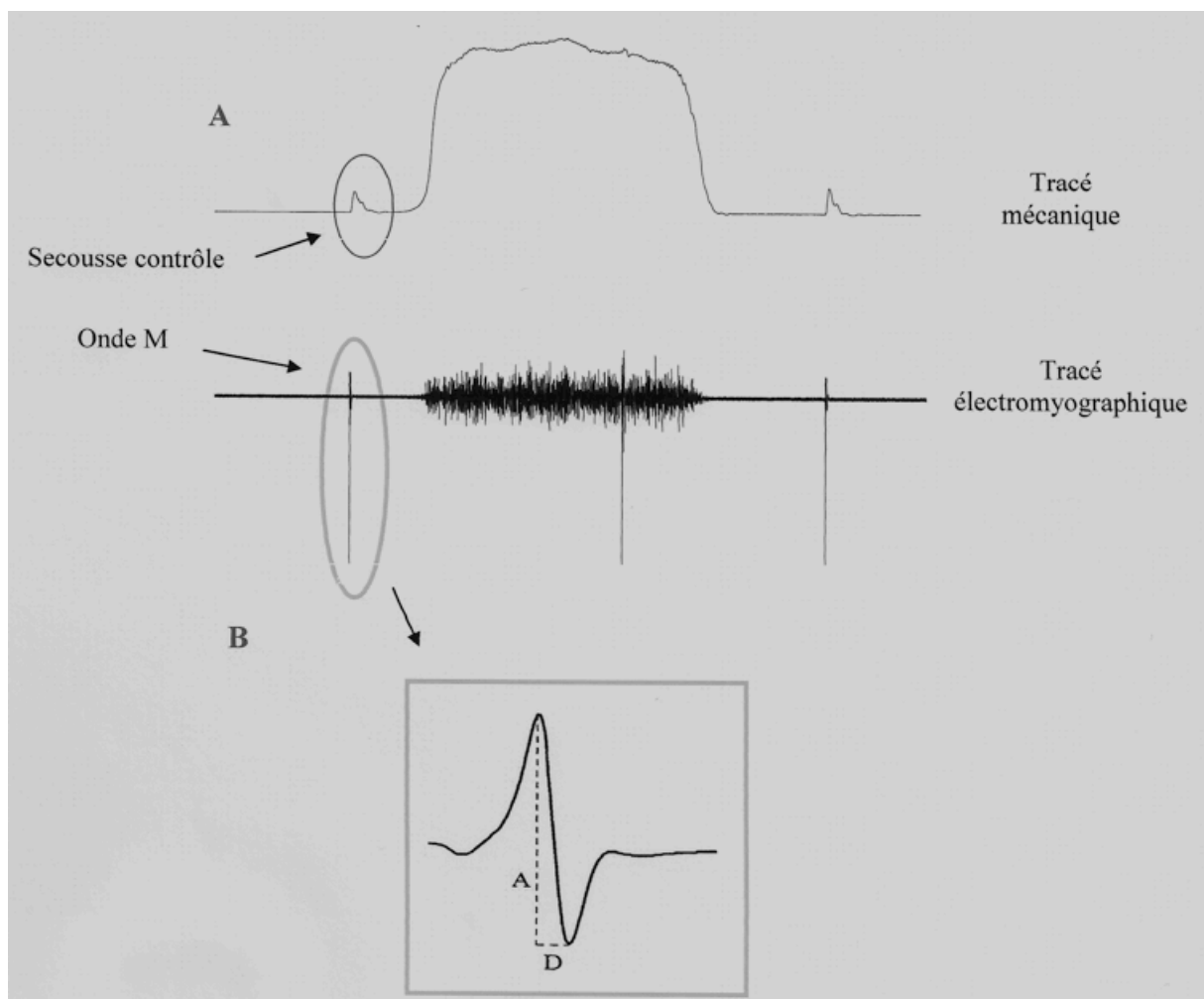
2.8.1.2 - ORIGINE PERIPHERIQUE DE LA FATIGUE

La fatigue périphérique se traduit par des changements au niveau ou en aval de la jonction neuromusculaire (Gandevia, 2001). Elle correspond à l'altération d'un ou plusieurs processus impliqués dans la production de force comme, une défaillance de la propagation nerveuse au niveau de la jonction neuromusculaire (Ingalls et coll, 1998), une accumulation d'ions H^+ (McLaren et coll, 1989), une diminution du pH musculaire (Metzger et Moss, 1990), une augmentation d'ADP et une accumulation de phosphates inorganiques (P_i) (Kentish, 1986). L'augmentation de protons H^+ entraînerait une réduction de la tension développée et une augmentation de la quantité de Ca^{2+} , nécessaire pour entretenir cette tension par rapport à des conditions sans fatigue (McLaren et coll, 1989). L'augmentation de P_i semblerait réduire la sensibilité des myofibrilles au calcium et contribuerait à réduire la force produite par chaque pont actine-myosine (Kentish, 1986 ; Allen et coll, 2008).

Pour étudier la fatigue périphérique de manière non invasive, la technique la plus utilisée et la plus simple consiste à stimuler le nerf moteur afin d'activer l'ensemble des UM, pour ensuite analyser les caractéristiques de la réponse électrophysiologique et de la réponse mécanique associée (Place et coll, 2007). En parallèle à la réponse mécanique à la secousse contrôlée (figure 22), l'enregistrement de l'activité électrique du muscle fait apparaître une onde M correspondant à la somme des potentiels d'action recueillis. Fuglevand et coll (1993) ont montré que cette réponse renseignait sur l'activité des pompes sodium-potassium, sur la propagation du potentiel d'action et sur l'excitabilité musculaire. L'amplitude et la durée pic à pic de l'onde M (A et D sur figure 22) renseignent sur les caractéristiques de la réponse électrique au niveau de la membrane musculaire (Moritani et coll, 1985). Pour ces auteurs, l'augmentation de l'onde M était en rapport avec une réduction de l'activation des UM, ce qui serait également en rapport avec les caractéristiques typologiques des fibres musculaires. Pour Fuglevand et coll (1993), l'augmentation de l'onde M refléterait une défaillance de la

transmission de l'influx nerveux au niveau de la jonction neuromusculaire et plus particulièrement une dépolarisation des UM.

Figure 22. - (A) Exemple de tracés mécaniques et électrophysiologiques (EMG) lors d'une contraction maximale isométrique volontaire (CMV) des extenseurs du genou. Trois stimulations du nerf fémoral sont effectuées, la première au repos avant, pendant, puis après la CMV. (B) : Réponse onde M du muscle vastus lateralis, d'amplitude (A) et de durée pic à pic (D).



2.8.2 - LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE A LA SUITE DES EXERCICES INTERMITTENTS

Peu d'études ont analysé la fatigue neuromusculaire, à la suite d'exercices intermittents, tels qu'ils sont utilisés dans l'entraînement en course à pied. Ainsi, il a été montré que la fatigue neuromusculaire engendrée par un exercice intermittent, était similaire à celle provoquée par un exercice continu ; cette étude utilisait un exercice intermittent complexe, simulant sur un ergomètre isocinétique la charge de travail supportée au cours d'un match de football (Mercer et coll, 1998). Il semble que l'effet d'un exercice intermittent sur la diminution de la force maximale volontaire (FMV), dépende de la forme de cet exercice. Vuorimaa et coll (2000) ont montré que les exercices de type 60s-60s et 120s-120s, courus à la VMA, n'avaient pas d'effet sur la diminution des performances musculaires (FMV et détente verticale). Par contre, à la suite d'exercices intermittents plus courts de type 5s-30s, la diminution de la FMV était significative (Perrey et coll, 2011). La fatigue neuromusculaire importante observée à la suite d'exercices intermittents intensifs (Theurel et Lepers, 2008 ; Girard et coll, 2011), serait d'ordre périphérique et centrale pour Alen et Westerblad (2010), alors qu'elle serait surtout d'ordre périphérique pour Perrey et coll (2010). Plus précisément, il a été montré qu'à la suite d'un exercice intermittent très intensif, la force maximale volontaire était réduite (de ~11%), ainsi que l'amplitude de l'onde M (de ~20%) et le niveau d'activation du muscle ("twitch interpolation", de ~3%) (Perrey et coll, 2010). A la suite d'un exercice intermittent épuisant, de type 1min-2min à 120% de la VMA, sur tapis roulant incliné à 18%, il a été montré que la fatigue trouvait son origine dans une altération du couplage excitation-contraction (Lattier et coll, 2004). Certains exercices intermittents peuvent être la cause d'une fatigue neuromusculaire importante, et il est probable qu'un niveau de fatigue préalable à la réalisation de ces exercices, réduise l'intensité à laquelle ils peuvent être réalisés, ou le temps pendant lequel ils peuvent être réalisés, voire les deux à la fois. Twist et Eston (2005) ont montré qu'à la suite d'exercices fatigants sur le plan musculaire (exercices de plyométrie), la vitesse de course au cours d'un exercice intermittent était diminuée. Il a fallu près de 72 h avant que les sujets soient capables de réaliser les exercices intermittents à leur vitesse habituelle. Pour ces mêmes auteurs, cela pose le problème de la planification des exercices intermittents et de force dans un programme d'entraînement. A ce sujet, Syrotiuk et coll (2001) ont montré qu'un entraînement combinant exercices intermittents et exercices de force avait permis une amélioration significative des performances dans un groupe de rameurs. Il a également été montré que la combinaison, d'exercices intermittents de type 3min-3min à un

fort pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$, et d'exercices de force, permettait une amélioration de la performance en course à pied (Sale et coll, 1990).

SYNTHESE ET HYPOTHESES DE TRAVAIL

2. - SYNTHÈSE ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Pour résumer cette première partie, nous pourrions reprendre une phrase tirée de l'article de Laursen et Jenkins (2001) sur les bases scientifiques des exercices intermittents : « Bien que les exercices intermittents soient utilisés depuis de nombreuses années par les entraîneurs, ce n'est que récemment que les scientifiques se sont intéressés à la compréhension des mécanismes physiologiques lors ce type d'exercices. Cependant les mécanismes physiologiques en rapport avec l'amélioration des performances suite aux exercices intermittents restent encore à éclaircir. »

Depuis les années 60 et les premiers travaux d'Astrand, si les mécanismes physiologiques des exercices intermittents ne sont pas totalement clarifiés, ce n'est pas par manque d'intérêt de la part des chercheurs, il suffit de compter le nombre de revues de questions qui traitent du sujet lors de ces dix dernières années (Laursen et Jenkins, 2001 ; Billat 2001a et 2001b ; Kubukeli, Noakes et Dennis, 2002 ; Ratel, Duché et Williams, 2006 ; Midgley, McNaughton et Wilkinson, 2006 ; Casas, 2008 ; Girard, Mendez-Villanueva et Bishop, 2011 ; Bishop, Girard et Mendez-Villanueva, 2011). Malgré cela, il ne se dégage pas de véritable consensus sur une définition des exercices intermittents.

Ce qui définit finalement le mieux les exercices intermittents, c'est le fait qu'ils diffèrent des exercices continus. L'ensemble des revues de questions citées précédemment met en exergue que l'introduction d'exercices intermittents dans un cycle d'entraînement, constitué au départ essentiellement d'exercices continus, permet une amélioration significative des performances, dans des disciplines comme la course à pied, le cyclisme, la natation. Ceci confère aux exercices intermittents un intérêt particulier. Dans les disciplines où la performance est en relation avec un grand potentiel aérobique maximal, les exercices intermittents contribuent à une augmentation de l'intensité de travail, tout en permettant de réaliser un volume de travail supérieur (à une intensité donnée) au travail continu. Un grand nombre de recherches portent d'ailleurs sur la mise en œuvre des conditions, lors des exercices intermittents, permettant de solliciter un fort pourcentage de la consommation maximale d'oxygène pendant un temps le plus long possible. Il apparaît que cinq variables peuvent influencer la qualité d'un exercice intermittent : la durée des intervalles de travail,

l'intensité, la durée des intervalles de récupération, leur intensité, le temps total de travail (Thibault et Marion, 1999). Nous avons vu que la modification de ces variables peut avoir des répercussions importantes sur le niveau de sollicitation du système aérobie. Cependant, la détermination de la vitesse de travail adaptée aux exercices intermittents pose encore des interrogations.

Dans notre première étude nous avons voulu démontrer l'intérêt d'utiliser un test incrémental intermittent de type 45s-15s pour la détermination d'une vitesse adaptée aux exercices intermittents dans l'entraînement. En plus de la détermination d'une vitesse propice à une sollicitation maximale des capacités aérobies lors des exercices intermittents, cette étude nous a permis de clarifier la définition des exercices intermittents. Cette première étude nous a permis de montrer aussi que l'exercice intermittent de type 30s-30s, réalisé à la vitesse évaluée à la fin du test 45s-15s, permet d'atteindre une sollicitation aérobie plus élevée, en comparaison du même exercice intermittent réalisé à la VMA obtenue à la suite d'un test classique continu.

Dans notre deuxième étude nous avons fait l'hypothèse que l'exercice intermittent de type 30s-30s serait un compromis optimal entre les cinq variables influençant la qualité des exercices intermittents. Pour tester ces hypothèses, nous avons comparé les réponses physiologiques obtenues au cours de trois types d'exercices intermittents: le 15s-15s, le 30s-30s et le 60s-60s.

Des données issues de la littérature scientifique montrent que les exercices intermittents courts et intensifs engendrent une fatigue musculaire importante. Il est raisonnable de penser que l'importance de la fatigue musculaire puisse dépendre du type d'exercice intermittent réalisé. Dans une troisième étude, nous avons fait l'hypothèse que le nombre d'accélérations et de décélérations, au cours d'un exercice intermittent, pouvait influencer le niveau de la fatigue musculaire. Au cours de l'étude III, nous avons donc comparé la fatigue musculaire et les réponses physiologiques lors de deux types d'exercices intermittents, le 5s-15s et le 30s-30s; réalisés suivant deux modalités différentes, sur piste et sur tapis roulant. La comparaison piste versus tapis roulant, nous a permis de formuler des hypothèses sur les causes de la fatigue musculaire observée.

Les exercices intermittents permettent une sollicitation aérobie à une intensité élevée, et un volume de travail important à cette intensité. Afin de préciser l'importance des facteurs musculaires dans la capacité à réaliser un exercice intermittent à haute intensité, nous avons dans une quatrième étude utilisé le paradigme expérimental de la pré-fatigue musculaire. En effet, il semble pertinent de se poser la question de l'impact de la fatigue musculaire sur la

capacité à répéter des exercices intermittents. Cette question est d'autant plus d'actualité que les programmes d'entraînement des coureurs de bons niveaux associent souvent des exercices pour développer l'endurance aérobie maximale et des exercices de type renforcement musculaire (Paavolainen et coll, 1999a ; Greally, 2004 ; Nummela et coll, 2006 ; Ratamess et Izquierdo, 2008). Ainsi dans l'étude IV, nous avons analysé les impacts physiologiques de deux types de pré-fatigue musculaire (contractions musculaires évoquées vs volontaires) sur la capacité à réaliser un exercice intermittent de type 30s-30s.

METHODOLOGIE GENERALE

- 2^{ème} PARTIE -

METHODOLOGIE GENERALE

Cette partie présente les matériels et méthodes de mesure des variables étudiées au cours des quatre expérimentations réalisées. L'ensemble de ces travaux a fait l'objet d'une collaboration entre :

Le laboratoire INSERM-U1093 Cognition, Action, et Plasticité Sensorimotrice. Faculté des Sciences du Sport, UFR-STAPS Dijon.

Le Centre d'Expertise de la Performance. Faculté des Sciences du Sport, UFR-STAPS Dijon.

1 - CARACTERISTIQUES DES SUJETS

Lors de l'ensemble des études expérimentales, les groupes de sujets étaient constitués d'étudiants de la Faculté des Sciences du Sport, Université de Bourgogne. Il s'agit d'un panel de jeunes sportifs d'un niveau homogène, ayant au moins 5 heures de pratique physique hebdomadaire. Pour l'ensemble des études, il a été demandé aux sujets de ne pas s'impliquer dans une compétition ou un entraînement épuisant au cours des 48 heures qui précédaient chaque session de test. Avant le début de chaque étude, l'ensemble des sujets a été précisément informé sur le déroulement et les mesures réalisées au cours des sessions expérimentales, sans omettre de préciser les difficultés des tâches à réaliser. A la fin de chaque expérimentation, une présentation écrite et orale des résultats a été réalisée à l'attention des sujets. Le tableau IV reprend l'ensemble des caractéristiques des sujets des quatre expérimentations.

Sujets	Etude I	Etude II	Etude III	Etude IV
Nbre de sujets	20	18	13	17
Poids (kg)	71,0±7,0	75±7,5	72,3±6,6	73,8±6,9
Taille (cm)	178,0±6,0	180,0±6,0	177,4±5,7	179,1±5,0
Age (années)	20,0±0,6	21,0±1,0	20,6±0,8	21,1±1,2
$\dot{V}O_{2\max}$ (mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	58,6±5,9	51,2±4,6	60,0±5,0	61,4±4,8

Tableau IV : Caractéristiques biométriques et bioénergétiques des sujets des 4 études. Les valeurs sont Moyenne ± ET (Ecart-Type).

2 - PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

Quatre études ont été réalisées dans le cadre de cette thèse, les protocoles expérimentaux en sont les suivants:

L'étude I (n=20). Les sujets ont d'abord réalisé deux tests incrémentaux, un test sur tapis roulant (TR) et un test intermittent progressif 45s-15s (45-15_{FIT}) sur piste, dans un ordre aléatoire, permettant de déterminer la $\dot{V}O_{2\max}$, la [La], la F_{Cmax}, et la VMA lors de chaque test. Les sujets ont ensuite réalisé 4 sessions d'exercices intermittents, dans un ordre aléatoire et à une semaine d'intervalle. Une session était composée d'un exercice intermittent, 30s-30s, alternant des périodes d'effort à la VMA évaluée lors du test TR (VMA_{TR}) avec des périodes de récupération passive (30-30_{TR/RP}). Une autre session était composée d'un exercice intermittent 30s-30s, alternant des périodes d'effort à la VMA_{TR} avec des périodes de récupération active (30-30_{TR/RA}). Une autre session était composée d'un exercice intermittent 30s-30s, alternant des périodes d'effort à la VMA évaluée lors du test 45-15_{FIT} avec des

périodes de récupération passive (30-30_{45-15FIT/RP}). Une autre session était composée d'un exercice intermittent 30s-15s, alternant des périodes d'effort à la VMA_{TR} avec des périodes de récupération passive (30-15_{TR/RP}). Dans l'ensemble des sessions d'exercices intermittents, la durée totale, effort plus récupération, était fixée à 15 minutes.

L'étude II (n=18). Après avoir réalisé un test 45-15_{FIT} permettant de déterminer la $\dot{V}O_{2max}$, la [La], la F_{Cmax}, et la VMA_{45-15FIT}, les sujets ont réalisé 3 sessions d'exercices intermittents, à une semaine d'intervalle, et dans un ordre aléatoire. Lors de chacune des sessions, il s'agissait pour le sujet de réaliser le plus grand nombre de répétitions possibles ou temps limite (tlim). Chaque sujet était arrêté quand il ne pouvait plus parcourir la distance correspondant à la vitesse de course déterminée. Une session était composée d'un exercice intermittent 15s-15s, alternant des périodes d'effort à la VMA_{45-15FIT}, avec des périodes de récupération passive (tlim₁₅₋₁₅). Une autre session était composée d'un exercice intermittent 30s-30s, alternant des périodes d'effort à la VMA_{45-15FIT} avec des périodes de récupération passive (tlim₃₀₋₃₀). Une autre session était composée d'un exercice intermittent 60s-60s, alternant des périodes d'effort à la VMA_{45-15FIT} avec des périodes de récupération passive (tlim₆₀₋₆₀). L'ensemble des exercices a été réalisé sur une piste d'athlétisme.

L'étude III (n=13). Après avoir réalisé un test 45-15_{FIT}, permettant de déterminer la $\dot{V}O_{2max}$, la [La], la F_{Cmax}, et la VMA_{45-15FIT}, les sujets ont réalisé 4 sessions d'exercices intermittents, à une semaine d'intervalle. Lors des deux premières sessions, les sujets ont réalisé, dans un ordre aléatoire, un exercice intermittent 5s-15s sur piste, ou un exercice intermittent 30s-30s sur piste, ceci le plus longtemps possible et à la VMA_{45-15FIT} (tlim_{5-15PISTE} et tlim_{30-30PISTE}). Lors de la 3^{ème} session, les sujets ont réalisé un exercice intermittent 5s-15s sur tapis roulant, le temps de travail était identique au tlim₅₋₁₅. Lors de la 4^{ème} session, les sujets ont réalisé un exercice intermittent 30s-30s sur tapis roulant, ils ont réalisé le plus de répétitions possibles (tlim_{30-30TR}). Au cours de chaque session, des mesures de force maximale isométrique des muscles extenseurs du genou ont été réalisés avant et juste après les exercices intermittents.

L'étude IV (n=17). Après avoir réalisé un test 45-15_{FIT}, permettant de déterminer la $\dot{V}O_{2max}$, la [La], la F_{Cmax}, et la VMA_{45-15FIT}, les sujets ont réalisé 3 sessions d'exercices

intermittents, à une semaine et quinze jours d'intervalle. Lors de la première session, les sujets ont réalisé un exercice intermittent 30s-30s sur piste, le plus longtemps possible à la VMA_{45-15FIT} (tlim_{30-30PISTE}). La force maximale isométrique des extenseurs du genou et l'activité électromyographique des muscles Vastus Medialis (VM), Vastus Lateralis (VL) et Rectus Femoris (RF) ont été enregistrées juste avant et juste après l'exercice intermittent. Lors d'une autre session, les sujets ont effectué un tlim_{30-30PISTE}, précédé d'un exercice fatigant (contractions isométriques volontaires). Lors d'une autre session, les sujets ont effectué un tlim_{30-30PISTE}, précédé d'un autre exercice fatigant (contractions isométriques évoquées par électrostimulation). La force maximale isométrique des muscles extenseurs du genou et l'activité électromyographique des muscles VM, VL et RF ont été enregistrées avant et juste après l'exercice musculaire fatigant et juste après l'exercice intermittent.

3 - MESURES

3.1 - MESURE DE LA VMA

Lors de l'étude I, la VMA a été mesurée selon deux protocoles différents, lors d'un test sur tapis roulant (TR) et lors d'un test sur piste le 45-15_{FIT}. Pour déterminer la VMA des sujets lors des études II, III, et IV, le test 45-15_{FIT} a été utilisé.

3.1.1 - TEST SUR TAPIS ROULANT

Il s'agit d'un test continu sur tapis roulant (Ergo-Fit Trac 3000 Alpin) au cours duquel la vitesse était augmentée de 0,5 km.h⁻¹ toutes les minutes. La vitesse de début du test avait été fixée à 8 km.h⁻¹, la VMA était retenue comme la vitesse la plus élevée ayant été soutenue lors du dernier palier complètement effectué. Le tapis était incliné avec une pente de 1%.

3.1.2 - TEST 45-15_{FIT}

Il s'agit d'un test incrémental intermittent proposé par G. Gacon en 1994. L'incrémentation de la vitesse au cours du test est similaire à celle du TR, c'est-à-dire une augmentation de 0,5 km.h⁻¹ toutes les minutes. Ce qui diffère par rapport au test continu, c'est le fait que toutes les 45 secondes il y a une période de récupération passive de 15 secondes.

Lors des 45 premières secondes du test, le sujet parcourt une distance de 100 m située entre un plot identifié comme le point de départ (plot D) et le plot 1 (figure 23). En parcourant la distance de 100 m en 45 s, il court à une vitesse de 8 km.h^{-1} . Il fait alors une pause de 15 s et se place au plot 2, située à 6,25 m de la balise 1. A la fin du temps de récupération, il court (dans le sens contraire de l'aller) une nouvelle fois 45 s en direction du plot D. Il a parcouru 106,25 en 45 s ($v = 8,5 \text{ km.h}^{-1}$). A chaque nouvelle tentative, le sujet parcourt 6,25 m de plus par rapport à l'effort précédent, incrémentant ainsi la vitesse de $0,5 \text{ km.h}^{-1}$. Il continue le test jusqu'au moment où il ne parvient plus à réaliser la distance prévue. La VMA correspond à la vitesse atteinte lors du dernier palier entièrement effectué.

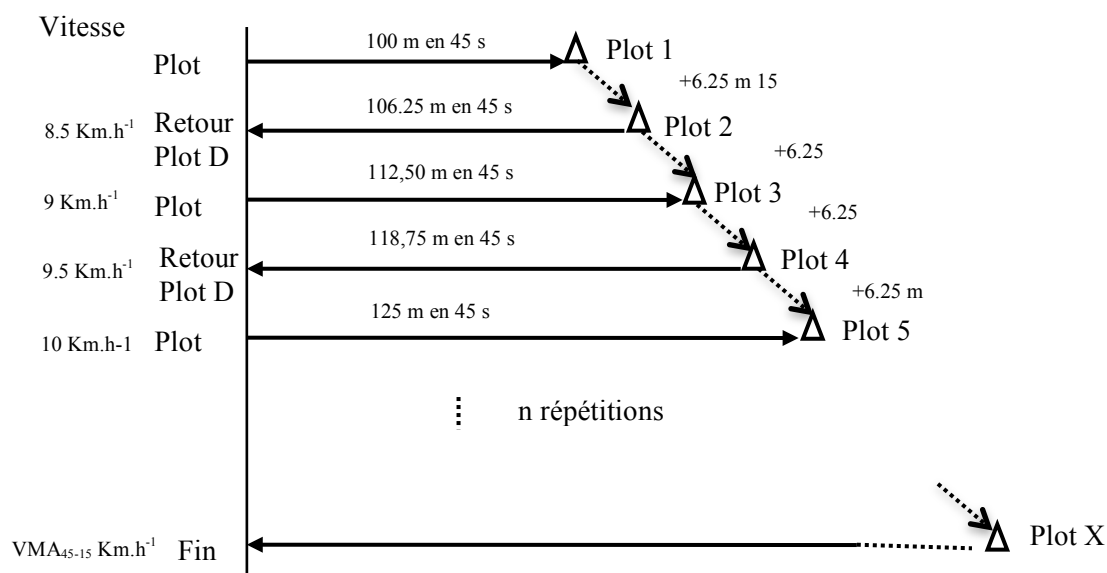


Figure 23. - Test 45-15_{FIT}.

3.2 - MESURE DU TEMPS LIMITE

Lors des études II, III et IV des mesures de tlim ont été effectuées lors des exercices intermittents. Il s'agissait, pour les sujets, de réaliser le plus de répétitions possibles à leur VMA₄₅₋₁₅. Lors de ces tlim, les sujets étaient arrêtés quand, malgré les encouragements, ils n'arrivaient plus à parcourir la distance fixée. Le tlim correspondait à la durée totale (efforts + récupérations) de l'exercice intermittent réalisé.

3.3 - RECUEIL DES VARIABLES METABOLIQUES

3.3.1 - ANALYSE DES ECHANGES GAZEUX RESPIRATOIRES

Pour l'ensemble des expérimentations, il a été utilisé un système portable d'analyse télémétrique (figure 23) qui permettait de mesurer les échanges gazeux respiratoires dans les conditions réelles de l'activité physique (type Cosmed K4b2, Rome Italie). Le K4b2 a été validé par Hausswirth et coll (1997), Mc Laughlin et coll (2001), Duffield et coll (2004), il permet de mesurer le débit ventilatoire, la consommation d'oxygène, la production de gaz carbonique ainsi que la F_C . Alors que le calcul du quotient respiratoire (QR) peut parfois être surestimé, le K4b2 permet d'obtenir une mesure précise de $\dot{V}O_2$ quelque soit le niveau d'intensité de l'exercice (Koh et Jeong, 2007).



Figure 24. - Sujets équipés d'un K4b2 lors d'un 45-15_{FIT}.

L'unité portable (figure 24) est portée par les sujets à l'aide d'un harnais. Elle est reliée au sujet par l'intermédiaire d'un masque facial souple à l'extrémité duquel est fixé une turbine. Le flux d'air expiré provoque la rotation de cette turbine, qui grâce à un lecteur optoélectronique, calcule le nombre de rotations de la turbine par seconde. Le système mesure le flux d'air, calcule le nombre de cycles respiratoires par minute et calcule le débit

expiratoire. L'air expiré est également conduit depuis le masque, par l'intermédiaire d'un tube capillaire semi-perméable (Permapure) qui évacue l'humidité en excès dans l'unité portable. Un capteur électronique permet de mesurer la fraction d'O₂ (FeO₂) contenu dans le gaz expiré. La fraction de CO₂ (FeCO₂) est aussi évaluée à l'aide d'une électrode infrarouge. Les paramètres mesurés sont $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, VE, FR, QR et FC. L'enregistrement est réalisé en mode cycle par cycle, il peut ensuite être moyenné. L'ensemble de nos mesures a été moyenné toutes les 5 secondes. Nous avons d'ailleurs observé que le fait de moyenner les mesures toutes les 10 secondes avait pour effet d'augmenter les valeurs moyennes de $\dot{V}O_2$, alors que le fait de les moyenner toutes les 3 secondes n'engendrait aucune différence avec 5 secondes. Pour calculer $\dot{V}O_2$, le système se base sur l'équation suivante:

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_E \times (FiO_2 - FeO_2)$$

- ✓ $\dot{V}O_2$: la consommation d'oxygène par minute (L.min⁻¹), elle a été rapportée au poids de corps des sujets lors de nos expérimentations et a été exprimée en ml.kg⁻¹.min⁻¹.
- ✓ $\dot{V}_E$: la ventilation (L.min⁻¹).
- ✓ FiO_2 : la fraction d'O₂ dans l'air inspiré (en %).
- ✓ FeO_2 : la fraction d'O₂ dans l'air expiré (en %).

L'appareil était mis en route 1 heure avant le début de chaque session expérimentale, la température interne devant atteindre au moins 29° pour un fonctionnement correct des analyseurs d'O₂ et de CO₂. Il était nécessaire de calibrer l'appareil avant le passage de chaque sujet, et ceci bien que les recommandations du constructeur préconisent une calibration par session. La calibration de l'appareil s'effectue en 4 étapes qui doivent se dérouler dans l'ordre suivant :

- ✓ Une calibration de la turbine. Celle-ci consiste à utiliser une seringue d'un volume de 3 litres, permettant de calibrer la vitesse de rotation de la turbine dans le lecteur optoélectronique afin que l'appareil mesure précisément (à 0,0001 litre prêt) le volume expiré.

- ✓ Une calibration des gaz. Une bouteille de gaz étalon (15% d'O₂ et 5% de CO₂) est utilisée pour calibrer les analyseurs d'O₂ et de CO₂. A noter que cette calibration requiert une grande attention, qu'il est souvent nécessaire de l'effectuer au moins deux fois et ceci même quand le système annonce une calibration réussie. Nous avons formulé auprès du constructeur qu'il pouvait exister une légère différence entre la concentration de gaz étalon et la mesure réalisée par le K4b2, et que pour parfaire cette mesure, il suffisait d'effectuer une nouvelle calibration après une calibration effectuée avec succès. Le logiciel réglant le protocole de fonctionnement de la calibration a d'ailleurs évolué dans ce sens.
- ✓ Une calibration du délai. Il s'agit de calibrer le temps que met le flux d'air pour atteindre les analyseurs d'O₂ et de CO₂ en parcourant le trajet qui les relie au masque par l'intermédiaire du Permapure.
- ✓ Une calibration de l'air ambiant. Celle-ci est réalisée au départ du test.

3.3.2 - ANALYSE DE LA F_C

L'enregistrement de la F_C se fait simultanément par l'intermédiaire du K4b2 et un cardio fréquence mètre de type S610i ou RX800 (Polar Electro, Kempele, Finlande). Les enregistrements de F_C ont été moyennés toutes les 5 secondes sur l'ensemble des sessions expérimentales.

3.3.3 - DETERMINATION DE V_{O₂MAX}

La consommation maximale d'oxygène, ou $\dot{V}O_{2\max}$, est le niveau maximum d'oxygène qui, tiré de l'air ambiant, peut-être transporté et utilisé par les cellules musculaires au cours de l'activité physique (Hill, 1923). Bien que la pertinence de la mesure de la $\dot{V}O_{2\max}$ au cours d'un test incrémental ait été discutée (Noakes, 1998 ; Noakes et St Clair Gibson, 2004), un ensemble de critères a été proposé afin de s'assurer de la pertinence de cette mesure (Midley et coll, 2007 ; Foster et coll, 2007).

Nous avons finalement retenu que $\dot{V}O_{2\max}$ correspondait au niveau de $\dot{V}O_2$ le plus élevé atteint au cours d'une période d'au moins 30 secondes lors des tests incrémentaux

réalisés. Il a été considéré que $\dot{V}O_{2\max}$ était atteinte quand les critères suivants étaient respectés (Howley et coll, 1995) :

- ✓ Il était observé un plateau de $\dot{V}O_{2\max}$ bien que l'intensité de course puisse continuer à s'accroître (Taylor et coll, 1955).
- ✓ Le Q_R était supérieur à 1,15 à la fin du test.
- ✓ La F_C mesurée à la fin du test ($F_{C\max}$) était comparable (écart toléré de 10 bpm) à la $F_{C\max}$ théorique calculée à partir de la formule de Spiro (1977) : $F_{C\max} = [210 - (0,65 \times \text{âge})]$.
- ✓ Une $[La]$ à la fin de l'exercice supérieure à 8 mmol.l⁻¹.

3.3.4 DETERMINATION DU TEMPS PASSE A PLUS DE 90% DE $\dot{V}O_{2\max}$

Afin d'évaluer l'impact des exercices intermittents sur la sollicitation du système aérobie, il a été mesuré le temps pendant lequel la $\dot{V}O_2$ était supérieure à 90% de la $\dot{V}O_{2\max}$. Ce temps a été exprimé en seconde ou en pourcentage du temps total de l'exercice.

3.4 - MESURE DE LA LACTATEMIE

Une mesure de la lactatémie a été systématiquement réalisée avant et après chaque test VMA. Cette mesure avait également été réalisée à l'arrêt de chaque session d'exercices intermittents. Dans l'ensemble des expérimentations, une goutte de sang a été prélevée au bout d'un doigt et a été analysée à l'aide d'un analyseur portable de lactate (Lactate Pro, Arkray KDK, Japan), technique et outil validés par Tanner et coll (2010). L'échantillon sanguin était prélevé en moyenne 2 min après l'arrêt de l'exercice.

3.5 - MESURE DU MOMENT OU DE LA FORCE MAXIMALE VOLONTAIRE ISOMETRIQUE

Au cours de l'étude III et IV, le moment (ou la force) correspondant à une contraction maximale volontaire a été évalué, mesuré par l'intermédiaire de deux ergomètres. Pour l'étude

III, il s'agissait d'un ergomètre (figure 24 a) développé au sein de notre laboratoire, et pour l'étude IV il s'agissait d'un ergomètre isocinétique de type Biodex (figure 24 b). Pour ces deux études, des contractions isométriques ont été réalisées par les muscles extenseurs du genou. Lors des contractions maximales volontaires isométriques, le moment (ou la force) maximal isométrique développé au niveau de l'articulation du genou était évalué (le meilleur des trois essais réalisés par sujet étant retenu).



Figure 24 a. - Ergomètre "genou" : la force musculaire était évaluée à l'aide d'une jauge de contrainte (sensibilité: 1,993 mV/V et 0,0049 V/N ; SBB 200 kg, Allegro, Sallanches, France) reliée à une machine à quadriceps (Multi-form, la Roque d'Anthéron, France). Les sujets sont assis (angle de la hanche = 90°, angle au niveau du genou = 80°).

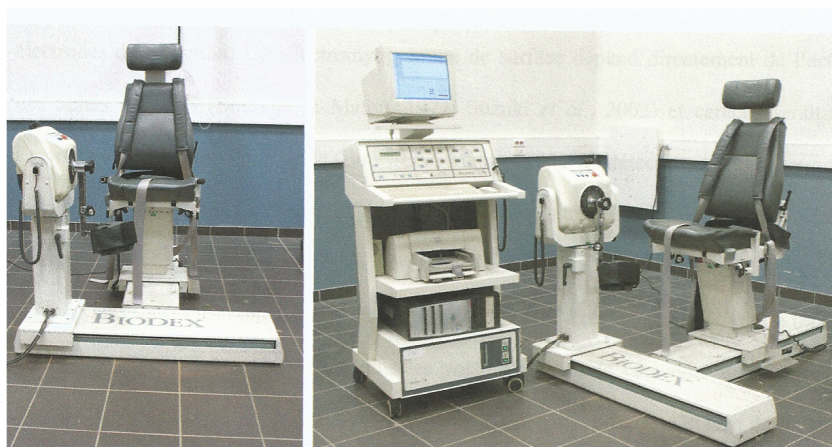


Figure 24 b. - Ergomètre de type Biodex (Biodex Corporation, Shirley, New-York, Etats Unis) qui a permis d'évaluer le moment musculaire lors de l'étude IV.

3.6 - MESURE DE L'ACTIVITE ELECTROMYOGRAPHIQUE

3.6.1 - ELECTROMYOGRAPHIE DE SURFACE

Au cours de l'étude 4, l'activité électrique des muscles a été enregistrée par électromyographie de surface (Bouisset et Maton, 1995). La détection du signal a été réalisée par dérivation bipolaire à l'aide d'une paire d'électrodes de surface en chlorure d'argent de 10 mm de diamètre (Contrôle graphique Médical, Brie-Comte-Robert, France). Le signal EMG était détecté sur les chefs superficiels du muscle quadriceps, vastus lateralis (VL), vastus medialis (VM) et rectus femoris (RF) (Figure 25 a). Pour le VL, Les électrodes étaient positionnées aux 2/3 de la ligne épine iliaque antéro-supérieure et bord externe de la rotule. Pour le VM, elles étaient positionnées aux 4/5 de la ligne iliaque antéro-supérieure et bord interne de la rotule. Pour le RF à 1/2 de la ligne épine iliaque antéro-supérieure et partie supérieure de la rotule. Les électrodes étaient mises en place après avoir rasé, poncé et dégraissé la peau, elles pouvaient être ajustées afin d'obtenir une amplitude de l'onde M maximale en réponse à la stimulation du nerf fémoral. L'électrode de référence était fixée sur la rotule de la jambe droite (figure 25 b). Le signal EMG a été enregistré avec une fréquence d'échantillonnage de 2kHz, filtré via une bande passante de 10 Hz à 5 Hz et amplifié avec un gain de 1000, via un convertisseur analogue-numérique multicanaux (Biopac Systems Inc, Etats-Unis).

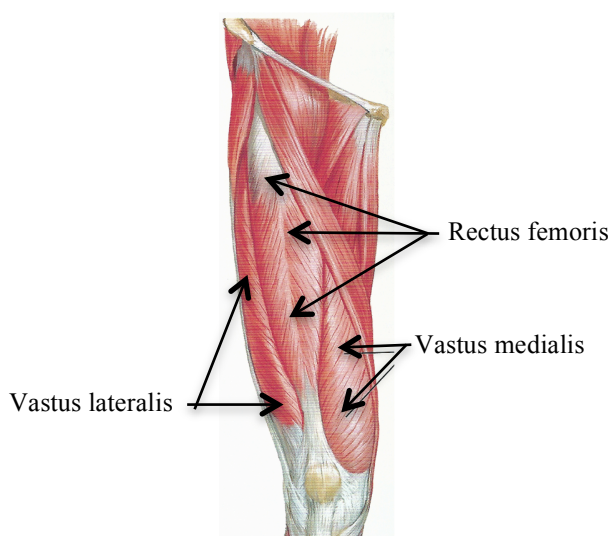


Figure 25 a. - Schéma anatomique du muscle quadriceps.

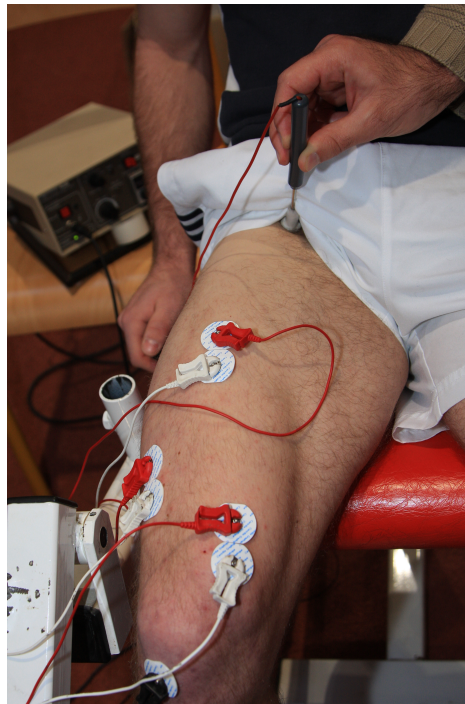


Figure 25 b. -Emplacement des électrodes sur VL, RF et VM et positionnement de l'électrode de stimulation (ou cathode) au niveau du triangle fémoral.

3.6.2 - NEUROSTIMULATION

La technique utilisée consiste à appliquer, sur le muscle au repos, une stimulation électrique sur le trajet du nerf moteur (ici nerf fémoral, figure 25 b) avec une intensité et une durée suffisantes pour provoquer une réponse maximale du muscle (Desmedt, 1958). A la suite de cette stimulation, deux réponses sont enregistrées :

- ✓ La réponse EMG, qui correspond à l'excitation maximale et la synchronisation des UM ou onde M ("M-wave").
 - ✓ La réponse mécanique associée qui correspond à la sommation des réponses mécaniques unitaires de ces mêmes UM ou secousse musculaire ("twitch").
- L'onde M maximale correspond à l'activation simultanée de toutes les UM (Hugon, 1973).

Dans nos études, le muscle quadriceps femoris était stimulé à partir d'un choc double (doublet à 100 Hz) délivré de façon percutané au niveau du nerf fémoral (3 à 5 cm sous le ligament inguinal), avec une électrode sphérique de tungstène (~5 mm de diamètre) (figure 29

b). Un neurostimulateur de type Digitimer DS7 (digitimer, Hertfordshire, Grande-Bretagne) était utilisé. Il produisait des impulsions rectangulaires, d'une durée de 10 mA, délivrées à une tension maximale de 400 V avec une incrémentation de 10 mA, l'intensité variant de 50 à 100 mA en fonction des sujets.

Nous avons également utilisé la technique de stimulation du nerf moteur lors des contractions maximales volontaires, ou technique de secousse surimposée ("twitch interpolation") mise au point par Merton (1954). Si à la suite de cette secousse surimposée, il n'y a pas de réponse mécanique additionnelle à la CMV, il était alors considéré que la réponse mécanique était le reflet du niveau d'activation maximal volontaire de l'ensemble des UM du groupe musculaire sollicité. S'il y avait un incrément du moment, alors il était considéré que le recrutement des UM était incomplet et/ou que la fréquence de décharge de certaines UM était sous maximale (Belanger et McComas, 1981). Afin de déterminer le niveau d'activation maximal volontaire dans les études III et IV, des doublets ont été délivrés ~3 s avant la CMV (doublet au repos), puis au moment du plateau isométrique de la CMV (doublet surimposé) et ~3 s après la CMV (doublet potentialisé).

Pour calculer le niveau d'activation maximal volontaire (NAV) avec le doublet potentialisé, nous avons utilisé la formule suivante (Allen et coll, 1995) :

$$NAV = \left[1 - \frac{\text{amplitude du doublet surimposé}}{\text{amplitude du doublet potentialisé}} \right] \times 100$$

Lorsque la surimposition n'était pas appliquée au pic de la CMV, nous avons utilisé la correction initialement proposée par Strojnik et Komi (1998). Dans ce cas l'équation suivante était utilisée:

$$NAV = \left[1 - \frac{\text{amplitude du doublet surimposé} \times (M \text{ stim}/CMV)}{\text{amplitude du doublet potentialisé}} \right] \times 100$$

3.7 - ELECTROMYOSTIMULATION DE SURFACE

Lors de l'étude IV, nous avons utilisé la myostimulation avec un courant rectangulaire, avec une impulsion monophasique. La fréquence était de 75 Hz (Vanderthommen et coll, 1992) avec une durée d'impulsion de 0,40 ms. La durée de stimulation était de 5 s et la durée de récupération de 20 s, avec une intensité moyenne de 74 mA et ceci au cours de 30 stimulations consécutives (Zory et coll, 2005 ; Gondin et coll, 2006 et Maffiuletti, 2010). L'intensité pouvait varier de 25 mA à 94 mA, suivant les sujets, dont l'objectif était de maintenir une contraction représentant $40 \pm 10\%$ de CMV. Pour réaliser cette stimulation, un myostimulateur (Compex Médical SA, Eclublens, Suisse) a été utilisé. Deux électrodes positives auto-adhésives (5 x 5 cm, Compex Médical SA, Eclublens, Suisse) placées respectivement sur le point moteur du VM et du VL, et une électrode négative auto-adhésive (10 x 5 cm, Compex Médical SA, Eclublens, Suisse) placée près de l'insertion proximale du RF, ont été utilisées pour conduire le courant.

PRESENTATION DES TRAVAUX
EXPERIMENTAUX

ETUDE I

COMPARAISON DU TEST DE TERRAIN INTERMITTENT 45S-15S ET DU TEST CONTINU SUR TAPIS ROULANT

TITRE ORIGINAL: COMPARISON OF THE 45S-15S INTERMITTENT RUNNING FIELD TEST AND THE CONTINUOUS TREADMILL TEST

Cet article a été accepté pour publication dans la revue International Journal of sports Physiology and performance, dans le numéro 7(3) de septembre 2012 sous la référence :

Assadi H, Lepers R. (sous presse) - Comparison of the 45s-15s intermittent running field test and the continuous treadmill test. Int J Sports Physiol Perf.

Comparison of the 45s-15s intermittent running field test and the continuous treadmill test

Hervé Assadi, Romuald Lepers

INSERM U887, Faculty of Sport Sciences, University of Burgundy, Dijon, France

Abstract

Purpose: i) to compare the physiological responses and maximal aerobic running velocity (MAV) during an incremental intermittent (45s run/ 15s rest) field test (45-15_{FIT}) *versus* an incremental continuous treadmill test (TR); ii) to demonstrate that the MAV obtained during 45-15_{FIT} (MAV₄₅₋₁₅) was relevant to elicit a high percentage of maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) during a 30s-30s intermittent training session. **Methods:** Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), heart rate (HR), and lactate concentration [La] were measured in 20 subjects during two maximal incremental tests and four 15-min intermittent tests. The time spent above 90 and 95% $\dot{V}O_{2\max}$ (t₉₀ and t_{95%} $\dot{V}O_{2\max}$, respectively) was determined. **Results:** Maximal physiological parameters were similar during both 45-15_{FIT} and TR test ($\dot{V}O_{2\max}$: 58.6 ± 5.9 ml.kg⁻¹.min⁻¹ for TR *vs* 58.5 ± 7.0 ml.kg⁻¹.min⁻¹ for 45-15_{FIT}; HR_{max}: 200 ± 8 bpm for TR *vs* 201 ± 7 bpm for 45-15_{FIT}). MAV₄₅₋₁₅ was significantly ($P < 0.001$) greater than MAV_{TR} (17.7 ± 1.1 km.h⁻¹ *vs* 15.6 ± 1.4 km.h⁻¹). t_{90%} $\dot{V}O_{2\max}$ and t_{95%} $\dot{V}O_{2\max}$ during the 30s-30s performed at MAV_{TR} were significantly ($P < 0.01$) lower compared to the 30s-30s performed at MAV₄₅₋₁₅. Similar $\dot{V}O_2$ during intermittent tests performed at MAV₄₅₋₁₅ and at MAV_{TR}, can be obtained by reducing the recovery time or using active recovery. **Conclusions:** The present results suggested that the 45-15_{FIT} is an accurate field test to determine $\dot{V}O_{2\max}$ and that MAV₄₅₋₁₅ can be used during a high intensity intermittent training such as 30s run interspersed with 30s rest (30s-30s) to elicit a high percentage of $\dot{V}O_{2\max}$.

Keywords: Maximal oxygen uptake, Maximal Aerobic Velocity, Running field test, Interval training, Incremental test.

INTRODUCTION

Intermittent exercise is frequently used by athletes during training in order to improve performance.¹⁻⁶ The major interest of intermittent exercise compared to continuous exercise is the possibility to maintain greater work intensities for longer durations.^{5,7} It has been shown that the running velocity sustained during an intermittent exercise has a significant incidence on the oxygen uptake ($\dot{V}O_2$)⁸ and that the increase in maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$), following an intermittent training period, depended on the work intensity rather than on the frequency or the duration of training.^{9,10} The determination of the adequate running velocity during an intermittent training session thus appears critical, especially to reach the highest level of oxygen uptake.^{11,12} Incremental continuous or intermittent treadmill tests but also, field tests are currently used to determine $\dot{V}O_{2\max}$ and the corresponding maximal aerobic velocity (MAV). However, the MAV reached during these tests did not correspond to the velocity that elicits the highest work intensity (i.e. the highest percentage of $\dot{V}O_{2\max}$) during intermittent training session.^{13,14}

The intermittent running exercise, consisting in 30s work intersected with 30s rest (30s-30s), is frequently used for training.^{1,11,12} However no consensus really exists regarding the adequate velocity to perform a 30s-30s intermittent exercise, in order to elicit the highest $\dot{V}O_2$ during the exercise. The velocity at which the 30s-30s intermittent work is performed in order to elicit a high $\dot{V}O_2$ during the training session, varying in the literature from 100%¹⁵, 105%¹¹, 110%, 120% to 140%¹⁶⁻¹⁸ of the MAV. These data show that the MAV determined by a continuous incremental test is lower than the velocity required to elicit $\dot{V}O_{2\max}$ during a 30s-30s exercise. The determination of MAV by an intermittent incremental test could therefore be more adapted because of observed values being systematically higher during the 30s-30s exercise. Recently, Bucheit (2008) proposed to use a velocity corresponding to 95% of the velocity reached at the end of a 30s-15s intermittent fitness test.¹⁹ In this case, the MAV reached at the end of the intermittent test was greater than the velocity that the subject can sustain during a 30s-30s exercise. It was probably due to a short running time in comparison with the recovery time. In this context, the field intermittent test (FIT) consisting of a 45s run alternated with a 15s rest (45-15_{FIT}), proposed by Georges Gacon (French National Team Manager of Middle-Distance race runners from 1984 to 1994) in 1994, seems more appropriate. Gacon assumed that the velocity reached at the end of the 45-15_{FIT} was well adapted for a 30s-30s intermittent training session, i.e. which may elicit a high percentage of $\dot{V}O_{2\max}$ during the exercise. However, this assumption has never been experimentally validated.

In this context, the first aim of the present study was to compare the maximal physiological responses and running velocity reached during the 45-15_{FIT} vs a traditional incremental continuous treadmill test (TR). The second aim of this study was to demonstrate that the final velocity during the 45-15_{FIT} is particularly relevant to elicit a high percentage of $\dot{V}O_{2\max}$ during a 30s-30s intermittent training session. To achieve this second aim, we firstly compared the physiological responses during a 30s-30s intermittent exercise performed at the velocity reached during the 45-15_{FIT} (MAV₄₅₋₁₅) vs. the velocity reached during a traditional

incremental continuous test on a treadmill (MAV_{TR}). Secondly, we changed the modalities of recovery (passive *vs* active) and the duration of the recovery (30 s *vs* 15 s) during the 30s-30s intermittent exercise and examined the effects on $\dot{V}O_2$ responses. In accordance with Thevenet et al¹², we used the time spent above 90 and 95% of $\dot{V}O_{2\max}$ ($t_{90\dot{V}O_{2\max}}$ and $t_{95\dot{V}O_{2\max}}$, respectively) as a criterion to judge the effectiveness of a high level of aerobic contribution during the different intermittent training modalities. It was hypothesised firstly that the MAV_{45-15} would be greater than the MAV_{TR} , and secondly that the MAV_{45-15} would be more appropriate to elicit the highest fraction of $\dot{V}O_{2\max}$ during a 30s-30s exercise compared to the MAV_{TR} .

METHODS

Subjects

Twenty male students from the Faculty of Sport Sciences (age: 20 ± 6 (SD) years, body mass: 71 ± 7 kg, height: 178 ± 6 cm) volunteered to participate in this study after they were informed in detail about the nature of the experiment and possible risks. Written informed consent was given by each subject and the study was conducted according to the Declaration of Helsinki. A local ethics committee for the protection of individuals gave approval concerning the project before its initiation. Subjects had regularly trained in team sports such as soccer, basket-ball, hand-ball or rugby for 10 ± 4.6 years.

Experimental protocol

Each subject performed six testing sessions. The first two sessions consisted of two different incremental running tests: 45-15_{FIT} *vs* a traditional incremental continuous treadmill test, performed in a random order. The third and fourth sessions consisted of two 15-min intermittent exercises (30s run / 30s rest) performed at the velocity reached during the previous two incremental tests: 30s run at MAV_{TR} interspersed with 30s passive recovery (30-30_{TR/PR}) *vs* 30s run at MAV_{45-15} interspersed with 30s passive recovery (30-30_{45-15/PR}). The fifth and sixth sessions consisted in two 15-min intermittent exercises performed at MAV_{TR} where the mode and the duration of recovery were changed: 30s run at MAV_{TR} interspersed with 30s active recovery at 50% of MAV_{TR} (30-30_{TR/AR}) and 30s run at MAV_{TR} interspersed with 15s passive recovery (30-15_{TR/PR}). Each session was performed at a one week interval. The four intermittent exercises were performed in a random order. All testing sessions were conducted at the same time of day and the subjects were verbally encouraged. The subjects continued to train regularly during the experimentation but not on the day before an experimental session.

Gas exchange, heart rate (HR) and $\dot{V}O_{2\max}$ measurements

Respiratory gas exchanges were measured breath by breath using a portable system (Cosmed K4b²)²⁰ to determine $\dot{V}O_2$ during the incremental and intermittent tests. Before each test session, the following calibrations were performed: turbine flowmeter calibration of the K4b² (performed with a 3-litre syringe, Quinton Instruments, Seattle, Wash, USA), O_2 and CO_2 analysis systems with a gas mix of 16% O_2 and 5% CO_2 concentrations, delay time, and at least an ambient air calibration. Heart rate (HR) was recorded at 5-second intervals using a heart rate monitor (S610i, Polar Electro, Kempele, Finland).

In accordance with Thevenet¹², $\dot{V}O_{2\max}$ was considered to be reached if at least three of the four following criteria were fulfilled: (1) A steady state of $\dot{V}O_2$ despite increasing running velocity (change in $\dot{V}O_2$ at $\dot{V}O_{2\max} \leq 150 \text{ ml min}^{-1}$); (2) a final respiratory exchange ratio ($\text{RER}_{\max}$) higher than 1.1; (3) voluntary exhaustion; (4) an HR at the end of exercise ($\text{HR}_{\max}$) of the predicted maximum [$210 - (0.65 \times \text{age})$].

For TR and 45-15_{FIT}, $\dot{V}O_{2\max}$ was the highest $\dot{V}O_2$ measured over two successive 15 s periods. For all 30s-30s sessions, $\dot{V}O_{2\max}$ was the highest $\dot{V}O_2$ values as indicated by two successive peak values during the 30 s run, mean $\dot{V}O_2$ was the mean $\dot{V}O_2$ value recorded between the first and the fifteenth minute. t_{90} and t_{95} $\dot{V}O_{2\max}$ was the time spent above 90 and 95% of $\dot{V}O_{2\max}$ expressed in absolute (s) and relative (% of the 15-min intermittent duration) times. $\text{RER}_{\max}$ was the final respiratory exchange ratio at the end of the test. $\text{HR}_{\max}$ was the maximal value of heart rate sustained during 15s at the end of the test.

Blood lactate measurements

Blood lactate ([La]) was measured with fingertip blood samples (50 μ l), using the Lactate Pro (LP, Arkray KDK, Japan).²¹ Measurements were performed before each session at rest and two minutes after the end of each test.

Incremental Treadmill test (TR)

The laboratory-grade continuous running test was completed on an electronic treadmill (Ergo-Fit Trac 3000 Alpin). The initial velocity was set at 8 km.h⁻¹ and was increased by 0.5 km.h⁻¹ per min until the subject was not able to maintain the velocity. The last running velocity reached during the test was considered as the MAV_{TR} .

Field incremental intermittent test (45-15_{FIT})

The 45-15_{FIT} consisted of periods of 45 s run on a field interspersed with periods of 15 s rest. During the first 45 s, the subject had to run a distance of 100 m from the “Start 1” starting cone to the “Finish 1” cone (mean velocity = 8 km.h⁻¹). During the following 15 s recovery, the subject had to move from the “Finish 1” cone to the “Start 2” cone, located 6.25 m farther. During the second 45 s run, the subject had to run back to the starting cone “Start 1 = Finish 2” i.e. he had to run 106.25 m in 45 s (mean velocity = 8.5 km.h⁻¹). After 15 s recovery, he had to run from the “Start 1 = Start 3” cone to the “Finish 3” cone i.e. run 112.50 m in 45 s (mean velocity = 9 km.h⁻¹). All values in velocity and distance concerning the 45-15_{FIT} are presented in Table 1. The graphic representation of the 45-15_{FIT} is presented in Figure 1. Starts and stops were announced by a sound signal emitted by a beep generator. The test was stopped when the subject was not able to reach a desired cone in the corresponding time. The last velocity reached during the test was considered as the MAV_{45-15} .

Intermittent 30s-30s running exercises

During the third, fourth, fifth and sixth sessions, the subjects performed, in a random order, intermittent exercises during 15 minutes, consisting in 30s run interspersed with 15s or 30s rest. In the 30-30_{45-15/PR} test, the subjects ran 30s at MAV_{45-15} interspersed with 30s of passive recovery; in the 30-30_{TR/PR} test, the subjects ran 30s at MAV_{TR} interspersed with 30s of passive recovery; in the 30-30_{TR/AR} test, the subjects ran 30s at MAV_{TR} interspersed with 30s

of active recovery (50% of the MAV_{TR}); in the 30-15 $_{TR/PR}$ test, the subjects ran 30s at MAV_{TR} interspersed with 15s of passive recovery.

Stage	Distance (m)	Velocity (km.h ⁻¹)	Distance in 30 s (m)
1	100.00	8.0	67
2	106.25	8.5	71
3	112.50	9.0	75
4	118.75	9.5	79
5	125.00	10.0	83
6	131.25	10.5	88
7	137.50	11.0	92
8	143.75	11.5	96
9	150.00	12.0	100
10	156.25	12.5	104
11	162.50	13.0	108
12	168.75	13.5	113
13	175.00	14.0	117
14	181.25	14.5	121
15	187.50	15.0	125
16	193.75	15.5	129
17	200.00	16.0	133
18	206.25	16.5	138
19	212.50	17.0	142
20	218.75	17.5	146
21	225.00	18.0	150
22	231.25	18.5	154
23	237.50	19.0	158
24	243.75	19.5	163
25	250.00	20.0	167
26	256.25	20.5	171
27	263.50	21.0	175
28	269.75	21.5	179
29	275.00	22.0	183
30	281.25	22.5	188
31	287.50	23.0	192
32	293.75	23.5	196
33	300.00	24.0	200
34	306.25	24.5	204

Table 1

Distance and velocity corresponding to each stage of the 45-15 $_{FIT}$ (45s run, 15s recovery). During each stage distance increases by 6.25 m, and velocity increases by 0.5 km.h⁻¹, respectively. The right-hand column shows the distance to run in 30 s during an intermittent test at the corresponding velocity.

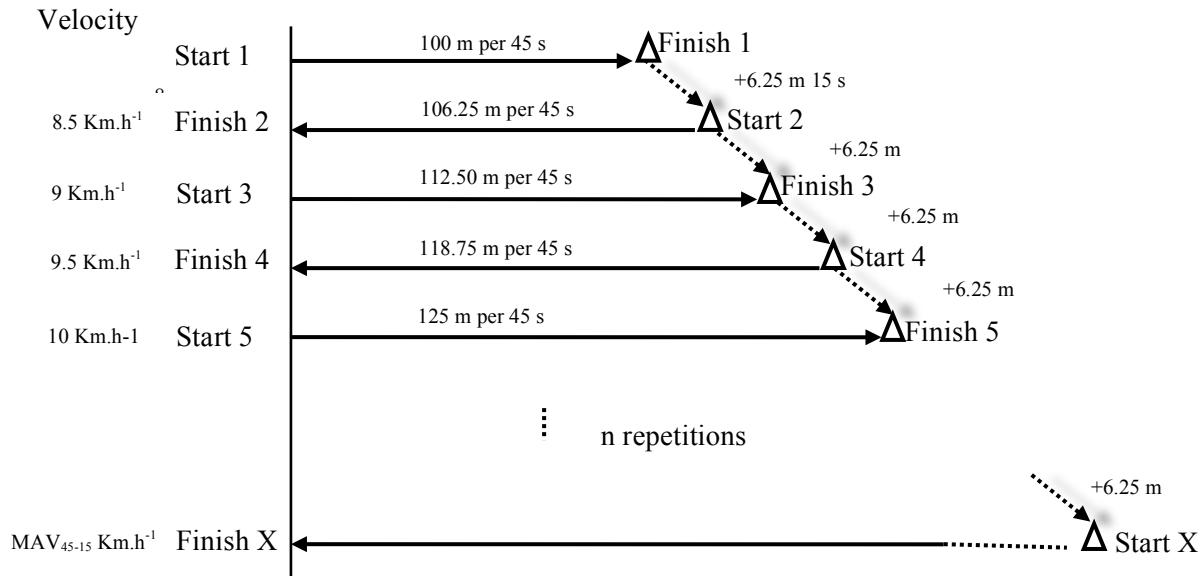


Figure 1. - Schematic representation of the 45-15_{FIT}. During the first 45 s, the subject has to run a distance of 100 m between the “start 1” starting cone and the “finish 1” cone (mean velocity = 8 km.h⁻¹). During the next 15s recovery, the subject has to move to the “start 2” cone, situated 6.25 m away from the “finish 1” cone. At every stage the distance increases by 6.25m (i.e. the velocity increases by 0.5 km.h⁻¹). The last velocity the subject can reach corresponds to the maximal aerobic velocity (MAV₄₅₋₁₅).

Statistical analysis

Kolmogorov-Smirnov tests confirmed that all data were normally distributed. One-way ANOVA was used to compare the variables ($\dot{V}O_{2\max}$, $RER_{\max}$, $HR_{\max}$, [La] and MAV) measured during both 45-15_{FIT} vs TR incremental tests. One-way ANOVA was used to compare selected variables measured during the four intermittent tests: 30-30_{45-15/PR}, 30-30_{TR/PR}, 30-30_{TR/AR}, and 30-15_{TR/PR}. One-way ANOVA was used to compare the variables measured during incremental tests and intermittent tests. Post hoc analyses (Newman-Keuls) were used to test differences among pairs of means when appropriate. Bland–Altman analysis was used to determine absolute limits of agreement between i) MAV₄₅₋₁₅ and MAV_{TR} and ii) $\dot{V}O_{2\max\ 45-15}$ and $\dot{V}O_{2\max\ TR}$. Pearson’s correlation coefficient of linear correlation was used to assess the association between MAV₄₅₋₁₅ and MAV_{TR}. Statistical analyses were performed using Statistica software for Windows (Statsoft, version 6.1, Statistica, Tulsa, OK). Data were presented as the mean ± SD in the text and the tables. The level of significance was set at $P < 0.05$.

Test	VO ₂ _{max} (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	RER _{max}	[La] post test (mmol l ⁻¹)	HR _{max} (bpm)	MAV (km.h ⁻¹)
TR	58.6 (5.9)	1.3 (0.1)	13.2 (2.6)	200 (8)	15.6 (1.4)
45- 15 _{FIT}	58.5 (7)	1.3 (0.1)	11.1 (2.6)	201 (7)	17.7 (1.1)***

Table 2

Physiological responses during the incremental continuous treadmill tests (TR) vs the 45-15_{FIT}

***: Significantly different from TR, P< 0.001. Values are means (SD).

Test	$\dot{V}O_{2\max}$ (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	Mean $\dot{V}O_2$ (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	HR _{max} (bpm)	[La] post test (mmol l ⁻¹)	t90 $\dot{V}O_{2\max}$ (s)	t90 $\dot{V}O_{2\max}$ (% time)	t95 $\dot{V}O_{2\max}$ (s)	t95 $\dot{V}O_{2\max}$ (% time)
30-30 _{TR/PR}	51.8 (6.8)	42.1(5.1)	188 (8)	5.2(1.7)	61 (73)	7 (8)	16 (29)	2 (3)
30-30 _{45- 15/PR}	58.6 (6.7)***	48.5(5.4)**	197 (11)	9.3(1.2)\$\$	337 (180)**	37 (20)**	166 (155)**	18 (17)*
30-30 _{TR/AR}	57.5 (5.5)***	50 (3.4)**	197 (5)	6.9(1.2)	323 (250)**	36 (28)**	175 (216)**	19 (24)*
30-15 _{TR/PR}	58.8 (5.5)***	51.1(5.8)**	197 (6)	10.1(1.2)\$\$	406 (219)**	45 (24)**	263 (245)**	29 (27)*

Table 3

Physiological responses during the four 15 min intermittent exercises. Values are means (SD).

*** (P<0.001); ** (P<0.01); * (P<0.05): Significantly different from 30-30_{TR/PR}.

\$\$ (P<0.01): Significantly different from 30-30_{TR/AR}.

RESULTS

Table 2 shows that there was no significant difference between the mean values of $\dot{V}O_{2\max}$, $RER_{\max}$, $[La]$ and $HR_{\max}$ between both incremental tests. However, the MAV value was significantly higher for the 45-15_{FIT} ($P < 0.001$) compared to that obtained during the TR test, showing a significant difference of $2.1 \pm 0.9 \text{ km.h}^{-1}$ (i.e. $11.5 \pm 5\%$). The Figure 2A indicates a significant positive correlation between MAV_{45-15} and MAV_{TR} ($R^2 = 0.61$, $P < 0.001$). The level of agreement using Bland–Altman method between MAV_{45-15} and MAV_{TR} (Bias = $-2.03 \pm 1.76 \text{ km.h}^{-1}$) is shown in Figure 2B.

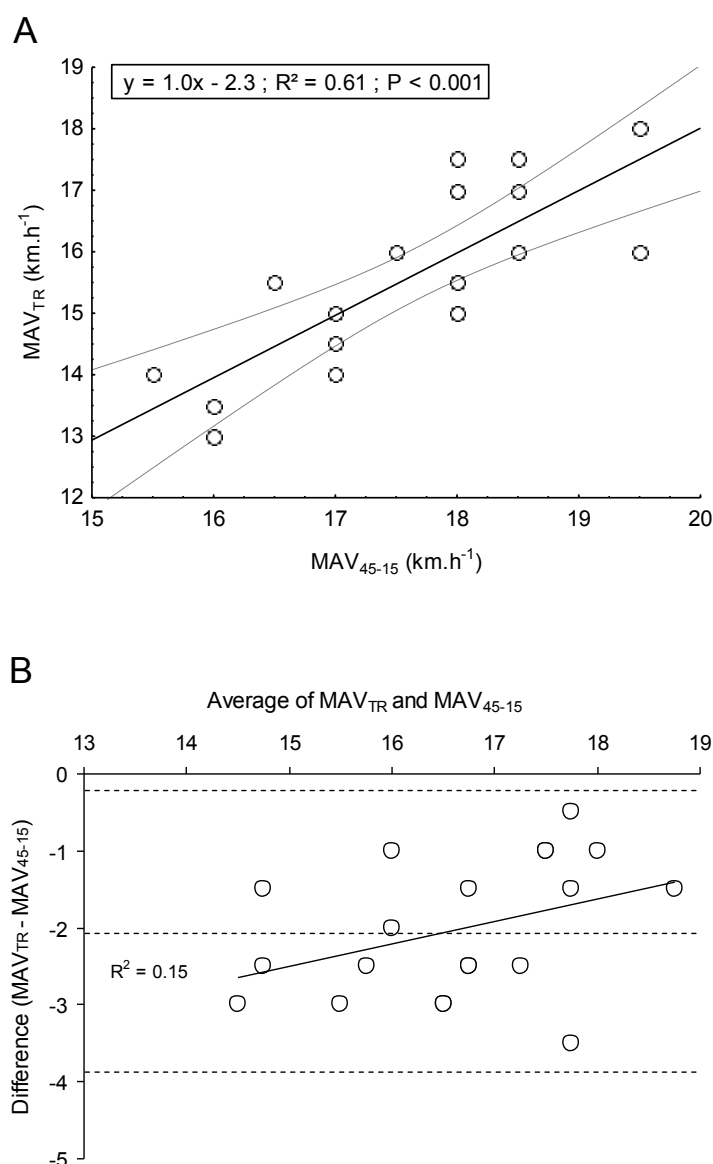


Figure 2. - Panel A : Relation between MAV_{TR} and MAV_{45-15} . The lenticular curves represent the 95% CI for the predicted value. Panel B : Bland–Altman plots comparing MAV_{TR} and MAV_{45-15} .

The Figure 3A indicates a significant positive correlation between $\dot{V}O_{2\max\ 45-15}$ and $\dot{V}O_{2\max\ TR}$ ($R^2 = 0.93$, $P < 0.01$). The level of agreement using Bland–Altman method between $\dot{V}O_{2\max\ 45-15}$ and $\dot{V}O_{2\max\ TR}$ (Bias = 1.98 ± 4.29 ml.min⁻¹.kg⁻¹) is shown in Figure 3B. Typical recording of oxygen uptake in one subject during the different intermittent sessions are presented in Figure 4. Table 3 shows that the $\dot{V}O_{2\max}$, mean $\dot{V}O_2$, $HR_{\max}$, $t90\ \dot{V}O_{2\max}$, $t95\ \dot{V}O_{2\max}$ values during the 30-30_{45-15/PR}, 30-30_{TR/AR}, and 30-15_{TR/PR} intermittent tests were significantly higher compared to those reported during the 30-30_{TR/PR} running test. There was no significant difference between the $\dot{V}O_{2\max}$ reached during incremental tests and the three intermittent tests 30-30_{45-15/PR}, 30-30_{TR/AR} and 30-15_{TR/PR}.

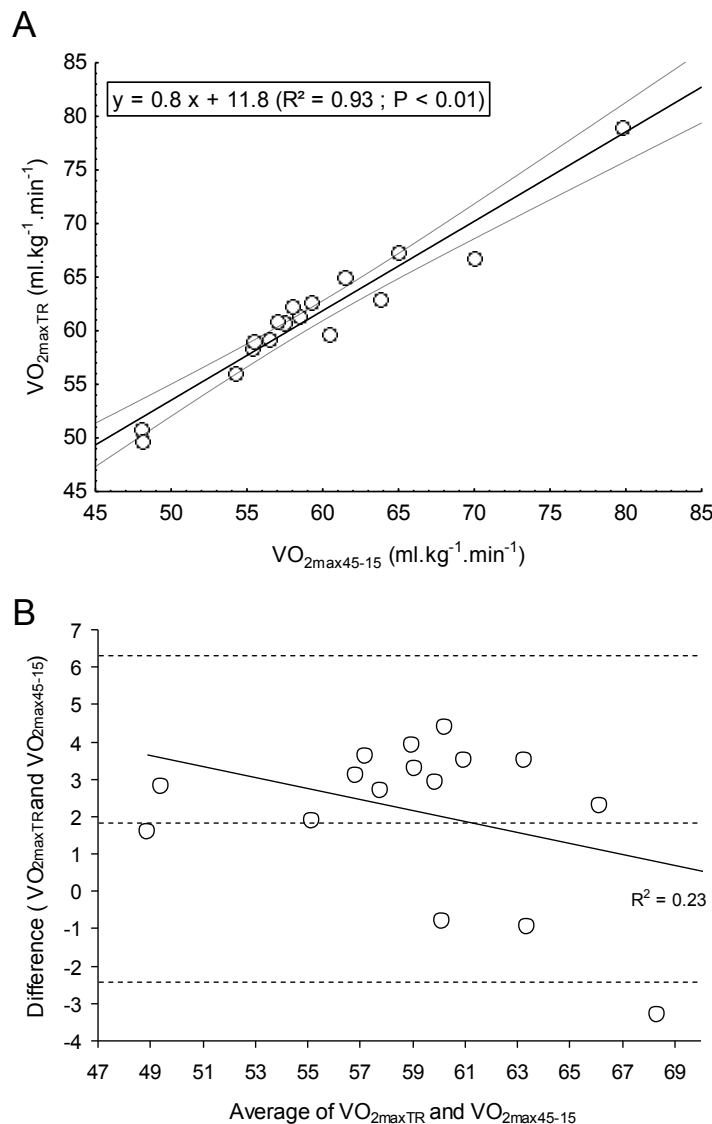


Figure 3. - Panel A: Relation between $VO_{2\max\ 45-45}$ and $VO_{2\max\ TR}$. The lenticular curves represent the 95% CI for the predicted value. Panel B : Bland–Altman plots comparing $VO_{2\max\ 45-45}$ and $VO_{2\max\ TR}$.

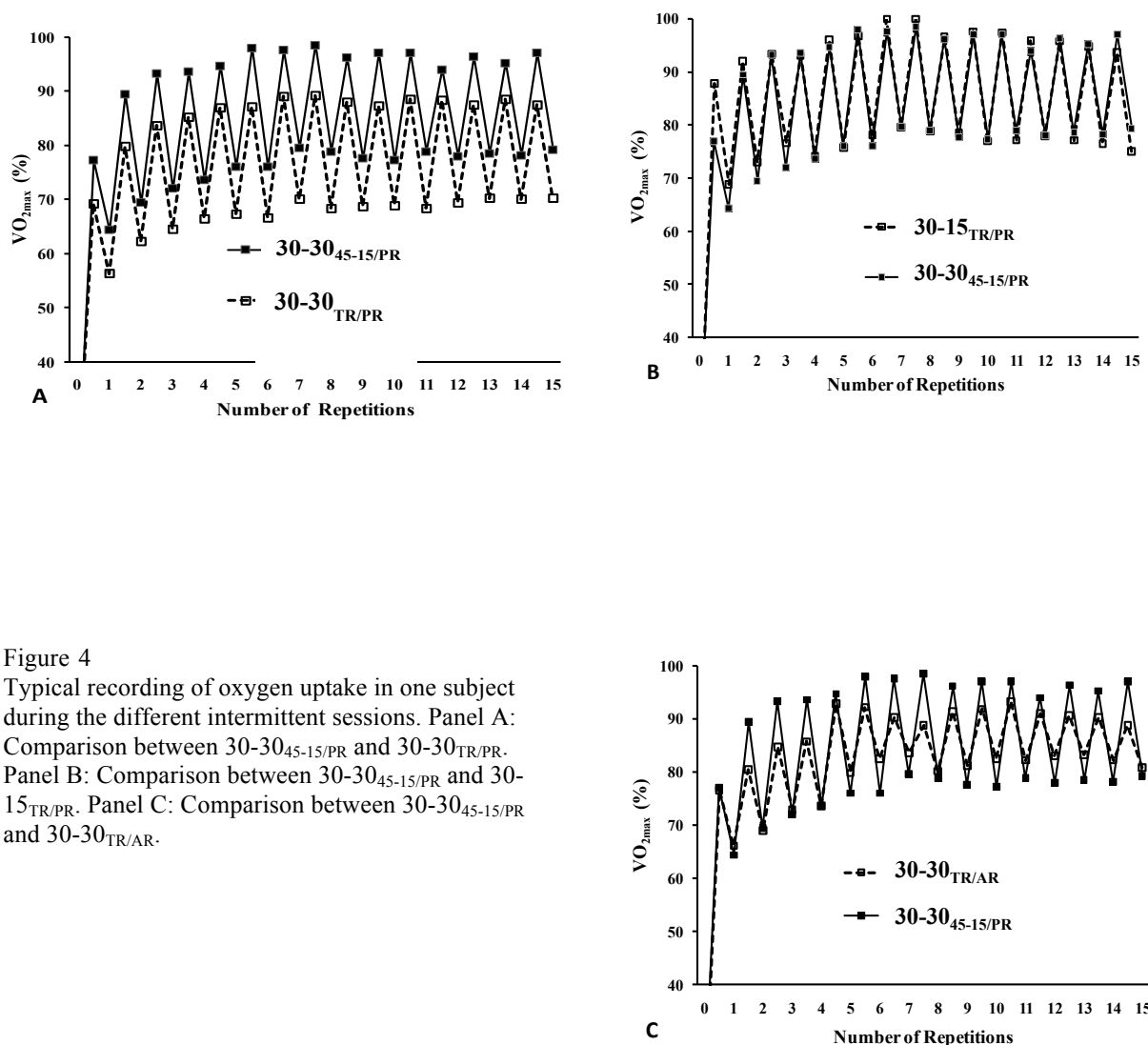


Figure 4
Typical recording of oxygen uptake in one subject during the different intermittent sessions. Panel A: Comparison between 30-30_{45-15/PR} and 30-30_{TR/PR}. Panel B: Comparison between 30-30_{45-15/PR} and 30-15_{TR/PR}. Panel C: Comparison between 30-30_{45-15/PR} and 30-30_{TR/AR}.

DISCUSSION

The first aim of this study was to compare the physiological and the MAV responses reached during a classical continuous incremental treadmill test vs a novel intermittent field test 45-15_{FIT}. Values in $\dot{V}O_{2max}$, HR_{max} and $[La]$ were similar at exhaustion during both tests. However, the MAV was $\sim 12\%$ (i.e. $\sim 2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) higher for the 45-15_{FIT} compared to the MAV_{TR}. This difference can be explained by the type of exercise: intermittent vs continuous. Indeed, during an intermittent test such as the 45-15_{FIT}, part of the oxygen reserve in the myoglobin may be reconstituted during the 15s rest and could delay the time when lactic anaerobic processes became dominant.²² The myoglobin store used during the 45s run could partly be restored during recovery periods and may help to reach a greater MAV during the 45-15_{FIT} compared to the TR test.^{23,24} The 45-15_{FIT} could be interesting to assess MAV for athletes involved in intermittent sports because it requires little equipment and it is adapted to all levels of training.

The second aim of the study was to demonstrate that the final velocity during the 45-15_{FIT} was particularly relevant to elicit a high percentage of $\dot{V}O_{2max}$ during an intermittent training

session such as the 30s-30s.¹ The results showed that oxygen uptake was very different during the 30-30_{TR/PR} and the 30-30_{45-15/PR}. Mean values of $t_{90} \dot{V}O_{2\max}$ and $t_{95} \dot{V}O_{2\max}$ were significantly higher during the 30-30_{45-15/PR} compared with the 30-30_{TR/PR}, suggesting that the 30-30_{45-15/PR} was an intermittent exercise during which subjects can sustain a high percentage of $\dot{V}O_{2\max}$. Indeed, during the 30-30_{45-15/PR} the subjects were able to reach their $\dot{V}O_{2\max}$ and spent ~37% of the exercise above 90% of their $\dot{V}O_{2\max}$. To obtain a similar high aerobic solicitation i.e. as much time above 90% of $\dot{V}O_{2\max}$ as during a 30-30_{45-15/PR} while running 30s at MAV_{TR} , the results showed that it was possible either to reduce the recovery time to 15s, or to perform an active recovery (50% of MAV_{TR}). The present finding suggests that the MAV_{45-15} determined during the 45-15_{FIT} provides a relevant solution to problems encountered for the choice of adequate velocity to elicit high levels of $\dot{V}O_{2\max}$ during a 30s-30s running intermittent test.^{11,12,16-19} The results show that it is possible to perform a 30s-30s intermittent running test at a velocity 2 km.h⁻¹ faster than MAV_{TR} for 15 min. It can be explained by the predominance of the aerobic system in the energy supply during the 30-30_{45-15/PR} and particularly the oxygen into myoglobin structures turnover.²²

Many authors determined a velocity for the 30s-30s intermittent running exercise based on the MAV reached during a continuous incremental treadmill test^{11,16-18} and then increased the MAV_{TR} by 10% to 20%. Bucheit¹⁹ also proposed to use a 30s-15s intermittent test to determine the adapted velocity in order to reach high levels of oxygen consumption during a 30s-30s intermittent training session (95% of the velocity reached at the end of the 30s-15s test). Previous studies²⁵ have shown the significant role of high intensity intermittent training for improving running performance even if the term “high intensity intermittent training” is still not clearly defined. High-intensity intermittent training is usually defined as repeated bouts of high-intensity exercise interspersed with recovery rest but the choice of running velocity is not clearly stated. The 45-15_{FIT} provides a relevant running velocity (MAV_{45-15}) that can be used during a 30s-30s intermittent training session for at least 15 min to elicit a high percentage of $\dot{V}O_{2\max}$.

The present study suggests that incremental continuous tests vs intermittent tests have different practical applications. If the goal is to determine a velocity, associated with $\dot{V}O_{2\max}$ that a subject can sustain during a continuous exercise such as an endurance time test^{26,27}, the MAV obtained with an incremental continuous test is relevant²⁸. In contrast, if the goal is to determine a velocity, associated with $\dot{V}O_{2\max}$ that a subject can sustain during an intermittent exercise such as a 30s-30s intermittent training session, an incremental intermittent test such as the 45-15_{FIT} might be more appropriate. From a practical standpoint, our results indicate that the MAV_{45-15} can be determined by the following equation: $MAV_{45-15} = MAV_{TR} + 2.3$ and provide novel information regarding the selection of a running velocity during high-intensity training sessions.

In conclusion, the present results show that the 45-15_{FIT} is an accurate field test to determine $\dot{V}O_{2\max}$ and that the MAV reached during this test (MAV_{45-15}) provides a relevant velocity that can be used during high intensity intermittent training such as the 30s-30s in order to elicit a high percentage of $\dot{V}O_{2\max}$. Future studies are however necessary to determine if MAV_{45-15} may be used to elicit a high percentage of $\dot{V}O_{2\max}$ during high intensity intermittent training exercises of different durations such as 5s-15s, 15s-15s, or 60s-60s.

REFERENCES

1. Billat VL. Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle and long distance running. Part I: Aerobic interval training. *Sports Med.* 2001;31:13-31.
2. Billat VL. Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle and long distance running. Part II: Anaerobic interval training. *Sports Med.* 2001;31:75-90.
3. Newsholme E, Leech T, Duester G. *Keep on running. The science of training and performance.* John Wiley and Sons, Ltd., Chichester, England; 1994.
4. Kubukeli ZN, Noakes TD, Dennis SC. Training techniques to improve endurance exercise performances. *Sports Med.* 2002;32:489-509.
5. Midgley AW, Mc Naughton LR. Time at or near VO₂max during continuous and intermittent running. A review with special reference to considerations for the optimization of training protocols to elicit the longest time at or near VO₂max. *J Sports Med Phys Fitness.* 2006;46:1-14.
6. Laursen PB. Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? *Scand J Med Sci Sports.* 2001;20:1-10.
7. Billat VL, Slawinski J, Bocquet V, Demarle A, Lafitte L, Chassaing P, Koralstein J-P. Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for longer time than intense but submaximal runs. *Eur J Appl Physiol.* 2000;81:188-196.
8. Karlsson J, Astrand PO, Ekblom B. Training of the oxygen transport system in man. *J Appl Physiol.* 1967;22:1061-1068.
9. Fox EL, Bartels RL, Billings CE, Mathews D, Bason R, Webb W. Intensity and distance of interval training programs and changes in aerobic power. *Med Sci Sports.* 1973;5:18-22.
10. Fox EL, Bartels RL, Billings CE. Frequency and duration of interval training programs and changes in aerobic power. *J Appl Physiol.* 1975;38:481-484.
11. Millet GP, Libicz S, Borrani F, Fattori, Bignet F, Candau R. Effects of increased intensity of intermittent training in runners with differing VO₂ kinetics. *Eur J Appl Physiol.* 2003;90:50-57.
12. Thevenet D, Tardieu M, Zouhal H, Jacob C, Abderrahman BA, Prioux J. Influence of exercise intensity on time spent at high percentage of maximal oxygen uptake during an intermittent session in young endurance-trained athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2007;102:19-26.
13. Seiler S, Sjursen JE. Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scand J Med Sci Sports.* 2004;14:318-325.

14. Seiler S, Hetlelid KJ. The impact of rest duration on work intensity and RPE during interval training. *Med Science Sports Exercise*. 2005;1601-1607.
15. Gorostiaga EM, Walter CB, Foster C. Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. *Eur J Appl Physiol*. 1991;63:101-107.
16. Fox EL, Bartels RL, Klinzing J. Metabolic responses to interval training programs of high and low power output. *Med Sci Sports Exerc*. 1977;9:191-6.
17. Dupont G, Blondel N, Berthoin S. Performance for short intermittent runs: active recovery vs. passive recovery. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89:548-554.
18. Berthoin S, Baquet G, Dupont G, Van Praagh E. Critical velocity during continuous and intermittent exercises in children. *Eur J Appl Physiol*. 2006;98:132-138.
19. Buchheit M. The 30-15 intermittent fitness test : accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J Strength Cond Research*. 2008;22:365-374.
20. McLaughlin JE, King GA, Howley ET, Basset DR, Ainsworth BE. Validation of the COSMED K4b2 Portable Metabolic System. *Int J Sports Med*. 2001;22:280-284.
21. Tanner RK, Fuller KL, Ross MLR. Evaluation of three portable blood lactate analysers: Lactate Pro, Lactate Scout and Lactate Plus. *Eur J Appl Physiol*. 2010;109:551-559.
22. Astrand I, Astrand PO, Christensen EH, Hedman R. Myohemoglobin as an oxygen-store in man. *Acta physiol Scand*. 1960;48:454-460.
23. Essén B, Hagenfeldt L, Kaijser L. Utilization of blood-borne and intramuscular substrates during continuous and intermittent exercise in man. *J Physiol*. 1977;265:489-506.
24. Medbo JJ, Tabata I. Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J Appl Physiol*. 1990;67:1881-1886.
25. Laursen PB, Jenkins DG. The scientific basis for high-intensity interval training: optimizing training programs and maximizing performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med*. 2002;32:53-73.
26. Billat VL, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. Reproducibility of running time to exhaustion at maximal aerobic speed in sub-elite male runners. *Med Sci Sports Exerc*. 1994;26:254-257.
27. Billat VL, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. Contribution of time limit at 90, 100, 105% of $\dot{V}O_2\text{max}$ among other bioenergetic characteristics in a multifactorial analysis of performance in elite long-distance runners. *Science et motricité*. 1994;24:13-19.
28. Lacour JR, Montmayer A, Dormois D, Gacon G, Padilla S, Vial C. Validation de l'épreuve de mesure de la vitesse maximale aérobie (VMA) dans un groupe de coureurs de haut niveau. *Sciences et Motricité*. 1989;7:3-8.

ETUDE II

REPONSE PHYSIOLOGIQUE ET TEMPS D'EFFORT MAXIMAL LORS D'EXERCICES INTERMITTENTS COURUS A LA VITESSE MAXIMALE AEROBIE

Cet article à été accepté pour publication dans la revue: Movement & Sport Sciences - Science & Motricité, sous la référence : DOI: 10.1051/sm/2012004.

Assadi H, Lepers R. (2012) - Réponse physiologique et temps d'effort maximal lors d'exercices intermittents courus à la vitesse maximale aérobie. Science & Motricité. DOI: 10.1051/sm/2012004.

Réponse physiologique et temps d'effort maximal lors d'exercices intermittents courus à la vitesse maximale aérobie

Hervé Assadi, Romuald Lepers

INSERM U1093, Faculté des Sciences du Sport, Université de Bourgogne, Dijon, France

Résumé. Le but de cette étude était de comparer les réponses physiologiques et la durée d'exercice (*i.e.* le nombre maximal de répétitions) lors de trois types d'exercices intermittents courus à la vitesse maximale aérobie (VMA). Dix-huit sujets masculins sportifs ont réalisé, à une semaine d'intervalle, trois exercices intermittents de type 15 s-15 s, 30 s-30 s et 60 s-60 s. Au cours de ces exercices, la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), la fréquence cardiaque, la lactatémie ([La]), le quotient respiratoire et la durée totale d'exercice (tlim) ont été mesurés. Le tlim était significativement ($p < 0,01$) plus long lors de l'exercice 30 s-30 s (1270 ± 390 s) par rapport à l'exercice 15 s-15 s (953 ± 235 s) et à l'exercice 60 s-60 s (1053 ± 268 s). La consommation maximale d'oxygène et le temps passé respectivement à 90 % et 95 % de $\dot{V}O_{2max}$ n'étaient pas significativement différents entre les trois formes d'exercices. [La] était significativement ($p < 0,001$) plus élevée à la fin du tlim 60 s-60 s ($12,4 \pm 2,4$ mmol.l⁻¹) par rapport aux valeurs mesurées à la fin du tlim 30 s-30 s ($6,0 \pm 3,2$ mmol.l⁻¹) et du tlim 15 s-15 s ($8,9 \pm 2,4$ mmol.l⁻¹). Les exercices intermittents de type 15 s-15 s, 30 s-30 s et 60 s-60 s courus à la VMA avec une récupération passive, représentent des formes d'exercices adaptées pour solliciter le système aérobie à une intensité importante (≥ 90 % de $\dot{V}O_{2max}$).

Mots clés : $\dot{V}O_{2max}$, temps limite, fatigue, intermittent, lactatémie, endurance

Abstract. Physiological response and time to exhaustion for intermittent running exercises performed at the maximal aerobic velocity. The aim of this study was to compare the physiological responses and the time to exhaustion (*i.e.* the maximal number repetitions) for three intermittent running exercises performed at the maximal aerobic velocity (MAV). Maximum oxygen consumption ($\dot{V}O_{2max}$), heart rate, blood lactate concentration ([La]), exchange ratio respiratory and time to exhaustion (tlim) were analyzed, in eighteen subjects, during three intermittent exercises (15 s run-15 s passive recovery, 30 s-30 s and 60 s-60 s). The tlim was significantly ($p < 0,01$) greater during 30 s-30 s exercise (1270 ± 390 s) compared to 15 s-15 s exercise (953 ± 235 s) and to 60 s-60 s exercise (1053 ± 268 s). $\dot{V}O_{2max}$ and the time spent above 90% and 95% $\dot{V}O_{2max}$ were not significantly different between the three intermittent exercises. [La] was significantly ($p < 0,001$) higher at the end of 60 s-60 s ($12,4 \pm 2,4$ mmol.l⁻¹) compared to the end of 30 s-30 s ($6,0 \pm 3,2$ mmol.l⁻¹) and 15 s-15 s ($8,9 \pm 2,4$ mmol.l⁻¹), respectively. The three intermittent running exercises (15 s-15 s, 30 s-30 s and 60 s-60 s) performed at MAV, with passive recovery, were particularly relevant to elicit a high percentage of $\dot{V}O_{2max}$ and may be interesting for aerobic training.

Key words: Maximal oxygen uptake, time to exhaustion, interval training, lactate, endurance, fatigue

1 Introduction

Le principal intérêt des exercices intermittents comparés aux exercices continus est la possibilité de maintenir une intensité plus élevée et un temps de travail plus long (Astrand, Astrand, Christensen, & Hedman, 1960; Christensen, Hedman, & Saltin, 1960; Gorostiaga, Walter, & Foster, 1991; Billat *et al.*, 2000; Billat, Pinoteau, Petit, Renoux, & Koralsztein, 1996). Il a été montré qu'un entraînement composé d'exercices intermittents permettait une amélioration des performances en endurance avec des modifications notoires des paramètres physiologiques (Billat, 2001a, 2001b; Laursen & Jenkins, 2002; Laursen,

2001). En effet, chez des sujets cyclistes (Laursen, Shing, Peake, Coombes, Jenkins, 2002; Stepto, Hawley, Dennis, Hopkins, 1998; Faria, 1984) ou coureurs à pied (Esfarjani & Laursen, 2007; Smith, Coombes, Geraghty, 2003; Billat, Flechet, Petit, Muriaux, Koralsztein, 1999; Smith, McNaughton, Marshall, 1999), un entraînement constitué d'exercices intermittents intensifs, *i.e.* sollicitant un pourcentage élevé de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), constitue un moyen approprié pour développer l'aptitude aérobie.

Parmi les multiples formes d'exercices intermittents, celui consistant à alterner des périodes de 30 s de course avec des périodes de 30 s de récupération (30 s-30 s) est

très utilisé dans le domaine de l'entraînement pour développer l'aptitude aérobie (Billat, 2001a). Lors de ce type d'exercice, il apparaît que le choix de la vitesse de course est primordial pour atteindre un niveau de sollicitation aérobie maximal (Assadi et Lepers, 2012; Millet *et al.*, 2003; Thévenet, Tardieu-Berger, Zouhal, 2007). Assadi et Lepers (2011) ont récemment montré que la vitesse maximale aérobie (VMA) atteinte lors du test triangulaire intermittent 45-15_{FIT} (VMA₄₅₋₁₅) était particulièrement appropriée pour solliciter $\dot{V}O_{2max}$ lors d'un exercice intermittent de type 30 s-30 s.

Un autre aspect important dans une séance d'entraînement de type intermittent est le nombre maximal de répétitions pouvant être réalisées à une intensité proche de la $\dot{V}O_{2max}$. Cette problématique a fait l'objet de nombreuses études mais les résultats sont souvent divergents de part la multitude des protocoles expérimentaux utilisés (Billat *et al.*, 1996; Astrand *et al.*, 1960a; Billat, 2001a, 2001b). Par exemple, certains auteurs ont proposé des exercices intermittents de type 30 s-30 s courus à 100 % ou 105 % de la VMA alternées avec 30 s de récupération active courues à 50 % de la VMA (Billat *et al.*, 2000; Millet *et al.*, 2003; Thévenet, Tardieu-Berger, Berthoin, & Prioux, 2007). La récupération active permettait d'augmenter de façon significative l'intensité de l'exercice, exprimée en pourcentage du temps passé à $\dot{V}O_{2max}$ (Billat *et al.*, 2000) ou en pourcentage du temps passé à plus de 90 % de la $\dot{V}O_{2max}$ (Thévenet, Tardieu-Berger, Berthoin *et al.*, 2007), mais le temps total de l'exercice était significativement diminué (Millet *et al.*, 2003). Dans la recherche de cette optimisation entre le temps de travail et l'intensité globale de l'exercice intermittent, certains auteurs ont étudié les effets d'un temps de travail et d'une récupération différents du 30 s-30 s, tout en maintenant un ratio temps de travail/temps de récupération égal à 1. Par exemple, Seiler et Sjursen (2004) ont proposé un exercice intermittent de type 60 s-60 s, couru à 93 % de la VMA et ne sollicitant que 82 % de la $\dot{V}O_{2max}$. Dupont, Blondel et Berthoin (2003) ont proposé un exercice intermittent plus court de type 15 s-15 s, réalisé à 120 % de la VMA, et ont montré que la récupération passive *versus* active allongeait considérablement le temps total de l'exercice (de 445 s à 745 s). Lors de cette dernière étude le temps passé à plus de 90 % de la $\dot{V}O_{2max}$ n'avait pas été mesuré; cette mesure représentant pourtant un critère pertinent pour évaluer l'intensité de la sollicitation aérobie lors de l'exercice (Thévenet, Tardieu, Zouhal *et al.*, 2007).

Les effets de l'entraînement sont dépendants à la fois du volume et de l'intensité du travail réalisé; ces deux paramètres permettant de calculer la charge de travail (volume $\times$ intensité) (Foster, Daines, Hector, Snyder, & Welsh, 1996). Si les exercices intermittents peuvent permettre d'améliorer à la fois les qualités aérobies (Gorostiaga *et al.*, 1991) et la performance sportive, il n'en demeure pas moins que le choix du type d'exercice et de son intensité semble influencer considérablement ses effets

(Stepto *et al.*, 1998). L'augmentation de la proportion du volume de travail global d'entraînement effectué à une intensité élevée serait en effet un facteur important dans l'amélioration des performances (Laursen & Jenkins, 2002).

Le but de cette étude était de déterminer, parmi trois exercices intermittents courus à la VMA₄₅₋₁₅ et couramment utilisés dans l'entraînement (15 s-15 s, 30 s-30 s et 60 s-60 s), quel était celui qui permettait d'atteindre le temps d'effort le plus important, tout en maintenant une intensité élevée (≥ 90 % $\dot{V}O_{2max}$). En accord avec Thévenet, Tardieu, Zouhal *et al.* (2007), les temps passés au delà de 90 et 95 % de $\dot{V}O_{2max}$ ont été considérés comme des critères permettant d'évaluer le niveau d'implication du système aérobie lors des différents exercices intermittents. Nous avons émis l'hypothèse que l'exercice intermittent de durée intermédiaire, *i.e.* 30 s-30 s, constituerait la forme d'exercice permettant d'atteindre le temps d'effort le plus long.

2 Matériel et Méthode

2.1 Sujets

Dix huit sujets masculins, étudiants en faculté des Sciences du Sport, ont participé à cette étude. Leurs caractéristiques étaient les suivantes: âge : 21 ± 1 ans; taille : 180 ± 6 cm; poids : $75 \pm 7,5$ kg; $\dot{V}O_{2max}$: $51,2 \pm 4,6$ ml.kg⁻¹.min⁻¹ (moyenne $\pm$ écart type).

2.2 Protocole expérimental

Les sujets ont réalisé quatre sessions d'exercices. Un test triangulaire incrémental intermittent (45-15_{FIT}) a été réalisé la première semaine et a permis d'évaluer la VMA₄₅₋₁₅, la $\dot{V}O_{2max}$, la fréquence cardiaque maximale (F_{cmax}) et la lactatémie [La] post-exercice (Assadi & Lepers 2011). Les sujets ont ensuite effectué, dans un ordre aléatoire, à une semaine d'intervalle, trois sessions d'exercices intermittents: un exercice intermittent 15 s-15 s (15 s de course alternées avec 15 s de récupération passive), un exercice intermittent 30 s-30 s (30 s de course alternées avec 30 s de récupération passive), et un exercice intermittent 60 s-60 s (60 s de course alternées avec 60 s de récupération passive). La consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), la fréquence cardiaque (F_c) la lactatémie, le nombre maximum de répétitions (temps limite : t_{lim}) ont été mesurés lors des trois sessions.

2.3 Mesures des échanges gazeux et de la fréquence cardiaque

Les échanges respiratoires ont été mesurés, cycle par cycle, à l'aide d'une unité portable Cosmed K4b² (COSMED, Rome, Italie), puis moyennés toutes les 5 s et les courbes lissées avec un indice de 3 points (McLaughlin

JE, King GA, Howley ET, Basset DR, & Ainsworth BE, 2001, Duffield R, Dawson B, Pinnington HC, & Wong P, 2004). Avant chaque mesure, quatre calibrations ont été effectuées dans l'ordre suivant : calibration de la turbine du K4b² avec une seringue d'un volume de 3 litres (Quinton Instruments, Seattle, Wash, USA); calibration des analyseurs d'O₂ et de CO₂ à l'aide d'un mélange gazeux d'une concentration de 16 % O₂ et de 5 % de CO₂; calibration du délai ; et calibration de l'air ambiant. Le quotient respiratoire (QR), ratio du volume de CO₂ expiré sur le volume d'O₂ inspiré, a été mesuré à la fin de chaque exercice, et a servi d'indicateur quant à la sollicitation de la glycolyse dans la production d'énergie. Le quotient respiratoire maximal (QR_{max}) correspondait à la valeur la plus élevée mesurée à la fin du test 45-15_{FIT} et de chaque exercice intermittent. La fréquence cardiaque a été enregistrée au moyen de cardiofréquencemètres S610i (Polar Electro, Kempele, Finlande), les valeurs ont été moyennées toutes les 5 s. La $\dot{V}O_{2max}$ et la FC_{max} au cours des différents tests correspondaient aux valeurs les plus élevées au cours d'une période d'au moins 30 s. Les temps passés au dessus de 90 % ($t90\dot{V}O_{2max}$) et de 95 % ($t95\dot{V}O_{2max}$) de la $\dot{V}O_{2max}$ ont été quantifiés au cours des trois sessions d'exercices intermittents. Ces temps ont aussi été exprimés en pourcentage du temps limite : $t90\%tlim$ et $t95\%tlim$. Pour chaque exercice intermittent, les variations de $\dot{V}O_2$, (mesurées en $ml.kg^{-1}.min^{-1}$), c'est à dire les différences entre les valeurs maximales enregistrées à la fin de chaque effort et les valeurs minimales enregistrées à la fin de chaque période de récupération, ont été quantifiées. La charge de travail aérobie (CTA) a été estimée pour chaque exercice en multipliant la $\dot{V}O_2$ moyenne de l'exercice par le temps maximal d'effort.

2.4 Mesure de la lactatémie

La concentration de lactate sanguin a été mesurée, après avoir prélevé un échantillon sanguin (50 μ l) au bout d'un doigt, à l'aide d'un appareil Lactate Pro (LP, Arkay KDK, Japan) (Tanner RK, Fuller KL, & Ross MLR, 2010). Elle a été mesurée deux minutes après l'arrêt de chaque test.

2.5 Test triangulaire intermittent (45-15_{FIT})

Le test 45-15_{FIT}, est un test triangulaire qui consiste en une alternance de périodes de course de 45 s alternées avec des périodes de récupération de 15 s (Assadi & Lepers, 2012). Au cours de la première répétition de 45 s de course (palier 1) le sujet effectue une distance de 100 m, entre la balise de départ 1 et la balise d'arrivée 1 (vitesse moyenne de course 8 $km.h^{-1}$). La vitesse est incrémentée à chaque nouveau palier de 0,5 $km.h^{-1}$. Le coureur parcourt pour cela une distance supplémentaire de 6,25 m à chaque nouvelle période de 45 s de course.

Les départs et arrivées sont annoncés par un bip sonore émit par un générateur de bips (Sport-Beeper, Cardi-Sport, France, 2005). Le test est arrêté quand, à la suite d'une incrémentation de la vitesse de course, le sujet n'est plus capable de parcourir en 45 s la distance prévue entre les deux balises désignées. La vitesse atteinte au cours du dernier palier complètement effectué est appelée VMA_{45-15} .

2.6 Exercices intermittents de course à pied de type 15 s-15 s, 30 s-30 s, et 60 s-60 s

Chacune des sessions a été précédée d'un échauffement standardisé constitué, d'une période de 15 min de course à une intensité correspondant à 60 % de la VMA_{45-15} , et de 5 accélérations progressives sur une distance de 100 m. Une période d'environ 10 min s'écoulait entre la fin de l'échauffement et le début du test.

Pour chaque sujet, il a été calculé la distance à parcourir en respectivement 15, 30 et 60 s à la vitesse correspondant à la VMA_{45-15} . Lors de chaque session les sujets devaient réaliser le plus grand nombre de répétitions possibles à VMA_{45-15} . Le temps limite lors des exercices de type 15 s-15 s ($tlim$ 15 s-15 s), 30 s-30 s ($tlim$ 30 s-30 s) et 60 s-60 s ($tlim$ 60 s-60 s) correspondait à la durée totale de chacun des exercices intermittents. Pour chacun des trois types d'exercices intermittents, la récupération entre les efforts était passive. Lors de chaque session d'exercices intermittents, les sujets ont reçu des encouragements verbaux, tout au long de l'exercice, pour les motiver à atteindre le plus grand nombre de répétitions possibles.

2.7 Analyse statistique

Après avoir vérifié, par un test de Kolmogorov-Smirnov, que l'ensemble de nos données suivaient une distribution normale, un test ANOVA a été utilisé pour comparer l'ensemble des variables sélectionnées ($\dot{V}O_{2max}$, FC_{max} , $tlim$, $[La]$, $t90\dot{V}O_{2max}$, $t95\dot{V}O_{2max}$, $t90\%tlim$, $t95\%tlim$, variations de $\dot{V}O_2$ lors des exercices intermittents et CTA) entre les différentes sessions d'exercices. Une analyse *Post hoc* (test de Newman-Keuls) a été réalisée pour une comparaison par paire, quand cela était nécessaire. Le taux minimum de significativité $p < 0,05$ a été retenu pour identifier des différences significatives entre les tests. Pour réaliser ces analyses statistiques la version 6.1 du logiciel Statistica (Statsoft, version 6.1, Statistica, Tulsa, OK) pour Windows a été utilisée. L'ensemble des données sont présentées dans le texte sous la forme : moyenne $\pm$ écart type.

3 Résultats

La Figure 1 montre, pour un sujet représentatif, l'évolution de la $\dot{V}O_2$ au cours du temps lors des trois tests

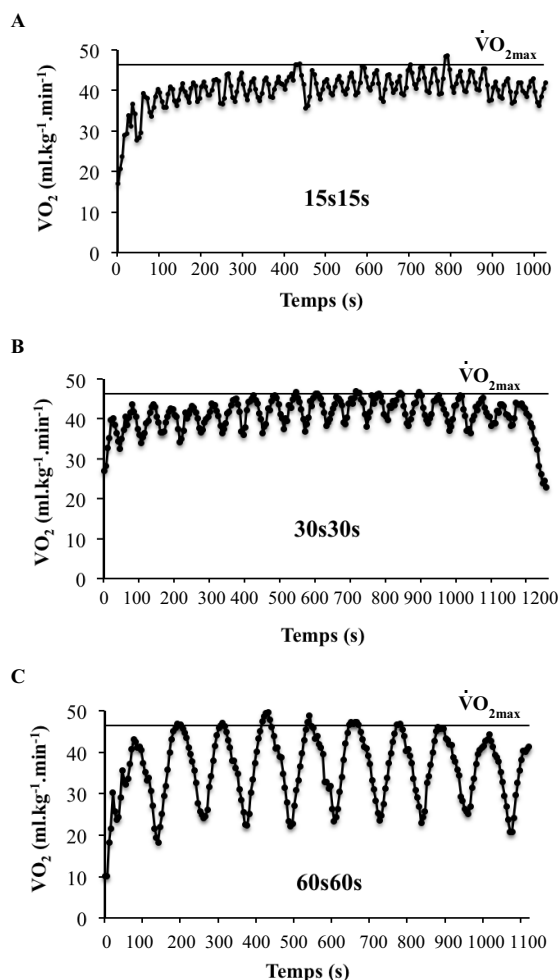


Fig. 1. Exemple d'évolution de la $\dot{V}O_2$ en fonction du temps pour les trois modalités d'exercices intermittents pour un sujet représentatif : 15 s-15 s (A), 30 s-30 s (B), 60 s-60 s (C).

intermittents 15 s-15 s, 30 s-30 s et 60 s-60 s. Les variations moyennes de $\dot{V}O_2$ étaient significativement ($p < 0,001$) plus importantes lors de l'exercice 60 s-60 s ($22,6 \pm 5,4 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) comparées aux exercices 15 s-15 s ($7,0 \pm 1,7 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) et 30 s-30 s ($6,0 \pm 2,7 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$). Les variations moyennes de $\dot{V}O_2$ n'étaient pas significativement différentes entre les exercices 15 s-15 s et 30 s-30 s.

Les valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2\text{max}}$, F_{cmax} , $Q_{R\text{max}}$, et $[\text{La}]$ obtenues au cours du test triangulaire intermittent 45-15_{FTT} sont présentées dans le Tableau 1. La comparaison de l'ensemble des variables à l'effort entre les trois

modalités d'exercice intermittent montre que $[\text{La}]$ post-exercice était significativement ($p < 0,001$) plus élevée après le 60 s-60 s en comparaison du 15 s-15 s et du 30 s-30 s (Tab. 2). Les valeurs de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ et de F_{cmax} n'étaient pas significativement différentes entre les trois exercices. Le t_{lim} était significativement ($p < 0,01$) plus grand lors du 30 s-30 s par rapport aux deux autres modalités 15 s-15 s et 60 s-60 s (Fig. 2).

Les $t_{90}\dot{V}O_{2\text{max}}$ et $t_{95}\dot{V}O_{2\text{max}}$ n'étaient pas significativement différents entre les trois sessions (Tab. 2). Le $t_{95}\%t_{\text{lim}}$ était significativement ($p < 0,05$) plus grand pour le test 15 s-15 s en comparaison des exercices 30 s-30 s et 60 s-60 s, mais le $t_{90}\%t_{\text{lim}}$ n'était pas significativement différent entre les trois exercices (Tab. 2). La CTA n'était pas significativement différente entre les trois exercices (Tab. 2).

4 Discussion

L'objet de cette étude était de comparer les réponses physiologiques et les t_{lim} lors d'exercices intermittents de différentes durées (15 s-15 s, 30 s-30 s et 60 s-60 s), courus à VMA_{45-15} . Les résultats montrent que le t_{lim} 30 s-30 s est significativement ($p < 0,01$) plus long que les t_{lim} 15 s-15 s et t_{lim} 60 s-60 s. L'exercice intermittent 30 s-30 s a permis une augmentation du temps de maintien à la VMA_{45-15} de 24 % par rapport au 15 s-15 s et de 17 % par rapport au 60 s-60 s. Ce résultat permet de valider l'hypothèse selon laquelle le 30 s-30 s serait la forme d'exercice intermittent permettant de réaliser le plus grand temps d'effort au cours d'une séance d'entraînement en comparaison des deux autres formes testées.

Le $t_{90}\dot{V}O_{2\text{max}}$ et le $t_{90}\%t_{\text{lim}}$ ne sont pas significativement différents pour les trois exercices (15 s-15 s, 30 s-30 s et 60 s-60 s), bien que le $t_{90}\%t_{\text{lim}}$ lors de l'exercice 15 s-15 s soit 27 % plus grand que les deux autres modalités. Le $t_{95}\dot{V}O_{2\text{max}}$ n'était pas significativement différent entre les trois exercices, alors que le $t_{95}\%t_{\text{lim}}$ lors du test 15 s-15 s était significativement ($p < 0,05$) plus long, comparé aux deux autres modalités. Les trois formes d'intermittent étudiées présentaient donc des niveaux de sollicitation aérobie élevés (Billat, 2000; Thévenet, Tardieu, *et al.* 2007) et comparables. Le test 15 s-15 s a permis de maintenir 95 % $\dot{V}O_{2\text{max}}$ sur un temps relatif plus long. Ce résultat peut être mis en rapport avec les faibles variations de consommation d'oxygène observées au cours de cet exercice intermittent. L'exercice intermittent de type 15 s-15 s serait une forme de travail particulièrement adaptée pour solliciter de façon élevée la filière aérobie, même si le temps maximal d'effort est plus petit en comparaison des exercices de type 30 s-30 s et 60 s-60 s.

Le $t_{90}\%t_{\text{lim}}$ était compris entre 43 % et 59 % lors des trois types d'intermittent. Ce résultat est en accord avec ceux d'études précédentes ayant enregistré des valeurs de

Tableau 1. Réponses physiologiques au cours du test intermittent progressif et maximal 45-15_{FIT}. $\dot{V}O_{2max}$: valeur de $\dot{V}O_2$ la plus élevée mesurée lors de deux périodes successives de 15 s au cours du test. QRmax: quotient respiratoire final; [La]: Lactatémie mesurée 2 min après la fin du test; Fcmax: fréquence cardiaque maximale mesurée lors de l'exercice sur une durée d'au moins 15 secondes. VMA₄₅₋₁₅: vitesse maximale aérobie. Valeurs moyennes (écart type).

Test	$\dot{V}O_{2max}$ (ml min ⁻¹ kg ⁻¹)	QRmax	[La] post (mmol l ⁻¹)	Fc max (bpm)	VMA ₄₅₋₁₅ (km h ⁻¹)
45-15 _{FIT}	51,2 (4,6)	1,3 (0,1)	12,4 (2,6)	201 (7)	17,7 (0,9)

Tableau 2. Réponses physiologiques au cours des trois exercices intermittents. $\dot{V}O_{2max}$: Consommation maximale d'oxygène; [La] post-test: Lactatémie mesurée 2 min après l'arrêt de l'exercice; t90 $\dot{V}O_{2max}$, t90%tlim, t95 $\dot{V}O_{2max}$, t95%tlim: temps passé à plus de 90 % et 95 % de la $\dot{V}O_{2max}$ en valeur absolue (s) et valeur relative (en % du temps total de l'exercice). Test 15 s-15 s: 15 s courues à la VMA₄₅₋₁₅ alternées avec 15 s de récupération passive; Test 30 s-30 s: 30 s courues à la VMA₄₅₋₁₅ alternées avec 30 s de récupération passive; Test 60 s-60 s: 60 s courues à la VMA₄₅₋₁₅ alternées avec 60 s de récupération passive. CTA: charge de travail aérobie. Valeurs moyennes (écart-type). *** $p < 0.001$: significativement différent des exercices 15 s-15 s et 30 s-30 s. \$ $p < 0.05$: significativement différent des exercices 30 s-30 s et 60 s-60 s.

Test	$\dot{V}O_{2max}$ (ml min ⁻¹ kg ⁻¹)	Fcmax (bpm)	[La] post test (mmol l ⁻¹)	t90 $\dot{V}O_{2max}$ (s)	t90 %tlim (% tlim)	t95 $\dot{V}O_{2max}$ (s)	t95 %tlim (% tlim)	CTA (mlO ₂ .kg ⁻¹)
15 s-15 s	52,4 (5,7)	197 (6)	8,9 (2,4)	553 (306)	59,1 (31)	408 (343)	45,8 (34)\$	708 (187)
30 s-30 s	51,6 (5,3)	196 (8)	6 (3,2)	531 (413)	43 (27)	307 (443)	27,5 (28)	855 (317)
60 s-60 s	54,1 (5)	199 (4)	12,4 (2,4) ***	437 (191)	43 (17)	331 (207)	32,4 (19)	756 (252)

t90%tlim comprises entre 41 % et 84 % (Billat, 2000; Thévenet, 2007; Dupont, Moalla, Guinhouya, Almaïdi, & Berthoin, 2004), mais dont les exercices intermittents étaient réalisés avec une récupération active. Les tlim mesurés dans cette étude, compris entre 965 s et 1270 s, étaient plus grands que les valeurs habituellement constatées, comprises entre 427 s et 1072 s, dans les deux formes de travail intermittent: 15 s-15 s et 30 s-30 s (Billat, 2000; Dupont, 2004; Thévenet, 2007 et Millet, 2003). Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que, contrairement aux études mentionnées précédemment où la récupération était active, dans notre expérimentation la récupération était passive (Dupont, 2003). Dans l'ensemble des études mentionnées, la vitesse à laquelle couraient les sujets lors des exercices intermittents était obtenue lors d'un test triangulaire continu. Il a été montré que lors d'un exercice intermittent 30 s-30 s, couru à la vitesse maximale aérobie déterminée par un test triangulaire continu, le tlim était plus grand en comparaison d'un exercice similaire réalisé à la VMA₄₅₋₁₅; cependant le niveau d'intensité de l'exercice exprimé en % $\dot{V}O_{2max}$ était plus faible (Assadi & Lepers, 2012). Dans notre étude, l'intensité des exercices intermittents restait élevée bien que la récupération était passive, ceci pourrait s'expliquer par le choix de la VMA₄₅₋₁₅ comme vitesse de référence. La récupération passive associée à la vitesse de course correspondant à la VMA₄₅₋₁₅ permettrait d'obtenir des durées d'effort maximales plus longues que celles observées classiquement dans la littérature, tout en maintenant un niveau de sollicitation aérobie élevé.

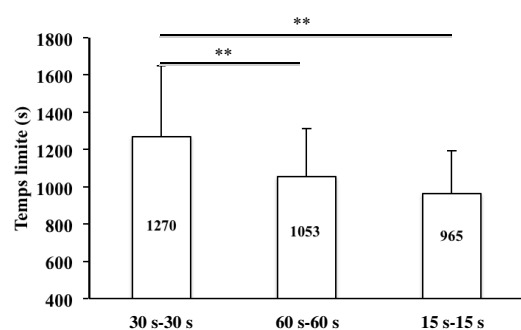


Fig. 2. Comparaison des temps limites lors des trois sessions d'exercices intermittents (15 s-15 s, 30 s-30 s, 60 s-60 s). Le temps limite lors de l'exercice 30 s-30 s est significativement ($p < 0,01$) plus grand en comparaison des exercices 15 s-15 s et 60 s-60 s. ** : $p < 0.01$.

Le tlim plus court lors du 60 s-60 s en comparaison du 30 s-30 s peut être mis en relation avec une lactatémie post-exercice plus importante lors du 60 s-60 s et donc une grande sollicitation de la glycolyse lors du 60 s-60 s. Allonger le temps de travail lors d'exercices intermittents réalisés à haute intensité conduit à une augmentation de la concentration de lactate musculaire (Saltin et Karlsson, 1971), ce qui engendre une production élevée de protons, une diminution du pH (Poortmans, 2009) et pourrait contribuer à la réduction du temps d'effort (Medbo et Tabata, 1993; 1990). Thévenet *et al.* (2007) ont rapporté que l'augmentation de l'intensité de course lors d'un exercice

intermittent de type 30 s-30 s, réalisé à 110 % *vs.* 100 % de la VMA, provoquait également une augmentation de la lactatémie (respectivement 3,1 mmol.l⁻¹ *vs.* 6,0 mmol.l⁻¹) responsable d'une diminution du tlim (de 1440,0 s à 653,3 s). Nos résultats suggèrent donc que l'exercice intermittent 60 s-60 s solliciterait de façon plus importante le métabolisme anaérobie lactique par rapport au test 30 s-30 s. Le fait que les exercices intermittents puissent se faire à des intensités plus élevées que les exercices continus de même durée a été depuis longtemps expliqué par le rôle que jouait une réserve d'oxygène locale dans le muscle : la myoglobine (Astrand *et al.*, 1960a et 1960b; Medbo & Tabata, 1990). Les différences observées entre le test 30 s-30 s et le test 60 s-60 s, pourraient donc être expliquée par le fait que la réserve d'oxygène contenue dans la myoglobine ne serait pas suffisante pour compenser la production de lactate par le système anaérobie lors du test 60 s-60 s. Le fait de doubler le temps d'effort, de 30 s à 60 s lors d'un exercice intermittent couru à la VMA₄₅₋₁₅, contribuerait à augmenter considérablement la production de lactate. Cette production de lactates dépasserait les capacités d'élimination grâce à l'apport en oxygène fixée à la myoglobine et ne serait pas compensée par le doublement du temps de récupération de 30 s à 60 s.

Le tlim du 15 s-15 s était significativement plus court (-25 %) que celui du 30 s-30 s, bien que la lactatémie atteinte à la fin de l'exercice ne soit pas différente. Les différences de durée entre les exercices intermittents 15 s-15 s et 30 s-30 s ne peuvent pas s'expliquer par une participation plus importante du système anaérobie et une réserve d'oxygène au niveau de la myoglobine qui soit insuffisante compte tenu du temps et de l'intensité de la période d'effort (Essén, Hagenfeldt, & Kaijser, 1977). Une fatigue neuromusculaire plus importante lors du test 15 s-15 s pourrait expliquer le tlim plus court. En effet, doubler le nombre d'accélération et de décélérations au cours du même temps d'effort pourrait conduire à augmenter la fatigue musculaire ayant pour conséquence une réduction de la vitesse de course et une diminution du temps de maintien de l'exercice. Cependant, cette hypothèse reste à vérifier en évaluant les propriétés neuromusculaires des muscles extenseurs du genou au cours d'exercices intermittents (Perrey, Racinais, Saimouaa, & Girard, 2010).

Malgré les différences de tlim et d'intensité d'effort entre les trois types d'exercices intermittents, la CTA prenant en compte l'intensité et le volume du travail réalisé n'était pas différente entre les 3 exercices, même si la CTA du 30 s-30 s était en moyenne plus élevée de 17 % par rapport à la CTA du 15 s-15 s et de 11,5 % par rapport à la CTA du 60 s-60 s.

5 Conclusion

Les exercices intermittents 15 s-15 s, 30 s-30 s et 60 s-60 s courus à la VMA₄₅₋₁₅ avec une récupération passive

représentent des formes d'exercice adaptées pour solliciter le système aérobie à une intensité importante (≥ 90 % de $\dot{V}O_{2max}$). L'exercice intermittent de type 30 s-30 s semble toutefois la forme d'exercice qui permettrait de maximiser le temps de travail à une intensité ≥ 90 % de $\dot{V}O_{2max}$. L'exercice 60 s-60 s, quant à lui, pourrait être privilégié si l'objectif est de solliciter de façon plus importante la filière anaérobie lactique. Enfin l'exercice 15 s-15 s, même s'il permet de solliciter de façon importante le processus aérobie, réduit le temps de travail. Des études complémentaires, en particulier au niveau de la réponse neuromusculaire, sont nécessaires pour comprendre de manière plus approfondi les interactions entre la durée et l'intensité d'effort lors d'exercices intermittents courts (temps d'effort ≤ 60 s).

Références

- Assadi, H., & Lepers, R. Validation of the 45 s-15 s intermittent running field test. *International Journal of Sports Physiology Performance*, 2012.
- Astrand, I., Astrand, P.O., Christensen, E.H., & Hedman, R. (1960a). Intermittent muscular work. *Acta physiologica Scandinavica*, 48, 448-453.
- Astrand, I., Astrand, P.O., Christensen, E.H., & Hedman, R. (1960b). Myohemoglobin as an oxygen-store in man. *Acta physiologica Scandinavica*, 48, 454-460.
- Billat, V., Pinoteau, J., Petit, B., Renoux, J.C., & Koralsztajn, J.P. (1996). Calibration de la durée des répétitions d'une séance d'interval training à la vitesse associée à VO_{2max} en référence au temps limite continu: effet sur les réponses physiologiques et la distance parcourue. *Science & Motricité*, 28, 13-20.
- Billat, V.L., Flechet, B., Petit, B., Muriaux, G., & Koralsztajn, J.P. (1999). Interval training at VO_{2max} : effects on aerobic performance and overtraining markers. *Medecines and Science in Sport and Exercise*, 31, 156-163.
- Billat, V.L., Slawinski, J., Bocquet, V., Demarle, A., Lafitte, L., Chassaing, P., & Koralsztajn, J.P. (2000). Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for longer time than intense but submaximal runs. *European Journal of Applied Physiology*, 81, 188-196.
- Billat, V.L. (2001a). Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle and long distance running. Part I: Aerobic interval training. *Sports Medicine*, 31, 13-31.
- Billat, V.L. (2001b). Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle and long distance running. Part II: Anaerobic interval training. *Sports Medicine*, 31, 75-90.
- Christensen, E.H., Hedman, R., & Saltin, B. (1960). Intermittent and continuous running. *Acta Physiologica Scandinavica*, 50, 269.
- Duffield, R., Dawson, B., Pinnington, H.C., & Wong, P. (2004). Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 gas analysis system. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 7, 11-22.

- Dupont, G., Blondel, N., & Berthoin, S. (2003). Performance for short intermittent runs: active recovery *vs.* passive recovery. *European Journal of Applied Physiology*, 89, 548–554.
- Dupont, G., Moalla, C., Guinhouya, C., Ahmaidi, S., & Berthoin, S. (2004). Passive versus active recovery during high-Intensity intermittent exercises. *Medecines and Science in Sport and Exercise*, 36, 302–308.
- Esfarjani, F., & Laursen, P.B. (2007). Manipulating high-intensity interval training: effect on VO_{2max} , the lactate threshold and 3000 m running performance in moderately trained males. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10, 27–35.
- Essén, B., Hagenfeldt, L., & Kaijser, L. (1977). Utilization of blood-borne and intramuscular substrates during continuous and intermittent exercise in man. *Journal of Physiology*, 265, 489–506.
- Faria, I.E. (1984). Applied physiology of cycling. *Sports Medicine*, 1, 187–204.
- Foster, C., Daines, E., Hector, L., Snyder, A.C., & Welsh, R. (1996). Athletic performance in relation to training load. *Wisconsin Medical Journal*, 95, 370–374.
- Gorostiaga, E.M., Walter, C.B., & Foster, C. (1991). Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*, 63, 101–107.
- Laursen, P.B., & Jenkins, D.G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimizing training programs and maximizing performance in highly trained endurance athletes. *Sports Medicine*, 32, 53–73.
- Laursen, P.B., Shing, C.M., Peake, J.M., Coombes, J.S., & Jenkins, D.G. (2002). Interval training program optimization in highly trained endurance cyclists. *Medicine and Science in Sport and Exercise*, 34, 1801–7.
- McLaughlin, J.E., King, G.A., Howley, E.T., Bassett, D.R., & Ainsworth, B.E. (2001). Validation of the COSMED K4b2 Portable Metabolic System. *International Journal of Sports Medicine*, 22, 280–284.
- Medbo, J.I., & Tabata, I. (1993). Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *Journal of Applied Physiology*, 75, 1654–1660.
- Medbo, J.I., & Tabata, I. (1990). Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, 67, 1881–1886.
- Millet, G.P., Libicz, S., Borrani, F., Fattori, Bignet, F., & Candau, R. (2003). Effects of increased intensity of intermittent training in runners with differing VO_2 kinetics. *European Journal of Applied Physiology*, 90, 50–57.
- Perrey, S., Racinais, S., Saimouaa, K., & Girard, O. (2010). Neural and muscular adjustments following repeated running sprints. *European Journal of Applied Physiology*, 109, 1027–1036.
- Poortmans, J.R. Biochimie des activités physiques et sportives. Paris, De boeck. 2009.
- Saltin, B., & Karlsson, J. (1971). Muscle glycogen utilization during work at different intensities. In B. Pernow & B. Saltin (Eds.), *Muscle metabolism during exercise* (pp. 289–300). New York: Plenum.
- Seiler, S., & Sjørnsen, J.E. (2004). Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 14, 318–325.
- Smith, T.P., McNaughton, L.R., & Marshall, K.J. (1999). Effect of 4-wk training using V_{max}/T_{max} on VO_{2max} and performance in athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 892–896.
- Smith, T.P., Coombes J.S., & Geraghty D.P. (2003). Optimising high-intensity treadmill training using the running speed at maximal O_2 uptake and the time for which this can be maintained. *European Journal of Applied Physiology*, 89, 337–343.
- Stephens, N.K., Hawley, J.A., Dennis, S.C., & Hopkins, W.G. (1998). Effects of different interval training programs on cycling time-trial performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 736–41.
- Tanner, R.K., Fuller, K.L., & Ross, M.L.R. (2010). Evaluation of three portable blood lactate analysers: Lactate Pro, Lactate Scout and Lactate Plus. *European Journal of Applied Physiology*, 109, 551–559.
- Thévenet, D., Tardieu, M., Zouhal, H., Jacob, C., Abderrahman, B.A., & Prioux, J. (2007). Influence of exercise intensity on time spent at high percentage of maximal oxygen uptake during an intermittent session in young endurance-trained athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 102, 19–26.
- Thévenet, D., Tardieu-Berger, M., Berthoin, S., & Prioux, J. (2007). Influence of recovery mode (passive *vs.* active) on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young and endurance-trained athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 99, 133–142.

ETUDE III

COMPARAISON DE DEUX EXERCICES INTERMITTENTS
5s-15s VS 30s-30s,
REALISES SUR TAPIS ROULANT ET SUR PISTE

Comparaison de deux exercices intermittents, 5s-15s vs 30s-30s, réalisés sur tapis roulant et sur piste

Hervé Assadi, Romuald Lepers

INSERM U1093, Faculté des Sciences du Sport, Université de Bourgogne, Dijon, France

Résumé

Le but de cette étude était de comparer les réponses physiologiques, la durée d'exercice (i.e. le nombre maximal de répétitions) et la fatigue musculaire lors de deux types d'exercices intermittents courus à la vitesse maximale aérobie (VMA) réalisés sur piste et sur tapis roulant. Treize sujets masculins sportifs ont réalisé, à une semaine d'intervalle, quatre exercices intermittents de type 5s-15s sur piste (5s-15s_{piste}), 5s-15s sur tapis roulant (5s-15s_{TR}), 30s-30s sur piste (30s-30s_{TR}), et 30s-30s sur tapis roulant (30s-30s_{TR}). Au cours de ces exercices, la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2\max}$), la fréquence cardiaque, la lactatémie ([La]), le quotient respiratoire, la durée totale d'exercice (tlim) et la force maximale volontaire des extenseurs du genou (FMV) pré et post-exercice ont été mesurés. Le tlim était significativement ($p<0,001$) plus long lors de l'exercice 30s-30s_{TR} (1551 ± 268 s) par rapport à l'exercice 5s-15s_{piste} (508 ± 106 s) et à l'exercice 30s-30s_{piste} (969 ± 239 s). Le tlim était significativement ($p<0,001$) plus long lors de l'exercice 30s-30s_{piste} par rapport à l'exercice 5s-15s_{piste}. La consommation maximale d'oxygène et le temps passé à 90% de $\dot{V}O_{2\max}$ n'étaient pas significativement différents entre le 5s-15s_{piste} et le 30s-30s_{piste}, alors qu'ils étaient significativement plus faibles lors du 5s-15s_{TR} et du 30s-30s_{TR} en comparaison du 5s-15s_{piste} et du 30s-30s_{piste}. [La] était significativement ($p<0,001$) plus élevée à la fin du tlim 30s-30s_{piste} ($12,4\pm2,4$ mmol.l⁻¹) et du tlim 5s-15s_{piste} ($12,6\pm4,3$ mmol.l⁻¹) par rapport aux valeurs mesurées à la fin du tlim 30s-30s_{TR} ($6,0\pm3,2$ mmol.l⁻¹) et du 5s-15s_{TR} ($8,9\pm2,4$ mmol.l⁻¹). La FMV des extenseurs du genou étaient plus altérée ($p<0,01$) à la suite de l'exercice 5s-15s_{piste} (-21 ± 12 %) par rapport à l'exercice 5s-15s_{TR} (-9 ± 9 %) et 30s-30s_{piste} (-8 ± 8 %). La fatigue musculaire semble dépendre du nombre d'accélérations et de décélérations réalisées au cours d'un exercice intermittent et pourrait limiter le temps d'effort maximal soutenu à VMA.

Introduction

Lors d'un exercice intermittent alternant des périodes d'effort de 15 secondes avec des périodes de récupération de 15 secondes (15s-15s), le fait de maintenir une vitesse de course moyenne à chaque effort, implique des accélérations importantes (Dupont et coll, 2003). Après une phase d'accélération, la vitesse de course se maintient au dessus de la vitesse moyenne pendant 90% du temps d'effort (Dupont et coll, 2003). Accroître le nombre d'accélérations et de décélérations pour parcourir une même distance, conduit à une augmentation significative de la dépense énergétique (Bisciotti, 2000). Nous avons de plus mis en évidence, dans l'étude II, que le nombre maximum de répétitions, ou temps limite (tlim), effectuées à la vitesse maximale aérobie (VMA), était moins important lors d'un exercice intermittent de type 15s-15s, comparé à un exercice intermittent de type 30s-30s. La réduction du tlim pourrait être la conséquence d'une fatigue musculaire plus importante lors du 15s-15s en comparaison du 30s-30s. Cette hypothèse formulée repose sur des résultats obtenus lors d'études portant sur des exercices intermittents très courts enchainés avec des récupérations également courtes, aussi appelés sprints répétés (SR) (Girard et coll, 2011 ; Bishop et coll, 2011). Perrey et coll (2010) ont, par exemple, montré qu'à la suite d'un exercice intermittent de type 5s-30s, la force maximale volontaire des extenseurs du genou (FMV) était réduite de 11%. Un grand nombre d'études justifie l'utilisation d'exercices intermittents dont le temps d'effort est de 5 ou 6 secondes, par le fait que cela représente la durée moyenne des efforts répétés lors de nombreux sports collectifs (Balsom et coll, 1993 ; Gaitanos et coll, 1993 ; Hautier et coll, 1998 ; Aziz et coll, 2000 ; Wragg et coll, 2000 ; Spencer et coll, 2005). Dans ces études, il est préconisé des temps de récupération de 30 à 17 secondes entre les efforts. La comparaison du niveau de fatigue après un exercice intermittent, de type 5s-15s, versus un exercice intermittent, de type 30s-30s, couramment utilisé dans l'entraînement (Billat, 2001), n'a jamais à notre connaissance été réalisée.

Il a été montré que la réalisation d'un exercice intermittent, de type 30s-30s, sur tapis roulant versus sur piste conduit soit à une réduction du temps passé à 95% de la $\dot{V}O_{2max}$ (Tardieu et coll, 2004), et ceci bien que la pente du tapis roulant ait été inclinée de 1% (Jones et Doust, 1996). Cette différence a été expliquée par le fait que sur piste, les sujets devaient fournir une accélération importante au départ pour courir en moyenne à VMA, alors que sur tapis roulant, la vitesse était stable et sans accélération (Tardieu et coll, 2004).

Au cours des exercices intermittents intensifs courts, le maintien d'une vitesse de course élevée serait en rapport avec la capacité aérobie des sujets (Hamilton et coll, 1991 ; Bishop et coll, 2004 ; Buchheit et coll, 2010 ; Buchheit et Ufland, 2011 ; Buchheit et coll, 2012), et serait corrélé à la VMA des sujets (Bishop et Spencer, 2004 ; Dupont et coll, 2005). C'est aussi le cas pour des exercices intermittents de type 30s-30s (Billat et coll, 2000). Au cours des exercices intermittents, la mesure du temps passé à plus de 90% de la $\dot{V}O_{2\max}$ ($T90\% \dot{V}O_{2\max}$) est un critère du niveau de sollicitation du processus aérobie (Dupont et coll, 2003 ; Thévenet et coll, 2007a et 2007b). Si l'intensité de course est adaptée, alors le $T90\% \dot{V}O_{2\max}$ peut-être important lors d'un exercice de type 30s-30s (Millet et coll, 2003). Des observations similaires ont été réalisées lors d'un exercice intermittent de type 15s-15s (Dupont et coll, 2002), mais jamais encore lors d'un exercice intermittent plus court, de type 5s-15s.

Le but de cette étude est de comparer les réponses énergétiques et la fatigue musculaire entre des exercices intermittents de type 30s-30s et de type 5s-15s, courus à la VMA sur piste vs sur tapis roulant. Une fatigue musculaire accrue lors de l'exercice 5s-15s devrait réduire le temps d'effort maximal (tlim) en comparaison d'un exercice de type 30s-30s. De plus, nous faisons l'hypothèse selon laquelle le tlim devrait être plus grand et la fatigue musculaire moins importante si ces deux types d'exercices (5s-15s et 30s-30s) sont réalisés sur tapis roulant, comparativement à une réalisation sur piste.

Matériel et Méthode

Sujets

Treize sujets masculins, étudiants en faculté des Sciences du Sport, ont participé à cette étude. Leurs caractéristiques étaient les suivantes: âge : $20,6 \pm 0,8$ ans; taille : $177,4 \pm 5,7$ cm; poids : $72,3 \pm 6,6$ kg; $\dot{V}O_{2\max}$: $60,0 \pm 5,0$ ml.kg⁻¹.min⁻¹ (moyenne $\pm$ écart type).

Protocole expérimental

Les sujets ont réalisé cinq sessions expérimentales. Un test triangulaire incrémental intermittent sur piste (45-15_{FTT}) a été réalisé la première semaine et a permis d'évaluer la VMA₄₅₋₁₅, la $\dot{V}O_{2\max}$, la fréquence cardiaque maximale ($F_{C\max}$) et la lactatémie [La] post-exercice (Etude II). Les sujets ont ensuite effectué, à une semaine d'intervalle, quatre sessions

d'exercices intermittents: un exercice intermittent 5s-15s (5 secondes de course alternées avec 15 secondes de récupération passive), un exercice intermittent 30s-30s (30 secondes de course alternées avec 30 secondes de récupération passive). Ces deux exercices intermittents ont été réalisés suivant deux modalités différentes, une session sur piste (5s-15s_{piste} et 30s-30s_{piste}) et une session sur tapis roulant (5s-15s_{TR} et 30s-30s_{TR}). La pente du tapis roulant était fixée à 1% (Jones et Doust, 1996). La consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), la fréquence cardiaque (Fc) la lactatémie [La], le nombre maximum de répétitions (temps limite: tlim) ont été analysés lors des quatre sessions.

Mesures des échanges gazeux et de la fréquence cardiaque

Les échanges respiratoires ont été mesurés, cycle par cycle, à l'aide d'une unité portable Cosmed K4b² (COSMED, Rome, Italie), puis moyennés toutes les 5 secondes et les courbes lissées avec un indice de 3 points (Mc Laughlin et coll, 2001, Duffield et coll, 2004). Avant chaque mesure, quatre calibrations ont été effectuées dans l'ordre suivant : calibration de la turbine du K4b² avec une seringue d'un volume de 3 litres (Quinton Instruments, Seattle, Wash, USA); calibration des analyseurs d'O₂ et de CO₂ à l'aide d'un mélange gazeux d'une concentration de 16% O₂ et de 5% de CO₂; calibration du délai; et calibration de l'air ambiant. Le quotient respiratoire (QR), ratio du volume de CO₂ expiré sur le volume d'O₂ inspiré, a été mesuré à la fin de chaque exercice, et a servi d'indicateur quant à la sollicitation de la glycolyse dans la production d'énergie. Le quotient respiratoire maximal (QR_{max}) correspondait à la valeur la plus élevée mesurée à la fin du test 45-15_{FIT} et de chaque exercice intermittent. La fréquence cardiaque a été enregistrée au moyen d'un cardio-fréquencemètre S610i (Polar Electro, Kempele, Finlande), les valeurs ont été moyennées toutes les 5 secondes. La $\dot{V}O_{2max}$ et la F_{Cmax} au cours des différentes sessions correspondaient aux valeurs les plus élevées mesurées au cours d'une période d'au moins 30 secondes. Le temps passé au dessus de 90% de la $\dot{V}O_{2max}$ (T90 $\dot{V}O_{2max}$), a été quantifié au cours des quatre sessions d'exercices intermittents. Ce temps a aussi été exprimé en pourcentage du temps limite (T90%tlim).

Mesure de la lactatémie

La concentration de lactate sanguin a été mesurée, après avoir prélevé un échantillon sanguin (50 μ l) au bout d'un doigt, à l'aide d'un appareil Lactate Pro (LP, Arkray KDK, Japan) (Tanner et coll, 2010). Elle a été mesurée deux minutes après l'arrêt de chaque test.

Test triangulaire intermittent (45-15_{FIT})

Le test 45-15_{FIT}, est un test triangulaire qui consiste en une alternance de périodes de course de 45 s alternées avec des périodes de récupération de 15s (Etude I). Au cours de la première répétition de 45 s de course (palier 1), le sujet effectue une distance de 100 m, entre la balise de départ 1 et la balise d'arrivée 1 (vitesse moyenne de course 8 km.h⁻¹). La vitesse est incrémentée à chaque nouveau palier de 0,5 km.h⁻¹. Le coureur parcourt pour cela une distance supplémentaire de 6,25 mètres à chaque nouvelle période de 45 s de course. Les départs et arrivées sont annoncés par un bip sonore émit par un générateur de bips (Sport-Beeper, Cardi-Sport, France, 2005). Le test est arrêté quand, à la suite d'une incrémentation de la vitesse de course, le sujet n'est plus capable de parcourir en 45 s la distance prévue entre les deux balises désignées. La vitesse atteinte au cours du dernier palier complètement effectué est appelée VMA₄₅₋₁₅.

Exercices intermittents de course à pied de type 5s-15s, 30s-30s, sur piste et sur tapis roulant

Chacune des sessions a été précédée d'un échauffement standardisé constitué, d'une période de 15 minutes de course à une intensité correspondant à 60% de la VMA₄₅₋₁₅, et de 5 accélérations progressives sur une distance de 100 mètres. Une période d'environ 10 minutes s'écoulait entre la fin de l'échauffement et le début du test.

Pour la modalité "piste", et pour chaque sujet, il a été calculé la distance à parcourir en respectivement 5 s et 30 s à la vitesse correspondant à la VMA₄₅₋₁₅. Pour la modalité "tapis roulant", celui-ci était réglé à une vitesse de déplacement correspondant à la VMA₄₅₋₁₅ des sujets. En s'appuyant sur les montants, les sujets montaient sur le tapis en marche puis au signal de fin d'effort s'appuyaient à nouveau sur les montants pour mettre leurs pieds sur le côté de la bande de roulement du tapis. Dans les deux semaines qui ont précédé le début des sessions sur tapis, l'ensemble des sujets a réalisé un apprentissage pour monter et descendre facilement du tapis en marche. Cette technique n'a pas posé de problème aux sujets.

Lors des trois sessions (5s-15_{spiste} ; 30s-30_{spiste} ; 30s-30_{sTR}), les sujets devaient réaliser le plus grand nombre de répétitions possibles à leur VMA₄₅₋₁₅. Le temps limite lors des exercices de type 5s-15s, et 30s-30s correspondait à la durée totale de chacun des exercices intermittents.

Lors du 5s-15s_{TR}, réalisé après la session 5s-15s_{piste} il a été demandé aux sujets de réaliser le même nombre de répétitions que lors du 5s-15s_{piste}, ceci afin de comparer les réponses physiologiques pour un temps d'effort identique. Pour chacun des quatre types d'exercices intermittents, la récupération entre les efforts était passive. Lors de chaque session d'exercices intermittents, les sujets ont reçu des encouragements verbaux, tout au long de l'exercice, pour les motiver à atteindre le plus grand nombre de répétitions possibles.

Figure 1. Sujet équipé d'un système d'analyse des échanges gazeux (K4b2), réalisant un exercice intermittent 5s-15s, avec mesure de la cinétique de la vitesse par l'intermédiaire d'un ensemble de cellules photoélectriques "Super-Tac" et d'un système optique de mesure des temps d'apuis "Opto-Jump".



Mesure de la force maximale volontaire (FMV)

Une mesure de la FMV des muscles extenseurs du genou a été réalisée avant et juste après la réalisation des sessions d'exercices intermittents, 5s-15s_{piste}, 5s-15s_{TR} et 30s-30s_{piste}. Il n'a pas été possible de réaliser les mesures de la FMV lors de la session d'exercice intermittent 30s-30s_{TR}. Les valeurs de force ont été mesurées à l'aide d'une jauge de contrainte (sensibilité: 1,993 mV/V et 0,0049 V/N ; SBB 200 kg, Allegro, Sallanches, France) reliée à une machine à quadriceps (Multi-form, la Roque d'Anthéron, France). Les sujets étaient assis (angle de la hanche = 90°, angle au niveau du genou = 80°). Les signaux de force obtenus par l'intermédiaire de la jauge de contrainte étaient gérés par le logiciel Tida 4.1 (Tida, Heka Elektronik, Lambrecht/Pfalz, Allemagne) et recueillis à une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz.

Analyse de la cinétique de la vitesse

Lors de la session 5s-15s_{piste}, la cinétique de la vitesse, l'accélération, l'amplitude et la fréquence des foulées ont été mesurées à l'aide d'un système de cellules photoélectriques fixes sur rampe métallique, placées tous les 20 cm, (Super-TAC, TT SPORT Technology Training, Galazzano, Republica di San Marino) et d'un système optique de mesure du temps de contact et du temps de suspension (Optojump, Microgate, Bolzano-Bozen, Italie) (figure 1).

Analyse statistique

Après avoir vérifié, par un test de Kolmogorov-Smirnov, que l'ensemble de nos données suivait une distribution normale, un test ANOVA a été utilisé pour comparer l'ensemble des variables sélectionnées ($\dot{V}O_{2\max}$, FC_{max}, tlim, [La], T90 $\dot{V}O_{2\max}$, T90%tlim, FMV) entre les différentes sessions d'exercices. Une analyse Post hoc (test de Newman-Keuls) a été réalisée pour une comparaison par paire, quand cela était nécessaire. Le taux minimum de significativité $P < 0,05$ a été retenu pour identifier des différences significatives entre les tests. Pour réaliser ces analyses statistiques, la version 6.1 du logiciel Statistica (Statsoft, version 6.1, Statistica, Tulsa, OK) pour Windows a été utilisée. L'ensemble des données sont présentées dans le texte sous la forme : moyenne $\pm$ écart type.

Résultats

Session	$\dot{V}O_{2\max}$ (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	FC _{max} (bpm)	QR _{max}	[La] post (mmol.l ⁻¹)
45-15 _{FIT}	60,0 (5,0)	196 (8)	1,30 (0,10)	15,2 (4,3)
5s-15 _{piste}	58,5 (6,0)	192 (9)	1,25 (0,15)	12,6 (4,3)
5s-15 _{STR}	41,5 (4,0)***	170 (13)**	1,00 (0,10)\$	3,5 (2,3)***
30s-30 _{piste}	58,2 (5,0)	193 (9)	1,10 (0,10)\$	10,3 (3,9)
30s-30 _{STR}	49,4 (5,5)***	187 (11)*	1,10 (0,20)\$\$	7,9 (4,7)*

Tableau 1. Réponses physiologiques au cours du test progressif maximal (45-15_{FIT}) et des quatre exercices intermittents. $\dot{V}O_{2\max}$: Consommation maximale d'oxygène; FC_{max}: fréquence cardiaque maximale mesurée lors de l'exercice; QR_{max}: Quotient respiratoire final; [La]: lactatémie post-test. Valeurs moyennes (écart-type). *** $p < 0,001$: significativement différent des exercices 45-15_{FIT}, 5-15_{piste} et 30s-30_{piste}. ** $p < 0,01$: significativement différent des exercices 45-15_{FIT}, 5-15_{piste} et 30s-30_{piste}. * $p < 0,05$: significativement différent des exercices 45-15_{FIT}, 5-15_{piste} et 30s-30_{piste}. \$\$ $p < 0,01$: significativement différent des exercices 45-15_{FIT}, 5-15_{piste}. \$ $p < 0,05$: significativement différent des exercices 45-15_{FIT}, 5-15_{piste}.

La VMA moyenne des sujets, mesurée lors du test 45-15_{FIT} était de $18,6 \pm 1,1$ km.h⁻¹. Les valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2\max}$, FC_{max}, QR_{max}, et [La] obtenues au cours des différents exercices intermittents et du test triangulaire intermittent 45-15_{FIT} sont présentées dans le Tableau 1. La comparaison de l'ensemble des variables à l'effort entre les quatre modalités

d'exercices intermittents, montre que $\dot{V}O_{2\max}$, $F_{C\max}$, $[La]$ post-exercice, étaient significativement ($p<0,001$, $p<0,01$ et $p<0,05$) plus élevées après le 5s-15s_{piste} et le 30s-30s_{piste} en comparaison du 5s-15s_{TR} et du 30s-30s_{TR} (Tableau 1). Les valeurs de $QR_{\max}$ étaient significativement ($p<0,05$) plus élevées lors du 5s-15s_{piste} en comparaison des trois autres types d'exercices intermittents.

Le tlim était significativement ($p<0,001$) plus grand lors du 30s-30s_{TR} par rapport aux modalités 30s-30s_{piste} et 5s-15s_{piste}. De même le tlim était significativement ($p<0,001$) plus grand lors du 30s-30s_{piste} par rapport au 5s-15s_{piste} (figure 1). Les $T90\dot{V}O_{2\max}$ et $T90\%tlim$ étaient nuls lors des exercices intermittents 5s-15s_{TR} et 30s-30s_{TR}. Le $T90\dot{V}O_{2\max}$ lors du 30s-30s_{piste} et du 5s-15s_{piste} étaient respectivement égaux à $415,7 \pm 185$ s et $321,2 \pm 137,9$ s, et n'étaient pas différents entre eux. Le $T90\%tlim$ lors du 30s-30s_{piste} et du 5s-15s_{piste} étaient respectivement égaux à $45,1 \pm 18,2$ % et $61,3 \pm 21,5$ %, et n'étaient pas différents entre eux.

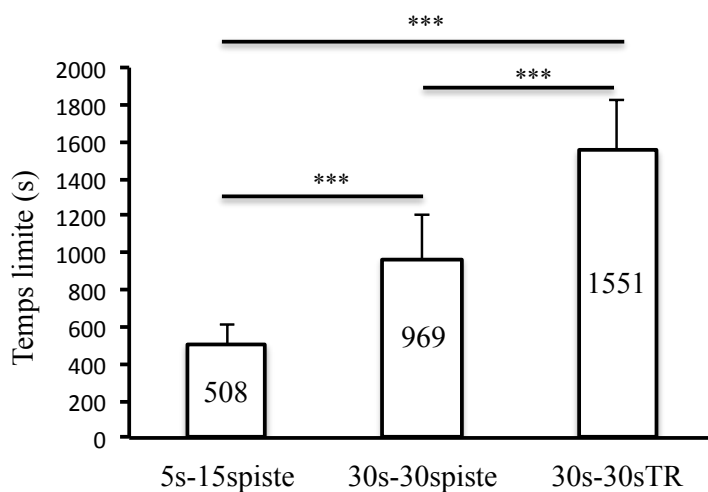


Figure 1. Comparaison des temps limites lors de trois sessions d'exercices intermittents (5s-15s_{piste}, 30s-30s_{piste} et 30s-30s_{TR}). Le temps limite lors de l'exercice 30s-30s_{TR} est significativement ($p<0,001$) plus grand en comparaison des exercices 5s-15s_{piste} et 30s-30s_{piste}. Le temps limite lors de l'exercice 30s-30s_{piste} est significativement ($p<0,001$) plus grand en comparaison de l'exercices 5s-15s_{piste}.

Les FMV des muscles extenseurs du genou post-exercice étaient significativement réduites en comparaison des valeurs pré-exercice lors du 5s-15s_{piste} (-21 ± 5 %, $p<0,01$). La FMV n'était pas altérée après le 30s-30s_{piste} (-7 ± 7 %), et le 5s-15s_{TR} (-8 ± 7 %) (figure 2).

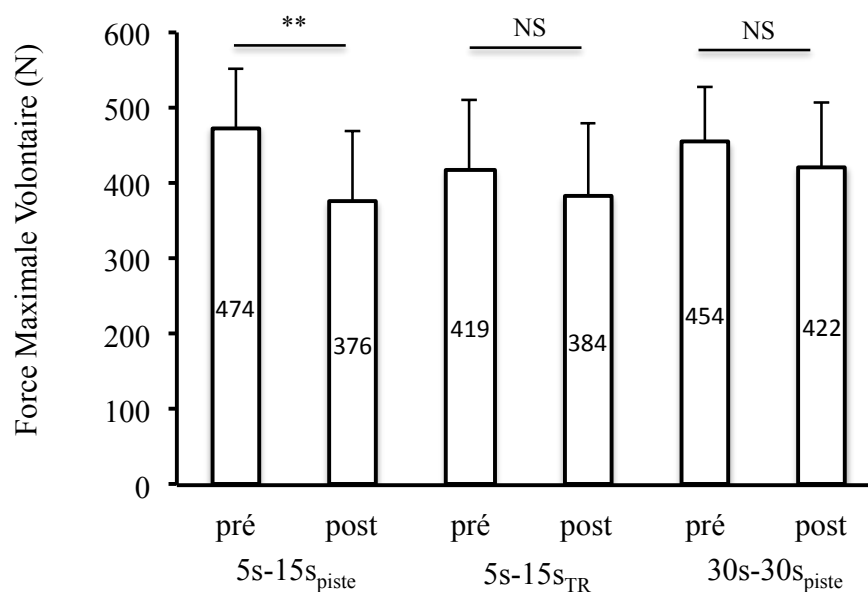


Figure 2. Comparaison de la diminution de la force maximale volontaire des muscles extenseurs du genou à la suite de trois modalités d'exercice intermittent, 5s-15s_{piste}, 5s-15s_{TR} et 30s-30s_{piste}. Lors du 5s-15s_{piste}, la FMV est significativement diminuée après l'exercice. ** p<0,01.

Lors du 5s-15s, les sujets ont réalisé une distance moyenne de $26 \pm 1,6$ m lors des $25,5 \pm 5,3$ répétitions effectuées. La figure 3, représente la cinétique moyenne de la vitesse lors du 5s-15s_{piste}, pour l'ensemble des sujets et au cours de chaque effort de 5 secondes.

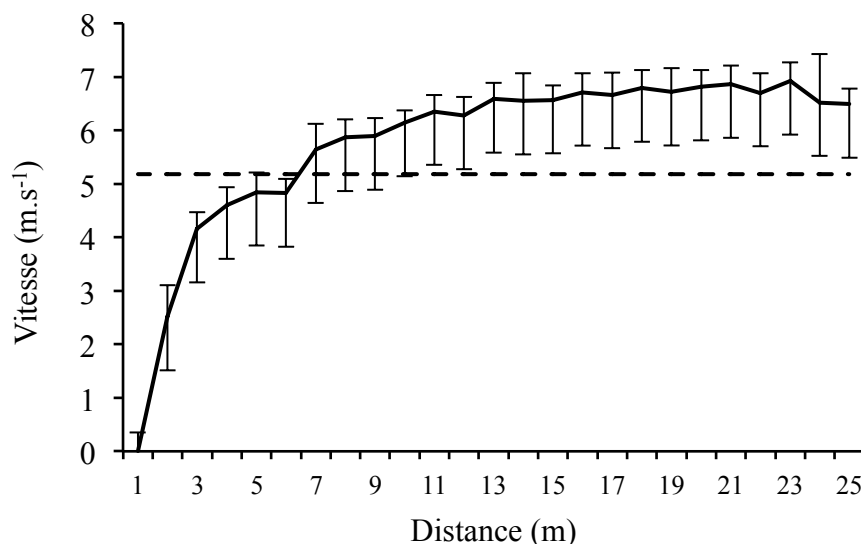


Figure 3. Cinétique de la vitesse lors du 5s-15s_{piste}. La courbe pleine représente la vitesse moyenne des sujets à chaque mètre parcouru. La ligne en pointillés représente la vitesse moyenne ($5,1 \pm 0,33$ m.s⁻¹) maintenue pendant les 5 s de course (VMA).

Discussion

Le but de cette étude était de comparer les réponses physiologiques, les tlim et la fatigue musculaire lors d'exercices intermittents de différentes durées (5s-15s vs 30s-30s) et réalisés, sur piste ou sur tapis roulant. Les résultats montrent que le tlim de l'exercice 30s-30s_{piste} était significativement plus long que le tlim de l'exercice 5s-15s_{piste}. Pour ces deux exercices, les tlim étaient compris entre 508 s et 969 s, ce qui correspond aux valeurs habituelles de la littérature, comprises entre 427 s et 1270 s (Billat et coll, 2000; Dupont et coll, 2004; Thévenet et coll, 2007a; Millet et coll, 2003). Le tlim de l'exercice 30s-30s_{TR} était significativement plus long que le tlim de l'exercice 30s-30s_{piste} et 5s-15s_{piste}, respectivement de 37 % et 67 %. L'exercice intermittent 30s-30s_{piste} a permis d'augmenter le temps de maintien à la VMA de 47 % par rapport au 5s-15s_{piste}. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle le 30s-30s serait la forme d'exercice permettant de réaliser le plus grand temps d'effort au cours d'une séance d'entraînement en comparaison de l'exercice 5s-15s. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans l'étude précédente (étude II) qui a montré que le 30s-30s était une forme d'exercice intermittent permettant de réaliser un plus grand temps d'effort en comparaison d'autres formes comme, le 15s-15s, le 60s-60s. Ils permettent de montrer également que réaliser l'exercice intermittent sur tapis roulant par rapport à la piste, allonge considérablement le temps d'effort à la VMA, ce qui semble en contradiction avec les résultats de Tardieu et coll (2004). Ces auteurs ont en effet montré que, bien que l'exercice sur tapis roulant induisait une sollicitation métabolique moins importante que sur piste, il n'y avait pas de différence de tlim entre les deux modalités. Cette différence pourrait être expliquée par le fait que dans l'étude de Tardieu et coll (2004), les sujets réalisaient un exercice intermittent 30s-30s à la VMA, avec une récupération active à 50 % de la VMA.

Le $T90\dot{V}O_{2max}$ et le T90%tlim n'étaient pas significativement différents entre le 5s-15s_{piste} et le 30s-30s_{piste}, bien que le t90%tlim lors de l'exercice 5s-15s_{piste} soit 16,2 % plus grand en comparaison du 30s-30s_{piste}. Les valeurs de T90%tlim étaient comprises entre 45 % et 61 % lors de ces deux types d'intermittents. Ces résultats sont en accord avec ceux d'études précédentes ayant trouvées des valeurs de T90%tlim comprises entre 41 % et 84 % (Billat, 2000; Thévenet et coll, 2007a et 2007b; Dupont et coll, 2004). La lactatémie n'était pas non plus différente entre le 30s-30s_{piste} et le 5s-15s_{piste}. Les deux formes d'exercices intermittents présentaient donc des niveaux de sollicitation aérobie élevés (Billat, 2000; Thévenet et coll, 2007a et 2007b) et comparables. Cependant, lorsque ces mêmes exercices sont réalisés sur

tapis roulant, la sollicitation aérobie n'atteignait jamais 90 % de la $\dot{V}O_{2\max}$, elle représentait respectivement en moyenne 69 % et 82 % de la $\dot{V}O_{2\max}$; lors des exercices 5s-15s_{TR} et 30s-30s_{TR}. Les différences de sollicitations métaboliques entre la course continue sur piste et la course continue sur tapis roulant serait la résistance de l'air à l'avancement (Pugh, 1970 ; Davis, 1980). La part relative de la résistance de l'air à l'avancement dans l'augmentation de la consommation d'oxygène, en condition extérieure par rapport au tapis roulant en laboratoire, est de 2 % à 5 m.s⁻¹ (Davis, 1980) ; cette différence devrait être compensée par une pente du tapis roulant fixée à 1 % (Doust, 1996). La vitesse moyenne des sujets lors des quatre exercices intermittents était de 5,2 m.s⁻¹, de plus la pente du tapis roulant avait été fixée à 1%, et pourtant la différence de consommation d'oxygène était très largement supérieure à 2 %. Ces résultats suggèrent que la différence qui existe entre des exercices intermittents effectués sur tapis roulant ou sur piste est bien supérieure à la différence qui existe entre un exercice continu effectué sur tapis roulant ou sur piste.

La réalisation des exercices 5s-15s ou 30s-30s sur tapis roulant a modifié considérablement la cinétique de la vitesse au cours de l'effort. Sur le tapis, le sujet ne dépasse jamais la vitesse qui lui est imposée, il ne réalise pas non plus l'accélération et la décélération nécessaires lors de la course sur piste. Lors de l'exercice intermittent 5s-15s_{piste}, pour réaliser la distance qui correspond à leur VMA₄₅₋₁₅, les sujets ont été obligés de fournir une accélération de 5,40±1,0 m.s⁻² lors des 5 premiers mètres, l'accélération se maintenait entre le 5 m et le 25 m à 1,04±0,43 m.s⁻². Comme il a été suggéré dans l'étude II, le plus grand nombre d'accélération et de décélération, lors du 5s-15s vs 30s-30s, pourrait être la source d'une fatigue musculaire plus importante. Les résultats montrent que les valeurs de FMV des muscles extenseurs du genou ont diminué de 21 % à la suite du 5s-15s_{piste}, alors qu'elles ont baissé (non significativement) de 9% et de 8% lors du 5s-15s_{TR} et du 30s-30s_{piste} ce qui confirme donc cette hypothèse. La réalisation d'un exercice intermittent de type 5s-15s, se traduit par un tlim plus court et une fatigue musculaire plus importante en comparaison du 30s-30s, pour une sollicitation de la $\dot{V}O_{2\max}$ comparable. Ces résultats sont en accord avec une étude précédente (Perrey et coll, 2010) qui a montré que la fatigue neuromusculaire était importante lors des intermittents courts et intensifs. La diminution de la FMV (21 %) à la suite de l'exercice 5s-15s_{piste} est du même ordre de grandeur que celles observées à la suite d'exercices continus, de course, de durées beaucoup plus longues (Lepers et coll, 2000b ; Millet et Lepers, 2004 ; Lepers, 2009).

Conclusion

Sur le plan de la sollicitation du processus aérobie, il existe des similitudes entre les exercices intermittents de type 5s-15s_{piste} et de type 30s-30s_{piste}. Cependant, le tlim à VMA est considérablement réduit lors du 5s-15s_{piste} par rapport au 30s-30s_{piste}. La fatigue musculaire est accentuée, lors d'un exercice intermittent, quand la fréquence des accélérations et décélérations augmente. D'un point de vue pratique, si le but d'une séance d'entraînement est de développer l'endurance aérobie maximale alors l'exercice de type 30s-30s nous paraît le plus adapté, par contre si le but est d'induire une sollicitation musculaire importante, en plus d'un travail aérobie maximal, alors les exercices intermittents plus courts de type 5s-15s, nous paraissent plus adéquats. D'un point de vue fondamental, il reste à approfondir notre compréhension des mécanismes de la fatigue musculaire, en particulier l'importance des composantes périphériques et centrales de la fatigue, lors d'exercices intermittents.

ETUDE IV

INFLUENCE DE DEUX MODALITES DE PRE-FATIGUE
MUSCULAIRE SUR LE TEMPS LIMITE LORS D'UN EXERCICE
INTERMITTENT DE COURSE A PIED

Influence de deux modalités de pré-fatigue musculaire sur le temps limite lors d'un exercice intermittent de course à pied

Hervé Assadi, Romuald Lepers, Theurel Jean

INSERM U1093, Faculté des Sciences du Sport, Université de Bourgogne, Dijon, France

Résumé

Le but de cette étude était d'analyser les réponses physiologiques et la durée d'exercice (i.e. le nombre maximal de répétitions), réalisés après une pré-fatigue des muscles extenseurs du genou (évoquée électriquement ou volontaire) lors d'un exercice intermittent de type 30s-30s. Dix sept sujets sportifs ont réalisé un test intermittent progressif et maximal pour déterminer leur VMA. Les sujets ont ensuite réalisé le plus grand nombre de répétitions possible lors d'un exercice intermittent 30s-30s couru à la VMA ($tlim_{30s-30s}$) dans trois conditions. Une condition sans pré-fatigue (CONT), une condition avec pré-fatigue au cours de laquelle 30 contractions isométriques étaient évoquées par électromyostimulation avant le $tlim_{30s-30s}$ (PRE_{EVO}), et une condition avec pré-fatigue au cours de laquelle les sujets réalisaient 30 contractions isométriques volontaires avant le $tlim_{30s-30s}$ (PRE_{VOL}). Au cours des exercices intermittents, la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), la fréquence cardiaque, la lactatémie ([La]), le quotient respiratoire, la durée totale d'exercice (tlim) et le moment maximal volontaire isométrique des extenseurs du genou (FMV) pré et post-exercice ont été mesurés. Le tlim était significativement ($p<0,001$) plus long lors de la session CONT (1281 ± 257 s) par rapport à la session PRE_{EVO} (730 ± 321 s) et à la session PRE_{VOL} (893 ± 353 s). Le moment maximal volontaire était significativement ($p<0,001$) diminué après les exercices de pré-fatigue (PRE_{EVO}= -42,3 % et PRE_{VOL}= -23,8 %) et après le $tlim_{30s-30s}$, par rapport aux mesures réalisées avant l'exercice fatigant. Les temps passés à 90 % de la $\dot{V}O_{2max}$ en valeur absolue et en pourcentage du $tlim_{30s-30s}$ ($T90\%\dot{V}O_{2max}$ et $T90\%tlim$) n'étaient pas différents entre les trois sessions d'exercices (CONT, PRE_{EVO} et PRE_{VOL}). Un exercice de pré-fatigue musculaire conduit à une réduction importante du $tlim_{30s-30s}$, cependant le niveau de sollicitation aérobie reste élevé et n'est pas différent que la pré-fatigue musculaire soit générée par des contractions évoquées ou volontaires.

Introduction

L'intérêt principal des exercices intermittents comparés aux exercices continus est la possibilité de maintenir une intensité plus élevée et un temps de travail plus long (Astrand et coll, 1960 ; Christensen et coll, 1960 ; Gorsotiaga et coll, 1991 ; Billat et coll, 1996 ; Billat et coll, 2000). Il a été montré qu'un entraînement composé d'exercices intermittents permettait une amélioration des performances en endurance avec des modifications notoires des paramètres physiologiques (Billat, 2001a et 2001b ; Laursen, 2001 ; Laursen et Jenkins, 2002 ; Esfarjani et Laursen, 2007). Parmi les multiples formes d'exercices intermittents, celui consistant à alterner des périodes de 30s de course avec des périodes de 30s de récupération (30s-30s) est très utilisé dans le domaine de l'entraînement pour développer l'aptitude aérobie (Billat, 2001a). Il a été montré que l'exercice intermittent de type 30s-30s, permettait à la fois de réaliser un nombre important de répétitions, à la vitesse maximale aérobie (VMA), et de dépasser 90 % de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2\max}$) pendant un temps d'effort relativement long (Billat et coll, 2000 ; Millet et coll, 2003 ; Thévenet et coll, 2007 ; Etudes I et II).

La performance en course à pied est corrélée à la VMA (Léger et coll, 1986 ; Lacour et coll, 1989 ; Lacour et coll, 1991 ; Padilla et coll, 1992 ; Berthoin et coll, 2001) et aux capacités musculaires de production de force (Nummela et coll, 2006). Sale et coll (1990) ont montré que la combinaison d'exercices intermittents de type 3min-3min réalisés à un pourcentage élevé de $\dot{V}O_{2\max}$ et d'exercices de force, à l'entraînement, permettait une amélioration de la performance en course à pied. Réaliser des exercices de force (type plyométrique), induisant une fatigue musculaire importante, conduit cependant à une diminution de la vitesse de course lors d'exercices intermittents intensifs (Twist et Eston, 2005). Nous avons dans l'étude III montré, qu'à la suite d'un exercice intermittent de type 30s-30s, la diminution de la force maximale volontaire (FMV), n'était pas significative, alors qu'à la suite d'exercices intermittents plus courts de type 5s-30s et 5s-15s, la diminution de FMV des muscles extenseurs du genou pouvait atteindre plus de 20 % (Perrey et coll, 2010).

L'effet d'un exercice de pré-fatigue musculaire sur la capacité à effectuer un exercice intermittent de type 30s-30s le plus longtemps possible, n'a, à notre connaissance, jamais été étudié. Il a été montré que la fatigue neuromusculaire était plus importante à la suite d'une série de contractions musculaires évoquées par électromyostimulation en comparaison de

contractions volontaires (Theurel et coll, 2007 ; Gondin et coll, 2006). La capacité à réaliser un exercice intermittent pourrait donc être dépendante de la modalité de l'exercice pré-fatigant (contractions volontaires ou évoquées) réalisé.

Le but de cette étude est de comparer les réponses physiologiques et le temps limite d'effort pour des exercices intermittents de type 30s-30s courus à la VMA, précédés d'une fatigue musculaire au niveau des muscles extenseurs du genou, générée par des contractions musculaires évoquées vs volontaires.

Nous faisons l'hypothèse que le temps d'effort et l'intensité de la sollicitation du système aérobie lors d'un exercice intermittent de type 30s-30s, seront plus faibles après une pré-fatigue musculaire constitué de contractions évoquées en comparaison de contractions volontaires.

Matériel et Méthode

Sujets

Dix sept sujets masculins, étudiants en faculté des Sciences du Sport, ont participé à cette étude. Leurs caractéristiques étaient les suivantes: âge : $21,1 \pm 1,2$ ans; taille : $179,1 \pm 5,0$ cm; poids : $73,8 \pm 6,9$ kg; $\dot{V}O_{2\max}$: $61,4 \pm 4,8$ ml.kg⁻¹.min⁻¹ (moyenne $\pm$ écart type).

Protocole expérimental

Les sujets ont réalisé 4 sessions de tests.

Un test progressif et maximal intermittent (45-15_{FIT}) (voir Etude I) a été réalisé lors de la première session. Les sujets ont réalisé ensuite trois sessions d'exercices intermittents au cours des quatre semaines suivantes. Le test 45-15_{FIT} a permis d'évaluer la VMA₄₅₋₁₅, la $\dot{V}O_{2\max}$, la fréquence cardiaque maximale (F_{Cmax}) et la lactatémie [La] post-exercice. Au cours de la deuxième session, les sujets ont effectué un exercice intermittent de type 30s-30s à la vitesse maximale aérobie au cours duquel ils devaient réaliser le plus de répétitions possibles (tlim_{30s-30s}), (CONT). Au cours de la troisième et quatrième session, les sujets ont effectué un exercice pré-fatigant constitué de contractions musculaires évoquées par électromyostimulation (PRE_{EVO}) ou de contractions volontaires isométriques des muscles extenseurs du genou (PRE_{VOI}), juste avant l'exercice intermittent. Les exercices de pré-fatigue et les exercices intermittents étaient précédés et suivis d'un test de détermination des capacités de production de moment maximal volontaire isométrique des muscles extenseurs du genou et de tests neuromusculaires.

Mesures des échanges gazeux et de la fréquence cardiaque

Les échanges respiratoires ont été mesurés, cycle par cycle, à l'aide d'une unité portable Cosmed K4b² (COSMED, Rome, Italie), puis moyennés toutes les 5 secondes et les courbes lissées avec un indice de 3 points (Mc Laughlin et coll, 2001, Duffield et coll, 2004). Avant chaque mesure, quatre calibrations ont été effectuées dans l'ordre suivant : calibration de la turbine du K4b² avec une seringue d'un volume de 3 litres (Quinton Instruments, Seattle, Wash, USA); calibration des analyseurs d'O₂ et de CO₂ à l'aide d'un mélange gazeux d'une concentration de 16% O₂ et de 5% de CO₂; calibration du délai; et calibration de l'air ambiant. Le quotient respiratoire (QR), ratio du volume de CO₂ expiré sur le volume d'O₂ inspiré, a été mesuré à la fin de chaque exercice, et a servi d'indicateur quant à la sollicitation de la glycolyse dans la production d'énergie. Le quotient respiratoire maximal (QR_{max}) correspondait à la valeur la plus élevée mesurée à la fin du test 45-15_{FIT} et de chaque exercice intermittent. La fréquence cardiaque a été enregistrée au moyen de cardio-fréquencemètres S610i (Polar Electro, Kempele, Finlande), les valeurs ont été moyennées toutes les 5 secondes. La $\dot{V}O_{2\max}$ et la $F_{C\max}$ au cours des différentes sessions, correspondaient aux valeurs les plus élevées mesurées au cours d'une période d'au moins 30 secondes. Les temps passés au dessus de 90% et 95% de la $\dot{V}O_{2\max}$ ($T90 \dot{V}O_{2\max}$ et $T95 \dot{V}O_{2\max}$), ont été quantifiés au cours des quatre sessions d'exercices intermittents. Ces temps ont aussi été exprimés en pourcentage du temps limite: T90%tlim et T95%tlim.

Mesure de la lactatémie

La concentration de lactate sanguin a été mesurée, après avoir prélevé un échantillon sanguin (50 µl) au bout d'un doigt, à l'aide d'un appareil Lactate Pro (LP, Arkray KDK, Japan) (Tanner et coll, 2010). Elle a été mesurée une minute après l'arrêt de chaque test.

Test triangulaire intermittent (45-15_{FIT})

Le test 45-15_{FIT}, est un test triangulaire qui consiste en une alternance de périodes de course de 45 s alternées avec des périodes de récupération de 15s (décrit dans l'étude I). Au cours de la première répétition de 45 s de course (palier 1), le sujet effectue une distance de 100 m, entre la balise de départ 1 et la balise d'arrivée 1 (vitesse moyenne de course 8 km.h⁻¹). La vitesse est incrémentée à chaque nouveau palier de 0,5 km.h⁻¹. Le coureur parcourt pour cela

une distance supplémentaire de 6,25 mètres à chaque nouvelle période de 45 s de course. Les départs et arrivées sont annoncés par un bip sonore émit par un générateur de bips (Sport-Beeper, Cardi-Sport, France, 2005). Le test est arrêté, quand à la suite d'une incrémentation de la vitesse de course, le sujet n'est plus capable de parcourir en 45 s la distance prévue entre les deux balises désignées. La vitesse atteinte au cours du dernier palier complètement effectué est appelée VMA_{45-15} .

Exercices intermittents de course à pied de type 30s-30s

Lors des trois sessions , CONT, PRE_{EVO} et PRE_{VOL} , les sujets devaient réaliser le plus grand nombre de répétitions possibles à la VMA_{45-15} , lors d'un exercice intermittent alternant des périodes de course de 30 secondes avec des périodes de récupération de 30 secondes. Lors de chaque session d'exercices intermittents, les sujets ont reçu des encouragements verbaux, tout au long de l'exercice, pour les motiver à atteindre le plus grand nombre de répétitions possibles.

Mesure du moment maximal volontaire

La capacité de production de moment maximal des muscles extenseurs du genou, a été mesuré avant et juste après la réalisation des exercices pré-fatigants et après les exercices intermittents. Un ergomètre isocinétique de type Biodex (biodex Corporation, Shirley, New-York, Etats Unis) a été utilisé. Les sujets été assis (angle de la hanche = 90° , angle au niveau du genou = 80°).

Paramètres neuromusculaires

La technique de stimulation percutanée du nerf moteur lors des contractions maximales volontaires, ou technique de secousse surimposée a été utilisée pour estimer le niveau d'activation maximale des muscles extenseurs du genou. Des stimulations simples et double (doublet) évoquées sur le muscle relâché ont été utilisées pour caractériser les propriétés contractiles des muscles extenseurs du genou (Lepers, 2010). Trois stimulations du nerf fémoral étaient effectuées, la première au repos avant (secousse contrôle), pendant (secousse surimposée), puis après (secousse potentiée) la contraction maximale volontaire (CMV) des muscles extenseurs du genou. La détection du signal a été réalisée par dérivation bipolaire à l'aide d'une paire d'électrodes de surface en chlorure d'argent de 10 mm de diamètre (Contrôle graphique Médical, Brie-Comte-Robert, France). Le signal EMG était enregistré sur les chefs

superficiels du muscle quadriceps, vastus lateralis (VL), vastus medialis (VM) et rectus femoris (RF). Le moment maximal volontaire, l'amplitude de la secousse (Tw), l'amplitude du doublet (Db), le niveau d'activation volontaire maximal (NA), l'amplitude de l'onde M (M) des muscles VM et du RF, ont été analysés.

Pré fatigue musculaire

Lors de la session PRE_{EVO}, un exercice fatigant, constitué des contractions bilatérales musculaires évoquées par électromyostimulation des muscles extenseurs du genou, ont été réalisés. Nous avons utilisé un myostimulateur (Compex Médical SA, Eclublens, Suisse) pour induire 30 stimulations de 5 s alternées avec des phases de récupérations de 20 s (Zory et coll, 2005 ; Gondin et coll, 2006 et Maffiuletti, 2010). L'intensité pouvait varier de 25 mA à 100 mA, suivant les sujets. L'intensité du courant a été augmentée au fur et à mesure des 30 contractions pour maintenir un niveau de force évoqué équivalent à $40 \pm 10\%$ de la force maximale volontaire (figure 1).

La session PRE_{VOL}, était constituée de 30 contractions isométriques volontaires des muscles extenseurs du genou bilatérales réalisées à un même niveau de force que lors des contractions évoquées. La force produite était mesurée à l'aide d'une jauge de contrainte (sensibilité: 1,993 mV/V et 0,0049 V/N ; SBB 200 kg, Allegro, Sallanches, France) reliée à une machine à quadriceps (Multi-form, la Roque d'Anthéron, France). Les sujets pouvaient contrôler par l'intermédiaire d'un écran le niveau de force à produire lors de chaque contraction.

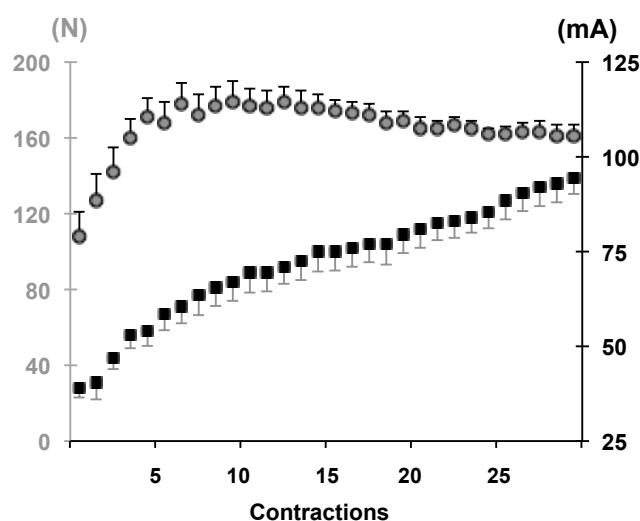


Figure 1. Evolution de la force musculaire et de l'intensité de la stimulation au cours des 30 répétitions lors des stimulations évoquées.

Analyse statistique

Après avoir vérifié, par un test de Kolmogorov-Smirnov, que l'ensemble de nos données suivaient une distribution normale, un test ANOVA à 2 facteurs (temps x condition) a été utilisé pour comparer l'ensemble des variables sélectionnées ($\dot{V}O_{2\max}$, FCmax, tlim, [La], T90 $\dot{V}O_{2\max}$, T90%tlim, CMV, NA, Db, Tw, amplitude onde M) entre les différentes sessions d'exercices. Une analyse Post hoc (test de Newman-Keuls) a été réalisée pour une comparaison par paire, quand cela était nécessaire. Le taux minimum de significativité $P < 0,05$ a été retenu pour identifier des différences significatives entre les tests. Pour réaliser ces analyses statistiques la version 6.1 du logiciel Statistica (Statsoft, version 6.1, Statistica, Tulsa, OK) pour Windows a été utilisée. L'ensemble des données sont présentées dans le texte sous la forme : moyenne $\pm$ écart type.

Résultats

Session	$VO_{2\max}$ (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	F _{Cmax} (bpm)	[La] (mmol.l ⁻¹)	T90% $VO_{2\max}$ (s)	T90%tlim (%)	T95% $VO_{2\max}$ (s)	T95%tlim (%)
CONT	60,4 (4,5)	196 (7)	13,8 (4,2)	439 (193)	34,5 (14,2)	190 (149)	14,6 (10,7)
PRE _{EVO}	60,2 (3,9)	192 (10)	13,1 (2,9)	313 (181)	41,7 (10,5)	168 (145)	20,8 (9,4)
PRE _{VOL}	59,5 (4,6)	190 (8)	10,7 (3,7)	397 (262)	42,6 (13,3)	193 (198)	18,7 (10,4)

Tableau 1. Ensemble des variables physiologiques mesurées lors des trois sessions d'exercices intermittents: CONT, PRE_{EVO} et PRE_{VOL}. $VO_{2\max}$: Consommation maximale d'oxygène; F_{Cmax} : fréquence cardiaque maximale mesurée lors de l'exercice; [La]: lactatémie post-test. T90% $VO_{2\max}$, T90%tlim et T95% $VO_{2\max}$, T95%tlim: temps passé au dessus de 90% de la $VO_{2\max}$, en valeur absolue et en valeur relative. Valeur moyenne (écart-type).

Les valeurs de VMA, $\dot{V}O_{2\max}$, F_{Cmax}, QR_{max}, et [La], obtenues lors du 45-15_{FIT} étaient égales respectivement à: 17,8 $\pm$ 0,8 km.h⁻¹ ; 61,4 $\pm$ 4,8 ml.min⁻¹.kg⁻¹ ; 195 $\pm$ 7 bpm ; 1,30 $\pm$ 0,10 ; 13,5 $\pm$ 2,3 mmol.l⁻¹. L'ensemble des variables physiologiques mesurées lors des trois exercices intermittents sont présentées dans le tableau 1. Il n'y avait de différence significative entre les trois conditions quelques soient les variables.

Le $tlim_{30s-30s}$ lors de la session CONT était significativement ($p<0,001$) plus grand, de $44\pm5\%$ et de $31\pm3\%$, respectivement par rapport aux sessions PRE_{EVO} et PRE_{VOL} (figure 2).

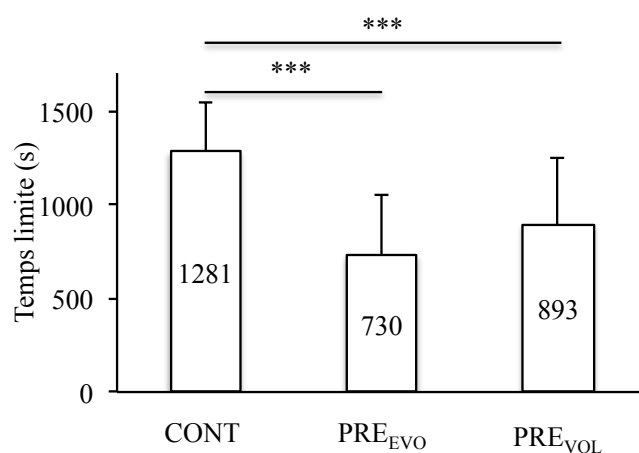


Figure 2. Comparaison des temps limites (tlim) lors des trois sessions (CON, PRE_{EVO} et PRE_{VOL}). Le $tlim_{30s-30s}$ lors de la condition contrôle (CONT) est significativement ($p<0,001$) plus grand en comparaison des conditions pré-fatigue contractions évoquées (PRE_{EVO}) et pré-fatigue contractions volontaires (PRE_{VOL}).

Le moment maximal volontaire, était significativement ($p<0,001$) réduit après les exercices de pré-fatigue et les exercices intermittents. La réduction était en moyenne de $42,3\pm14\%$ lors de la session PRE_{EVO} et de $23,8\pm9\%$ lors de la session PRE_{VOL} par rapport aux mesures réalisées avant l'exercice (figure 3). Le moment maximal volontaire n'a pas été altéré après l'exercice intermittent sans pré-fatigue.

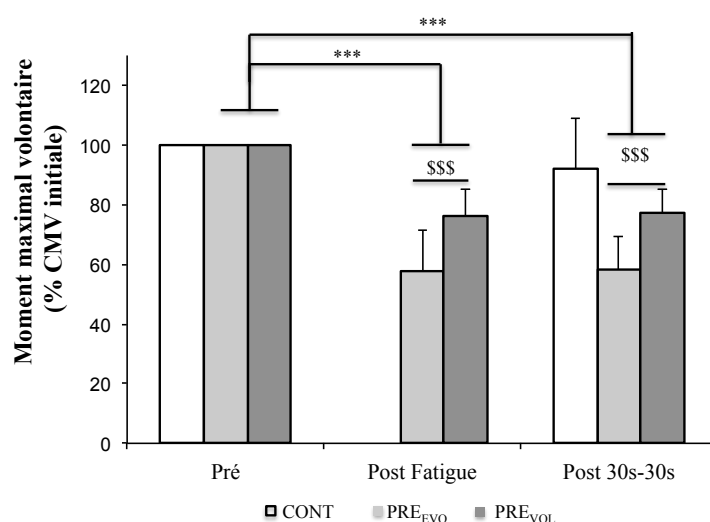


Figure 3. Evolution du moment maximal volontaire des muscles extenseurs du genou après l'exercice fatigant (Post Fatigue), et après le $tlim_{30s-30s}$ (Post 30s-30s), lors des trois sessions CONT, PRE_{EVO} et PRE_{VOL} . *** $p<0,001$: différence significative entre les valeurs Pré et Post fatigue. \$\$\$ $p<0,001$: différence significative entre les sessions PRE_{EVO} et PRE_{VOL} .

L'ensemble des paramètres neuromusculaires mesurés, pré et post contractions évoquées ou volontaires, sont présentées en figure 4. Le niveau d'activation n'était pas altéré à la suite des conditions de pré-fatigue. L'ensemble des autres paramètres mesurés étaient significativement ($p<0,001$ et $p<0,01$) abaissés à la suite de la préfatigue, dans la condition PRE_{EVO} et PRE_{VOL}: amplitude du doublet (-45 ± 2 % lors de PRE_{EVO} et -33 ± 4 % lors de PRE_{VOL}), amplitude de la secousse (-38 ± 4 % lors de PRE_{EVO} et -36 ± 4 % lors de PRE_{VOL}), amplitude de l'onde M du muscle VL (-36 ± 8 % lors de PRE_{EVO} et -16 ± 6 % lors de PRE_{VOL}), et amplitude de l'onde M du muscle RF (-27 ± 6 % lors de PRE_{EVO} et -18 ± 7 % lors de PRE_{VOL}). Les valeurs de l'amplitude du Db et de l'onde M du muscle VL étaient significativement ($p<0,01$) plus basses lors de PRE_{EVO} par rapport à PRE_{VOL}.

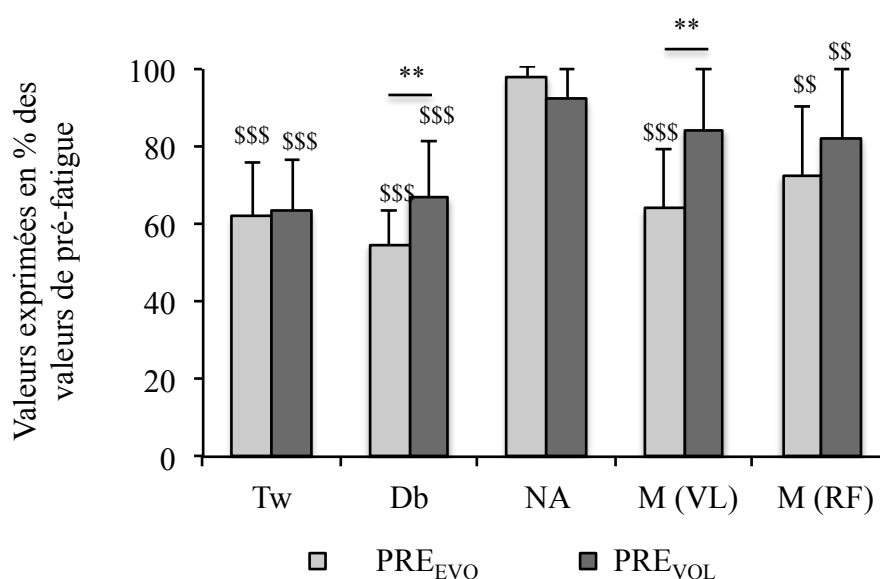


Figure 4. Evolution des paramètres neuromusculaire après les deux séances de pré-fatigue musculaire (PRE_{EVO} et PRE_{VOL}). Tw: amplitude de la secousse musculaire. Db: amplitude du doublet. NA: Niveau d'activation volontaire maximal. M (VL) et M (RF): amplitude de l'onde M du muscle Vatus Lateralis et Rectus Femoris. ** $p<0,01$: significativement différent entre les deux sessions PRE_{EVO} et PRE_{VOL}. \$\$ $p<0,01$ et \$\$\$ $p<0,001$: valeurs significativement différentes des valeurs de pré-fatigue.

Discussion

L'objet de cette étude était de comparer les réponses physiologiques, les tlim et la fatigue neuromusculaire, lors de trois sessions d'exercices intermittents 30s-30s, courus à la VMA et précédés ou non d'une pré-fatigue musculaire sur les muscles extenseurs du genou. Lors de la session sans pré-fatigue, la capacité de production de force maximale volontaire des muscles extenseurs du genou n'a pas été altérée après l'exercice intermittent. La fatigue musculaire a été plus importante lors de PRE_{EVO} vs PRE_{VOL}. Le tlim_{30s-30s} n'a pas induit de fatigue musculaire supplémentaire. Le temps de récupération (~5 min), compris entre l'arrêt

de l'exercice intermittent et les tests neuromusculaires peut expliquer l'absence de réduction des capacités maximales de production de force. D'autre part, la fatigue musculaire était plus importante lors de la session PRE_{EVO} comparativement à la session PRE_{VOL}. Cette différence s'explique par l'augmentation continue de l'intensité électrique des stimulations lors de la condition PRE_{EVO}, qui a permis aux sujets de maintenir un niveau de force élevé (~40 % de force max) pendant les 30 répétitions. La perte de force mesurée lors de la session PRE_{EVO} (42 %) était supérieure aux valeurs habituellement constatées dans les études ayant utilisé l'électromyostimulation (Zory et coll, 2005 ; McNeil et coll, 2006 ; Theurel et coll, 2007). Le fait que la capacité de production de force maximale des muscles extenseurs ne soit pas altérée après le tlim_{30s-30s}, lors des trois sessions, confirme les observations réalisées dans l'étude III. C'est-à-dire qu'un exercice intermittent 30s-30s réalisé à la VMA n'induit pas une fatigue des muscles extenseurs du genou (mesurée ~5 minutes après la fin d'exercice). A la suite des deux conditions de pré-fatigue l'excitabilité des muscles VL et RF, l'amplitude de la secousse et du doublet ont significativement diminuées ; par contre le niveau d'activation n'a pas été modifié. Ces résultats montrent que la fatigue induite par la pré-fatigue était plutôt d'ordre périphérique (altération du couplage excitation-contraction). Bien que les altérations neuromusculaires soient plus importantes lors de PRE_{EVO} par rapport à PRE_{VOL}, ceci n'a pas eu d'influence sur le tlim_{30s-30s}.

Le tlim_{30s-30s} était significativement réduit à la suite des deux sessions avec pré-fatigue en comparaison de la session contrôle, montrant que l'altération des capacités musculaires nuit à la performance lors d'exercice intermittent de type 30s-30s. La $\dot{V}O_{2max}$ a été atteinte lors des exercices intermittents, que ce soit sans ou avec pré-fatigue. Il n'y avait pas non plus de différence significative entre les T90 $\dot{V}O_{2max}$, T90%tlim, T95 $\dot{V}O_{2max}$, et T95%tlim lors des trois sessions. La lactatémie n'était pas significativement différente, après les exercices intermittents, et ceci quelle que soit la session. Le niveau de sollicitation de la glycolyse était probablement comparable entre les sessions. Nous pouvons donc conclure qu'une pré-fatigue musculaire importante au niveau des muscles extenseurs du genou n'a donc pas de conséquence directe sur le niveau de sollicitation du système aérobie.

L'hypothèse selon laquelle les conditions de pré-fatigue auraient comme effets, une réduction du tlim_{30s-30s} et une réduction de l'intensité de la sollicitation aérobie, n'a donc été que partiellement vérifiée. Les deux modalités de pré-fatigue ont eu pour conséquence une

diminution significative du t_{lim} , mais elles ont permis de conserver un niveau de sollicitation aérobie relatif aussi important que lors de la modalité sans pré-fatigue.

En conclusion, une pré-fatigue musculaire des muscles extenseurs du genou, d'origine périphérique induit une diminution significative de la capacité à réaliser le plus longtemps possible un exercice intermittent de type 30s-30s à la VMA. Cependant, il ne paraît pas contradictoire d'incorporer, dans l'entraînement des coureurs, des modalités de travail musculaire spécifique avec un exercice intermittent, quand le but de celui-ci est de solliciter un fort pourcentage de la $\dot{V}O_{2max}$.

DISCUSSION GENERALE ET
PERSPECTIVES

« *We found that training intensity rather than training distance was the more important factor in improving $\dot{V}O_{2max}$* » (Fox et coll, 1975).

(Nous avons trouvé que l'intensité plutôt que le volume d'entraînement était le facteur le plus important pour améliorer la $\dot{V}O_{2max}$)

Si depuis de nombreuses années maintenant, l'introduction des exercices intermittents a permis d'augmenter l'intensité globale de l'entraînement en endurance, les recommandations sur la vitesse à laquelle ils doivent être réalisés varient beaucoup en fonction des auteurs (Fox et Mathews, 1981 ; Daniels, 1998 ; Billat, 2001a et 2001b ; Laursen et Jenkins, 2002 ; Thibault, 2009). Cependant, il y a un point sur lequel s'accordent un grand nombre d'études, c'est le fait qu'il faut adapter la vitesse de course afin d'obtenir une sollicitation maximale du système aérobie lors des exercices intermittents (Astrand et coll, 1960a ; Christensen et coll, 1960 ; Karlsson et coll, 1978 ; Billat et coll 2000b ; Laursen et Jenkins, 2002). Le critère retenu pour adapter la vitesse est très souvent le temps passé à plus de 90 % de la $\dot{V}O_{2max}$ (Robinson et coll, 1991 ; Billat et coll, 2000b ; Dupont et coll, 2003a ; Thévenet et coll, 2007a et 2007a). La VMA est depuis le début des années 80, la vitesse de référence lorsque le but est d'atteindre une sollicitation importante de la $\dot{V}O_{2max}$ (Léger et Boucher, 1980 ; Berthoin et coll, 2001). Elle est le plus souvent évaluée à l'aide de tests continus progressifs et maximaux (Léger et Boucher, 1980 ; Brue, 1985 ; Cazorla, 1990). Cependant, lorsque les exercices intermittents sont courus à cette vitesse, ils ne permettent pas d'atteindre une sollicitation importante de la $\dot{V}O_{2max}$. Il faut alors augmenter cette vitesse, ou augmenter l'intensité de la récupération pour obtenir une sollicitation aérobie maximale (Fox et coll, 1977 ; Billat et coll, 2000b ; Millet et coll, 2003 ; Dupont et coll, 2003 ; Berthoin et coll, 2006).

Dans l'étude I, nous avons montré que lors du test intermittent progressif et maximal, 45-15_{FIT}, les paramètres physiologiques, en particulier la $\dot{V}O_{2max}$, étaient identiques à ceux obtenus lors du test tapis roulant, bien que la vitesse atteinte à la fin du 45-15_{FIT} était significativement plus grande en comparaison d'un test progressif continu. La VMA estimée lors du 45-15_{FIT} permettait d'obtenir une sollicitation aérobie maximale lors d'un exercice intermittent de type 30s-30s. Pour atteindre un niveau de sollicitation aérobie équivalent lors d'un exercice intermittent de 30 s couru à la VMA déterminée par un test continu sur tapis roulant (VMA_{TR}), il fallait soit augmenter l'intensité de la récupération, soit diminuer

considérablement la durée de la récupération. La VMA_{45-15} piste était supérieure en moyenne de 2 km.h^{-1} à la VMA_{TR} . Cette différence serait expliquée par le rôle que pourrait avoir la myoglobine au cours du test 45-15_{FIT}. La réserve d'oxygène musculaire serait reconstituée pendant les 15s de récupération, permettant ainsi de retarder le moment où la glycolyse prend une part prépondérante dans la fourniture d'énergie. Comme Astrand et coll (1960c) l'avaient suggéré, lors des exercices intermittents, cette réserve d'oxygène permettrait d'augmenter le niveau de consommation d'oxygène au début de l'exercice, ce qui réduirait le déficit en oxygène.

Lorsqu'un sujet court à la VMA_{45-15} lors d'un exercice intermittent, ou lorsqu'il court à la VMA_{TR} lors d'un exercice continu, il sollicite le système aérobie au maximum. Les différences de valeurs entre VMA_{45-15} et VMA_{TR} remettent en cause le concept même de VMA. La VMA ne serait pas une vitesse, mais plutôt une zone d'intensité définie par une borne supérieure, qui serait la VMA_{45-15} , et une borne inférieure qui serait la VMA_{TR} (figure 26).

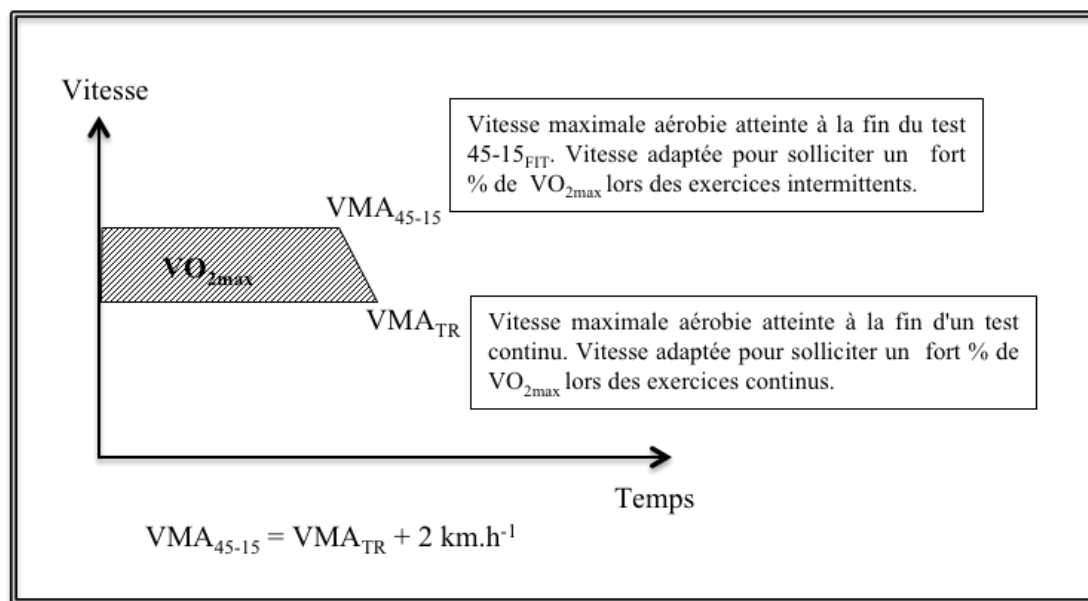


Figure 26. - Zone d'intensité correspond à une sollicitation aérobie maximale lors d'exercices intermittents courus à la VMA_{45-15} et d'exercices continus courus à la VMA_{TR} .

Les résultats de cette étude peuvent avoir des applications pratiques. Tout d'abord, le test 45-15_{FIT} pourrait être utilisé dans l'ensemble des activités utilisant les exercices intermittents comme moyen d'entraînement. Dans ce cas, le test 45-15_{FIT} permettrait d'évaluer rapidement et facilement la VMA_{45-15} , qui est une vitesse de course adaptée aux exercices intermittents.

Pour les activités utilisant uniquement des exercices continus, il serait préférable d'utiliser un test VMA en continu. Pour les activités utilisant des exercices intermittents et continus, quel que soit le test pratiqué, la relation entre VMA_{45-15} et VMA_{TR} pourrait être utilisée pour ajuster la vitesse de course ($VMA_{45-15} = VMA_{TR} + 2 \text{ km.h}^{-1}$).

A la suite de cette étude, des perspectives plus fondamentales sont aussi envisageables. Premièrement, il faudrait vérifier si la relation entre VMA_{45-15} et VMA_{TR} reste identique quel que soit le niveau des sujets, en particulier pour les sujets très entraînés en endurance comme des coureurs de demi-fond de haut niveau. Nous avons pu observer (données non publiées), lors de trois cas particuliers (coureurs de niveau international réalisant 24 km.h^{-1} au test 45-15_{FIT}), que la différence entre VMA_{45-15} et VMA_{TR} serait plus proche de 1 km.h^{-1} que de 2 km.h^{-1} . Lors de nos différentes études, les résultats ont été obtenus avec des sujets sportifs pratiquant en moyenne 5 heures d'entraînement par semaine. La VMA_{45-15} des sujets était de 18 km.h^{-1} , ce qui correspondait à la VMA_{45-15} moyenne des étudiants garçons à la Faculté des Sciences du Sport de Dijon (données personnelles obtenues sur 12 années avec un échantillon total de 1000 étudiants). Une deuxième perspective pourrait être de valider le test 45-15_{FIT} pour d'autres activités. Nous avons par exemple adapté la réalisation de ce test à des activités comme le ski de fond, le canoë-kayak et la natation. En natation, dans le cadre de l'entraînement d'un club Dijonnais, nous avons montré qu'un exercice intermittent 30s-30s en natation, réalisé à la VMA_{45-15} , permettait aux nageurs de travailler à des valeurs maximales de F_C .

D'autre part, si la VMA_{45-15} correspond à une vitesse de course adaptée à l'exercice intermittent de type 30s-30s, elle permet de définir plus globalement ce que pourrait être les limites des exercices intermittents. En effet, les exercices intermittents pourraient alors être définis comme des exercices alternant des périodes de course à la VMA_{45-15} , avec des périodes de récupération, quand la sollicitation aérobie serait maximale. Nous avons montré dans l'étude I, que l'exercice intermittent de type 30s-30s correspondait à cette définition, il reste à étudier quels autres types d'exercices intermittents pourraient correspondre à cette définition.

Le 30s-30s "prototype" ou "intermittent standard" mode scandinave

Traditionnellement, un exercice intermittent se définit par l'intensité et la durée de l'effort, l'intensité et la durée des récupérations et le nombre de répétitions réalisées (Fox et Mahtews, 1974 ; Thibault et Marion, 1999 ; Thibault, 2009). Suivant cette définition, il peut

être à priori considéré que tout ce qui n'est pas continu est intermittent. Par exemple, un exercice de type 8 min-2 min serait classé dans la même catégorie qu'un exercice de type 30s-4min. Pourtant, les réponses physiologiques au cours de ces deux modalités sont bien différentes (Seiler et coll, 2011 ; Gibala et coll, 2008). Certains auteurs ont restreint la définition des exercices intermittents, en précisant le rapport qu'il devait y avoir entre le temps d'effort et le temps de récupération. Là encore, une grande disparité subsiste entre des propositions qui vont d'un rapport effort/récupération de 2 pour 1 à des rapports de 1 pour 1, 1 pour 2 et mêmes de 5 pour 1 (Billat 2001a ; laursen et coll, 2002 ; Seiler et Sjursen, 2004). Thibault et Marion (1999), ont proposé des rapports très différents et la vitesse à laquelle sont courus ces exercices variait de 85 % à 105 % de la VMA.

Dans l'étude II, nous avons choisi de comparer la réponse physiologique au cours des exercices intermittents de type 15s-15s, 30s-30s et 60s-60s. Le fait que ces trois types d'exercices puissent être réalisés à la VMA_{45-15} , a été un critère déterminant dans notre choix. Le choix des temps d'effort et de récupération a été influencé à la fois par les pratiques d'entraînement (Gacon, 1993) et par les études scientifiques scandinaves antérieures (Astrand et coll, 1960a, 1960b, 1960c ; Christensen et coll, 1960 ; Karlson et coll, 1978). Le temps d'effort ne devait pas dépasser les limites liées aux réserves d'oxygènes musculaires locales, le temps de récupération devait permettre la reconstitution de ces réserves sans que le niveau de la consommation d'oxygène ne redescende trop. Dans l'étude II, nous avons montré que le t_{lim} était significativement plus court lors du 15s-15s et du 60s-60s comparativement au 30s-30s. La différence entre le 60s-60s et le 30s-30s pouvait être expliquée par une lactatémie plus importante au cours de l'exercice 60s-60s et une contribution accrue de la glycolyse lors de cet exercice comparativement à l'exercice 30s-30s. Au delà de 30 s de course à la VMA_{45-15} , il est probable que la réserve d'oxygène ne permettait plus de compenser la production de lactate et l'accumulation d'ion H^+ , conduisant à l'arrêt de l'exercice. Le t_{lim} plus court lors du 15s-15s par rapport au 30s-30s a été expliqué par un plus grand nombre d'accélération et de décélérations réalisées lors du 15s-15s. Celles-ci seraient la cause d'une fatigue musculaire plus importante qui limiterait le t_{lim} . Lors de ces trois types d'exercices intermittents, le niveau de sollicitation aérobie était identique et maximal. Cette étude nous permet de définir de façon relativement précise une limite aux exercices intermittents réalisés à la VMA_{45-15} . Plus le temps d'effort est grand, plus la contribution de la glycolyse, par rapport au système aérobie, est importante dans la production d'énergie. Une perspective de ce travail seraient de confirmer l'hypothèse selon laquelle les athlètes très entraînés pourraient réaliser un exercice intermittent de type 60s-60s ou 60s-30s pendant une durée comparable au 30s-30s. En effet,

une augmentation de la réserve de myoglobine, suite à une adaptation spécifique aux exercices intermittents, permettrait d'allonger le temps d'effort sans que cela n'induisse une implication plus importante de la glycolyse. C'est au cours d'études longitudinales que cette hypothèse pourrait être vérifiée.

Dans l'étude III, nous avons répondu en partie à l'hypothèse posée à la fin de l'étude II selon laquelle les accélérations et les décélérations répétées pourraient limiter le temps d'effort lors d'exercices intermittents. En comparant un exercice intermittent de type 5s-15s à un exercice intermittent de type 30s-30s, nous avons montré que la fatigue musculaire des muscles extenseurs du genou était significativement plus importante lors du 5s-15s. La fatigue musculaire serait donc en relation avec un nombre plus important d'accélérations et de décélérations réalisées mais ne limiterait pas le niveau de sollicitation aérobie. Cette étude nous permet de définir une autre limite des exercices intermittents. Au dessous de 5s d'effort, il paraît difficile de pouvoir atteindre la VMA_{45-15} au cours de l'exercice, l'accélération à réaliser étant trop importante. D'autre part, si le temps de récupération est allongé, alors il devient possible de courir à une vitesse plus grande que la VMA_{45-15} , ces exercices sont alors classés comme des exercices de sprints répétés (Glaister, 2005 ; Spencer et coll, 2005 ; Girard et coll, 2011 ; Bisho et coll, 2011). Une question se pose concernant la frontière entre SR et exercices intermittents: à partir de combien de répétitions un exercice type 5s-15s pourrait être classé comme un exercice de sprints répétés ou un exercice intermittent? En 2004, nous avons réalisée une étude (non publiée) au cours de laquelle les sujets devaient réaliser un exercice intermittent de type 5s-15s pendant 6 min, avec comme consigne de parcourir la distance la plus importante possible lors de chaque effort de 5 s. La vitesse moyenne calculée lors des 6 min était fortement corrélée ($r=0,95$; $p<0,001$) à la VMA_{45-15} des sujets, mais n'était pas corrélée à la vitesse maximale des sujets. Dans cette expérience, les sujets ne parvenaient à courir plus vite que leur VMA_{45-15} que lors des trois premières répétitions, c'est-à-dire la première minute d'effort. Reconduire cette expérience, en la complétant par des mesures de l'activité neuromusculaire et de la consommation d'oxygène, permettrait de préciser les différences entre les exercices intermittents et les SR (Buchheit, 2012a et 2012b; Bishop, 2012a et 2012b).

Les résultats de l'étude IV ont montré qu'il était possible de réaliser un exercice intermittent de type 30s-30s à la suite d'exercices induisant une pré-fatigue musculaire des extenseurs du genou (contractions musculaires évoquées ou volontaires) tout en maintenant un niveau de sollicitation du système aérobie maximal. D'autre part, nous avons confirmé ce

que nous avons observé dans l'étude III, à savoir que l'exercice intermittent 30s-30s n'induisait pas une fatigue musculaire significative (estimée 5 min après l'arrêt de l'exercice).

L'intérêt de l'exercice de type 30s-30s couru à la VMA_{45-15} serait de maintenir un niveau de sollicitation aérobie maximale tout en limitant l'accumulation de lactate et la fatigue musculaire. Il correspond pour nous, au "standard" des exercices intermittents, c'est pourquoi nous proposons de le mettre au centre d'une classification des exercices intermittents (figure 27). Sur la droite de cette figure, sont représentés des exercices intermittents, réalisés à la VMA_{45-15} , dont la durée d'effort est supérieure à 30s. L'exercice 60s-60s en est la limite, il paraît peut probable que la VMA_{45-15} puisse être maintenue au delà de 60 s sans induire un arrêt rapide de l'exercice. **Cependant pour des athlètes de haut niveau l'exercice 60s-30s aurait l'effet du 60s-60s, nous faisons l'hypothèse ici que les réserves d'oxygène fixées à la myoglobine seraient d'une part plus importantes permettant une plus grande oxydation du lactate et d'autre part seraient plus rapidement reconstituées lors de la récupération ceci étant dû à une VO_{2max} plus importante.** Sur la gauche de la figure sont représentés les exercices intermittents, réalisés à la VMA_{45-15} , dont la durée d'effort est inférieure à 30s. L'exercice 5s-15s en est la limite, en dessous de ce temps d'effort il paraît difficile d'atteindre la VMA_{45-15} car l'accélération requise devient trop importante.

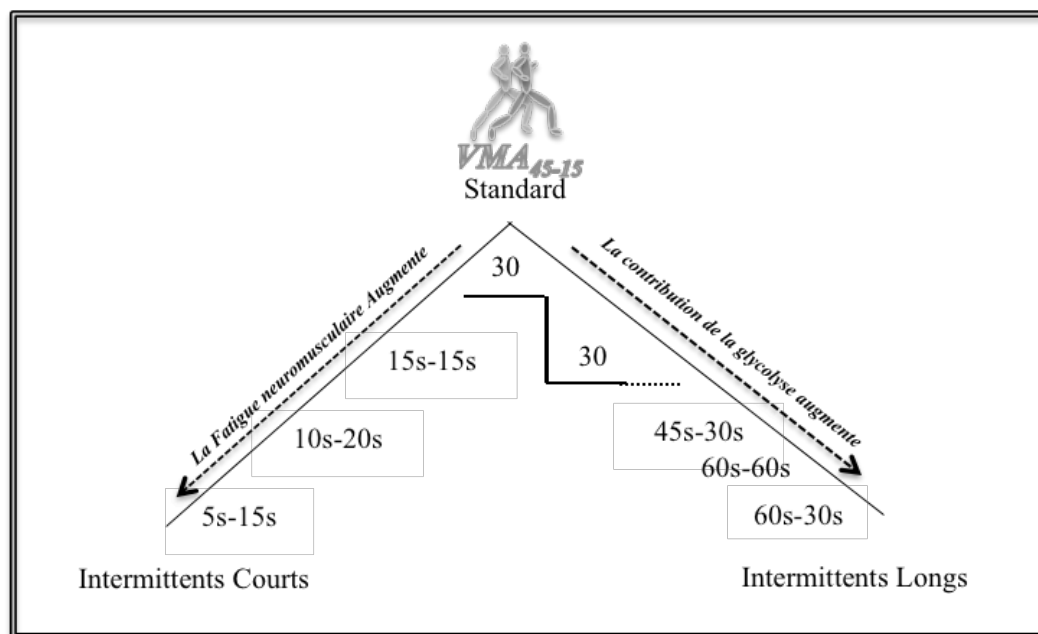


Figure 27 : Classification des différents types d'exercices intermittents courus à la VMA_{45-15} .

Dans la littérature scientifique comparant les effets des exercices intermittents et des exercices continus, il est souvent attribué beaucoup d'avantages aux premiers à tel point qu'une question peut être posée :

Faut-il remplacer les exercices continus par des exercices intermittents?

Définissant les bases d'une étude scientifique relative aux exercices intermittents, Astrand et Rodahl (1970) posaient la question au sujet de leur utilisation dans l'entraînement : Est-il préférable de réaliser 15 min de travail à 100% de $\dot{V}O_{2\max}$ ou d'accumuler 40 min de travail à 90% de $VO_{2\max}$ pour que l'entraînement produise les plus grands effets possibles?

A cette question Seiler et coll (2011) ont répondu qu'un exercice intermittent, à une intensité atteignant 90% de $\dot{V}O_{2\max}$ pour un volume total d'exercice de 30 min, serait la solution la plus adaptée pour l'entraînement. Pour Laursen (2010), il n'est pas possible de trancher. Cet auteur montre dans sa revue de questions, que les effets d'un travail intermittent à haute intensité et les effets d'un grand volume de travail continu, ne sont pas opposés mais se chevauchent la plupart du temps. Bien que les exercices intermittents intensifs soient des méthodes reconnues pour développer les capacités aérobies, anaérobies et la performance ; il ne faut pas minimiser la part que prennent les exercices de plus faible intensité. Laursen (2010) suggère qu'un entraînement, destiné à l'amélioration des performances chez des sujets entraînés, devrait être composé de ~75% de travail à de faibles intensités et de ~25% de travail à des intensités élevées. Lindsay et coll (1996) ont suggéré qu'il suffisait de remplacer environ 15% du volume de travail continu par du travail intermittent pour obtenir une amélioration significative des performances chez des cyclistes entraînés. Stepto et coll (1999) ont utilisé également une proportion de 15% d'exercices intermittents pour démontrer l'efficacité de ce type d'entraînement par rapport à des séances constituées uniquement d'exercices continus.

Une augmentation de l'intensité de l'entraînement, qui consistait à remplacer des exercices continus par des exercices intermittents, conduit momentanément à une amélioration des paramètres physiologiques et des performances (Berthoin et coll, 1995 ; Tabata et coll, 1996 ; Londeree, 1997 ; Laursen et Jenkins, 2001 ; Esfarjani et Laursen, 2006 ; Garbi et coll, 2008). Ces travaux doivent cependant être nuancés par le fait que souvent les effets physiologiques sont identiques à la suite d'un entraînement intermittent versus continu

(Poole et Gaesser, 1985 ; Franck et coll, 1998 ; Tuimil et coll, 2011). Finalement, les effets positifs de l'une ou l'autre des formes d'entraînement seraient dépendants des objectifs poursuivis en terme d'intensité ciblée. Ainsi, un travail intermittent intensif serait adapté à la recherche de la performance dans les épreuves demandant un $T95\% \dot{V}O_{2max}$ ou $T90\% \dot{V}O_{2max}$ relativement important, alors qu'un travail continu moins intensif serait pertinent pour préparer des épreuves dans lesquelles le $T85\% \dot{V}O_{2max}$ ou le $T80\% \dot{V}O_{2max}$ serait déterminant (Zafeiridis et coll 2010).

La solution qui semble la plus pertinente, serait donc de combiner le travail intermittent et le travail continu. Dans ce sens, Laursen et coll (2002a et 2002b) ont montré que l'introduction des séances d'exercices intermittents, dans un entraînement constitué de séances d'exercices continus, produit des effets considérables sur la performance et ceci pour des sujets ayant un niveau d'entraînement élevé. Hawley et coll (1997) ont même proposé une répartition entre exercices intermittents et continus en fonction des périodes du plan d'entraînement. La première période, qui pourrait durer quelques mois (en dehors des compétitions) serait essentiellement constituée d'exercices continus de faible intensité et de durée assez longue (de 60 min à plus par entraînement). Une seconde période (précompétitive), à l'intérieur de laquelle les athlètes réaliseraient deux sessions d'exercices intermittents longs (4min-1,5min par exemple) par semaine, ceci en remplacement de deux séances d'exercices continus. Une troisième période (compétitive, au moins 21 jours avant les compétitions), au cours de laquelle il faudrait introduire des exercices intermittents courts et intensifs.

Il a effectivement été rapporté qu'un entraînement intermittent trop souvent répété et sans préparation préalable entravait la récupération entre les séances (Midgley et coll, 2006 ; Lambert et coll, 2008). Il semble qu'à partir de 3 séances intensives par semaine, les sujets développent déjà des signes de surentraînement (Billat et coll, 1999b). Une à deux séances intensives, au plus, par semaine, avec au moins 48 heures de récupération entre les séances seraient recommandées pour éviter la survenue du surentraînement (Busso et coll, 2002 ; Midgley et coll, 2006).

Nous préconisons donc, dans un plan d'entraînement traditionnel en course, de réaliser une séance d'exercices intermittents par semaine. Ces exercices pourraient varier suivant les objectifs des périodes d'entraînement. Lors des périodes dont l'objectif serait d'améliorer la VMA et le pourcentage d'utilisation de la $\dot{V}O_{2max}$, l'exercice intermittent de type 30s-30s

serait adapté. Il permet de réaliser des entraînements sollicitant un fort pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$, sur des temps de travail allant de 15 min à 30 min, répartis en une, deux, ou trois séries d'exercices. Ces exercices peuvent se combiner avec des exercices dont l'objectif serait le développement de la force musculaire, mais dans ce cas les exigences, au niveau des temps d'efforts, devraient être réduites. Lors de périodes dont l'objectif serait de travailler à des vitesses supérieures à la VMA, ce qui existe dans la préparation des coureurs de ½ fond rapides comme ceux qui se préparent pour des épreuves de 800 m et 1500 m, l'exercice intermittent de type 60s-60s serait adapté. En effet, il permet de réaliser des entraînements au cours desquels il y a une interaction importante entre le processus aérobie et le processus anaérobie lactique, ce qui fait la spécificité de ces épreuves (Newshome et coll, 1994). Comparativement aux exercices intermittents 30s-30s, le temps total d'effort devrait être réduit, des durées totales de 10 à 20 min sont conseillées.

Lors des périodes dont l'objectif serait de solliciter d'une façon importante le système neuromusculaires tout en conservant un niveau élevé de sollicitation aérobie, les exercices intermittents de type 5s-15s et 15s-15s seraient adaptés. Ils permettent de réaliser de nombreuses accélérations et décélérations dont les effets sont notoires, à la fois sur le plan des altérations neuromusculaires et sur le plan énergétique; par contre, ils ne permettent pas d'envisager un travail long. Des durées totales de 6 à 8 min sont conseillées.

Si les exercices intermittents sont largement utilisés dans l'entraînement des sportifs, ils sont également adaptés à la pratique physique des personnes souffrant de pathologies particulières. En 2004, le professeur Martinant (alors Directeur du laboratoire d'endocrinologie du CHU de Dijon et Président de la section francophone du Diabetes Education Study Group) m'a demandé de préparer une intervention dans le cadre du congrès annuel de cette association (juin 2005), sur le thème de l'entraînement physique des diabétiques. A cette fin, nous avons réalisé deux études, avec deux populations différentes (un premier groupe constitué de personnes obèses et diabétiques de type II et un deuxième groupe constitué de personnes de plus de 60 ans en surcharge pondérale et diabétique de type II), qui se sont déroulées sur six mois chacune. Dans chacune des études, il a été mis en évidence que le travail intermittent de type 30s-30s en course, sur ergocycle et sur rameur, était particulièrement adapté à une amélioration significative de la condition physique des sujets, une diminution de la masse grasse et une diminution de la prise de médicaments. A noter que, les sujets du deuxième groupe ont participé à plusieurs reprises à un test 45-15_{FIT}, dont la seule adaptation nécessaire a été de commencer le test à une vitesse de 2 km.h⁻¹. Il s'est avéré

que les exercices intermittents étaient beaucoup mieux supportés que les exercices continus par les sujets de ces expériences. Les exercices intermittents permettaient de réaliser à la fois un volume d'exercice plus grand et de maintenir une intensité plus élevée que les exercices continus, ceci a probablement favorisé l'amélioration constatée de la capacité aérobie des sujets. Ce travail demande à être continué et il représente une perspective de recherche en accord avec les thématiques du laboratoire INSERM U1093.

En conclusion, nous pouvons dire que les exercices intermittents de type 30s-30s sont particulièrement adaptés à une sollicitation élevée du système aérobie, quand ils sont réalisés à la VMA_{45-15} . Ils apparaissent adaptés à cet objectif pour des publics très différents comme les enfants, les sportifs de tous niveaux, et les personnes plus âgées. L'exercice intermittent de type 30s-30s représenterait l'exercice « standard » dans notre proposition de classification des exercices intermittents. Cette classification reposerait avant tout sur la possibilité de réaliser les exercices intermittents à la VMA évaluée lors d'un test 45-15_{FIT}. Le concept de VMA_{45-15} nous amène d'ailleurs à faire le constat qu'il n'existe pas une vitesse suffisante permettant d'atteindre la consommation maximale d'oxygène, mais plutôt une zone de vitesse comprise entre la VMA_{45-15} et la VMA_{45-15} moins 2 km.h⁻¹.

ABREVIATIONS

ADP	Adénosine Diphosphate
AG	Acides Gras
ATP	Adénosine Triphosphate
CMV	Contraction maximale volontaire
CP	Phosphocréatine
Ca^{2+}	Ion calcium
CO_2	Dioxyde de carbone
EMG	(Activité) électromyographique
F_C	Fréquence cardiaque
$F_{C\max}$	Fréquence cardiaque maximale
$F_E\text{O}_2$	Fraction expiratoire en oxygène
$F_I\text{O}_2$	Fraction inspiratoire en oxygène
FMV	Force maximale volontaire
FT	Fast Twitch
H^+	ion hydrogène
HbO_2	hémoglobine
HC	Hydrates de carbone
HCO_3^-	Ion bicarbonate
km	Kilomètres
[La]	Concentration sanguine en ion lactate
m	Mètres
MbO_2	Myoglobine
min	Minutes
N	Newton
NAV	Niveau d'action volontaire maximal
O_2	Oxygène

PA	Potentiel d'action
PMA	Puissance maximale aérobie
QR	Coefficient respiratoire
QR _{max}	Coefficient respiratoire maximal
RF	Muscle rectus femoris
s	Secondes
T90%tlim	Temps passé au dessus de 90 % de la consommation maximale d'oxygène en pourcentage du temps limite.
T90% $\dot{V}O_{2max}$	Temps passé au dessus de 90 % de la consommation maximale d'oxygène en s
tlim	temps limite
UM	Unités motrices
$\dot{V}_E$	Volume ventilatoire
VL	Muscle vastus latéralis
VM	Muscle vastus Medialis
VMA	Vitesse maximale aérobie
$\dot{V}O_2$	Volume d'oxygène consommé
$\dot{V}O_{2max}$	Consommation maximale d'oxygène
$v\dot{V}O_{2max}$	Vitesse à la consommation maximale d'oxygène
VS ou vs	Versus

RESUME

Résumé

Les objectifs de ce travail étaient d'analyser les réponses physiologiques au cours d'exercices intermittents en course à pied et de déterminer i) un test d'évaluation de la vitesse maximale aérobie (VMA) adapté aux exercices intermittents ; ii) les exercices intermittents permettant une sollicitation maximale de la consommation d'oxygène (VO_{2max}) ; iii) les facteurs physiologiques et neuromusculaires limitant la durée des exercices intermittents.

La première étude a permis de montrer que la réalisation d'un exercice intermittent alternant des périodes d'effort de 30 s avec des périodes de récupération de 30 s (30s-30s), à la VMA atteinte à la fin du test intermittent incrémental 45-15_{FIT}, permettait à la fois de réaliser un grand nombre de répétitions et de solliciter un fort pourcentage de la VO_{2max} pendant la durée de l'exercice. Lors de la seconde étude nous avons montré que les exercices intermittents de type 5s-15s, 30s-30s et 60s-60s, courus à la VMA permettaient de solliciter un fort pourcentage de la VO_{2max} . L'exercice intermittent de type 30s-30s est celui qui permet néanmoins de réaliser le plus grand nombre de répétitions. Une part plus importante de la glycolyse dans la production d'énergie réduit le nombre de répétitions lors de l'exercice de type 60s-60s par rapport à l'exercice de type 30s-30s ; une fatigue musculaire causée par un plus grand nombre d'accélérations et de décélérations réduit quant à elle le nombre de répétitions lors de l'exercice de type 15s-15s, par rapport à l'exercice de type 30s-30s. Les résultats de la troisième étude ont confirmé que les exercices intermittents de type 5s-15s, courus à la VMA, induisaient une fatigue musculaire plus importante, due essentiellement aux nombreuses accélérations et décélérations. Il a également été montré qu'à la suite d'un exercice pré-fatigant des muscles extenseurs du genou (contractions musculaires évoquées par électromyostimulation vs contractions volontaires isométriques), le nombre de répétitions lors de l'exercice intermittent 30s-30s était réduit, mais que le pourcentage de temps passé à plus de 90% de la VO_{2max} n'était pas diminué par rapport à la réalisation sans pré-fatigue.

L'ensemble de nos travaux permettent de définir un ensemble d'exercices intermittents qui, lorsqu'ils sont courus à la VMA évaluée lors du test 45-15_{FIT}, permettent d'atteindre un niveau élevé de sollicitation du système aérobie, dont l'exercice de type 30s-30s pourrait constituer un exercice "standard".

Mots clé. Vitesse Maximale Aérobie, VO_{2max} , fatigue neuromusculaire, exercices intermittents, test intermittent.

Abstrat.

The aims of the present work were to analyze the physiological responses during intermittent exercise and to determine; i) an field test to assess the maximal aerobic velocity (MAV) for intermittent exercise; ii) the type of intermittent exercise could elicit maximal oxygen uptake ($\text{VO}_{2\text{max}}$); iii) the physiological and neuromuscular factors that could limit intermittent exercise duration.

The first study demonstrated that the MAV (MAV_{45-15}) reached at the end of an incremental intermittent (45s run/ 15s rest) field test ($45-15_{\text{FIT}}$) was relevant to elicit a high percentage of $\text{VO}_{2\text{max}}$ during a 30s-30s intermittent training session. The second and third studies demonstrated that intermittent exercises performed at MAV_{45-15} such as 5s-15s, 15s-15s, 30s-30s, and 60s-60s, were relevant to elicit a high percentage of $\text{VO}_{2\text{max}}$. In the 60s-60s intermittent exercise, the lowest endurance time compared to 30s-30s, was explained by the predominance of the anaerobic system in the energy supply. In the 15s-15s and 5s-15s intermittent exercises, the lowest endurance time in comparison with 30s-30s was explained by greater neuromuscular fatigue. The fourth study showed that a pre-fatigue induced by evoked contractions by electrostimulation, and isometric voluntary contraction of the knee extensor muscles reduced the time to exhaustion in a 30s-30s intermittent exercise, but was relevant to elicit a high percentage of $\text{VO}_{2\text{max}}$. These results give new insights in the field of intermittent exercise training.

Keywords: Maximal oxygen uptake, Maximal Aerobic Velocity, Intermittent Running field test, neuromuscular fatigue.

BIBLIOGRAPHIE

A

Acevedo E, Godfard AH. (1989) - Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilator threshold, and endurance. *Med Sci Sports Exerc.* 21: 563-568.

Ahmaidi S, Collomp K, Préfaut C. (1992a) - The effect of shuttle test protocol and the resulting lactacidemia on maximal velocity and maximal oxygen uptake during the shuttle exercise test. *Eur J Appl Physiol.* 65: 475-479.

Ahmaidi S, Collomp K, Caillaud C, Préfaut C. (1992b) - Maximal and functional aerobic capacity as assessed by two graduated field methods in comparison to laboratory exercise testing in moderately trained subjects. *Int J Sports Med.* 13: 243-248.

Allen GM, Gandevia SC, McKenzie DK. (1995) - Reliability of measurements of muscle strength and voluntary activation using twitch interpolation. *Muscle Nerve.* 18: 593-600.

Allen D, Lamb GD, Westerblad H. (2008) - Skeletal Muscle Fatigue: Cellular Mechanisms. *Physiol Rev.* 88: 287-332.

Allen D, Westerblad H. (2010) - What limits exercise during high-intensity aerobic exercise? *Eur J Appl Physiol.* 110: 661-662.

Andersen LB, Schnohr P, Schroll M. (2000) - All-cause mortality associated with physical activity during leisure time, work, sports, and cycling to work. *Arch intern Med.* 160 (11) : 1621-1628.

Assadi H. (1996) - Développer la VMA en milieu scolaire in *Rencontres chercheurs-praticiens. Dossier EPS n°35.*

Assadi H, Cometti G. (2007) - *L'Intermittent.* Dijon: Université de Bourgogne. Centre d'Expertise de la Performance.

Assadi H, Lepers R. (2012a) - Comparison of the 45s-15s intermittent running field test and the continuous treadmill test. *Int J Sports Physiol Perf.* Sous presse.

Assadi H, Lepers R. (2012b) - Réponse physiologique et temps d'effort maximal lors d'exercices intermittents courus à la vitesse maximale aérobie. *Science et Motricité.* DOI: 10.1051/sm/2012004.

Astrand I, Astrand PO, Christensen EH, Hedman R. (1960a) - Intermittent muscular work. *Acta physiol Scand.* 48:448-453.

Astrand I, Astrand PO, Christensen EH. (1960b) - Circulatory and respiratory adaptations to severe muscular work. *Acta Physiol Scand.* 50: 254-258.

Astrand I, Astrand PO, Christensen EH, Hedman R. (1960c) - Myohemoglobin as an oxygen-store in man. *Acta physiol Scand.* 48:454-460.

Astrand PO, Rodahl K. (1970) - *Textbook of work physiology.* New York: Mc Graw-Hill.

Aziz AR, Chia M, The KC. (2000) - the relationship between maximal oxygen uptake and repeated sprint performance indices in field hockey and soccer players. *Sports Med Phy Fitness.* 40(3): 195-200.

Aziz AR, Chuan TK. (2004) - Correlation between tests of running repeated sprint ability and anaerobic capacity by wingate cycling in multi-sprint sports athletes. *Int J Appl Sports Sci.* 16(1): 14-22.

B

Balsom D, Edge J, Davis C. (1993) - Creatine supplementation and dynamic high-intensity intermittent exercise. *Scand j Med Sci sports.* 3: 143-149.

Balsom PD, Ekblom B, Sjodin B. (1994a) - Enhanced oxygen availability during high intensity intermittent exercise decreases anaerobic metabolite concentrations in blood. *Acta Physiol Scand.* 150: 455-456.

Balsom PD, Gaitanos GC, Ekblom B, Sjodin B. (1994) - Reduced oxygen availability during high intensity intermittent exercise impairs performance. *Acta Physiol Scand.* 152:279-285.

Bangsbo J, Graham T, Johansen L, Strange S, Christensen C, Saltin B. (1992) - Elevated muscle acidity and energy production during exhaustive exercise in humans. *Am J Physiol.* 263: R891-R899.

Bangsbo J. (1994) - The physiology of Soccer: with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiol Scand.* 151 (Suppl 619): 1-155.

Bangsbo J, Graham T, Johansen L, Saltin B. (1994) - Muscle lactate metabolism in recovery from intense exhaustive exercise: Impact of light exercise. *J Appl Physiol.* 77: 1890-1895.

Bangsbo J, Laia M, Krstrup P. (2008) - The Yo-Yo intermittent recovery test a useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports Med.* 38(1): 37-51.

Barstow TJ. (1994) - Characterization of VO₂ kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 26(11): 1327-1334.

Basset DR, Howley ET. (2000) - Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Science sports exer.* 32(1): 70-84.

Bayati M, Farsad B, Gharakhanlou R, Agaha-Alinejad H. (2011) - A practical model of low-volume high-intensity interval training induces performance and metabolic adaptations that resemble “all-out” sprint interval training. *J Sports Sci Med.* 10: 571-576.

Belanger AY, McComas AJ. (1981) - Extent of motor unit activation during effort. *J Appl Physiol.* 51: 1131-1135.

Belcastro AN, Bonen A. (1975) - Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *J Appl Physiol.* 39(6): 932-936.

Berthoin S, Gerbeaux M, Guerrin F, Lensele-Corbeil G, Turpin E, Vandenhoepe F. (1992) - Estimation de la vitesse Maximale Aérobie. *Sciences et Sports.* 7: 85-91.

Berthoin S, Mantéca F, Lensele-Corbeil G, Gerbeaux M. (1995) - Effect of a 12 week training programme on Maximal Aerobic Speed (MAS) and running time to exhaustion at 100% of MAS in school students aged 14 to 17 years. *J Sports Med Physical Fitness.* 35: 251-256.

Berthoin S, Pelayo P, Lensele-Corbeil G, Robine H, Gerbeaux M. (1996) - Comparison of maximal aerobic speed as assessed with laboratory and field measurements in moderately trained subjects. *International Journal of Sports Medicine.* 17: 525-529.

Berthoin S, Blondel N, Billat V, Gerbeaux M. (2001) - La vitesse à VO_{2max} , signification et applications en course à pied. *Revue STAPS.* 54: 45-61.

Berthoin S, Baquet G, Dupont G, Van Praagh E. (2006) - Critical velocity during continuous and intermittent exercises in children. *Eur J Appl Physiol.* 98:132-138.

Berthoin P, Fellmann N, Bedu M, Beaune B, Dabonneville M, Coudert J, Chamoux A. (1997) - A 5-min running field test as a measurement of maximal aerobic velocity. *Eur J Appl Physiol.* 75: 233-238.

Biglang-Ritchie B, Jones DA, Woods JJ. (1979) -Excitation frequency and muscle fatigue: electrical responses during human voluntary and stimulated contractions. In: *Human Muscle Fatigue, Physiological Mechanisms.* Portes R, Whelan J. Pitman Medical, London. pp 130-156.

Biglang-Ritchie B, Woods JJ. (1984) - Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue. *Muscle Nerve.* 7: 691-699.

Billat VL, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. (1994a) Contribution of time limit at 90, 100, 105% of vVO_{2max} among other bioenergetic characteristics in a multifactorial analysis of performance in elite long-distance runners. *Science et motricité.* 1994;24:13-19.

Billat VL, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. (1994b) - Reproducibility of running time to exhaustion at maximal aerobic speed in sub-elite male runners. *Med Sci Sports Exerc.* 26:254-257.

Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux JC, Koralsztein JP. (1994c) - Time to exhaustion at 100% of velocity at VO_{2max} and modelling of the relation time-limit / velocity in long distance runners. *Eur J Appl Physiol.* 69: 271-273.

Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux JC, Koralsztein JP. (1996) - Calibration de la durée des répétitions d'une séance d'interval training à la vitesse associée à VO_{2max} en référence au temps limite continu: effet sur les réponses physiologiques et la distance parcourue. *Sciences et motricité.* 28: 13-20.

Billat V, Koralsztein JP. (1996) - Significance of the velocity at VO₂max and its time to exhaustion at this velocity. *Sports Med.* 22 : 90-108.

Billat V. (1998) - Physiologie et méthodologie de l'entraînement. De la théorie à la pratique. Paris : De Boeck Université.

Billat VL, blondel N, Berthoin S. (1999a) - Determination of the velocity associated with the longest time to exhaustion at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol.* 80 : 159-161.

Billat VL, Flechet B, Petit B, Muriaux G, Koralsztein JP. (1999b) - Interval training at VO₂max: effects on aerobic performance and overtraining markers. *Med Sci Sport Sci Exerc.* 31:156-163.

Billat VL, Bocquet V, Slawinski J, Lafitte L, Demarle A, Chassaing P, Koralstztein JP. (2000a) - Effect of prior intermittent run at vVO₂max on oxygen kinetics during an all-out severe run in humans. *J Sports Med Phys Fitness.* 40(3): 185-194.

Billat VL, Slawinski J, Bocquet V, Demarle A, Lafitte L, Chassaing P, Koralstztein JP. (2000b) - Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for longer time than intense but submaximal runs. *Eur J Appl Physiol.* 81:188-196.

Billat VL. Interval training for performance: a scientific and empirical practice. (2001a) - Special recommendations for middle and long distance running. Part I: Aerobic interval training. *Sports Med.* 31:13-31.

Billat VL. (2001b) - Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle and long distance running. Part II: Anaerobic interval training. *Sports Med.* 31:75-90.

Billat VL, Mille-Hamard L, Demarle A, Koralsztein JP. (2002) - Effect of training in humans on off- and on-transient oxygen uptake kinetics after severe exhausting intensity runs. *Eur J Appl Physiol.* 87: 496-505.

Bisciotti G. (2000) - Aspetti bioenergetici della corsa frazionata. *SDS,* 50: 21-27.

Bisciotti G. (2004) - L'incidenza fisiologica dei parametri di durata intensità e recupero nell'ambito dell'allenamento intermittente. *SDS,* 60-61: 90-96.

Bishop, D., Jenkins DG. (1996) - The influence of resistance training on the critical power function and time to fatigue at critical power. *Aust J Sci Md Sport.* 28(4), 101-5.

Bishop, D., Jenkins, D., Mackinnon, L., McEniery, M., Carey, M. (1999) - The effects of strength training on endurance performance and muscle characteristics. *Med Sci Sports Exerc.* 31(6): 886-891.

Bishop D, Edge J, Goodman C. (2004) - Muscle buffer capacity and aerobic fitness are associated with repeated-sprint ability in women. *Eur J Appl Physiol.* 90: 2212-2220.

Bishop D, Spencer M. (2004) - Determinants of repeated-sprint ability in well-trained team-sport athletes and endurance-trained athletes. *J Sports med Phys Fitness*. 44: 1-7.

Bishop D, Girard O, Mendez-Villanueva A. (2011) - Repeated-sprint ability, Recommendations for training. *Sports Med*. 41(9):741-756.

Bishop D, Girard O. (2012a) - Letter to the Editor : Fatigue during repeated sprints. The Authors' Response. *Sports Med*. 42(2) : 165-168.

Bishop D, Girard O. (2012b) - Letter to the Editor : Should we be recommending repeated sprints to improve repeated-sprint performance. The Authors' Response. *Sports Med*. 42(2) : 169-173.

Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK, Nevill AM. (1995) - Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man. *J Physiol*. 482(2): 467-480.

Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK. (1996a) - Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J Appl Physiol*. 80(3): 876-884.

Bogdanis GC, Nevill, M.E, Lakomy H.K, Graham C.M, Louis G. (1996b) - Effects of active recovery on power output during repeated maximal sprint cycling. *Eur J Appl Physiol*. 74:461-469.

Boileau RA, Misner JE, Dyskstra GL, Spitzer TA. (1983) - Blood lactic acid removal during treadmill and bicycle exercise at various intensities. *J Sports Med*. 23: 159-167.

Bonen A, Belcastro AN. (1976) - Comparison of self-selected recovery methods on lactic acid removal rates. *Med Sci Sports Exer*. 8: 176-178.

Borel B, Leclair E, Thevenet D, Beghin L, Berthoin S, Fabre C. (2010) - Correspondances between continuous and intermittent exercises intensities in healthy prepubescent children. *Eur J Appl Physiol*. 108: 977-985.

Borg G. (1970) - Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehab Med*. 2(2-3): 92-98.

Bouisset S, Maton B. (1995) - Muscles, posture et mouvement. Bases et application de la méthode électromyographique. Paris: Hermann eds.

Buchheit M. (2005a) - The 30-15 Intermittent Fitness test : reliability and implication for interval training of intermittent sport players. In : ECSS Proceedings. Belgrade.

Buchheit M. (2005b) - The 30-15 Intermittent Fitness test : a new intermittent running field test for intermittent sport players - part 1. *Approches handball*. 87: 27-34.

Buccheit M. (2005c) - Illustration of interval-training prescription on the basis of an appropriate intermittent maximal running speed - The 30-15 Intermittent Fitness Test - part 2. *Approches Handball*. 88: 36-46.

Buchheit M, Al Haddad H, Millet GP, Lepretre PM, Newton M, Ahmaidi S. (2007) - Cardiorespiratory and cardiac autonomic responses to 30-15 Intermittent Fitness Test in team sport players. *J Strength Cond Res.* 21(1) : 138-144.

Buchheit M. (2008a) - The 30-15 Intermittent Fitness Test : accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *J Strength Cond Research.* 22:365-374.

Buchheit M, Laursen PB, Millet GP, Ahmaidi S. (2008b) - Predicting intermittent running performance : critical velocity versus endurance index. *J Strength Cond Research.* 22 : 365-374.

Buchheit M, Millet GP, Parisy A, Pourchez S, Laursen PB, Ahmaidi S. (2008c) - The effects of high-intensity interval training and post-exercise parasympathetic reactivation in adolescents. *Med Sci Sports Exerc.* 40(2): 362-371.

Buccheit M, Abbiss CR, Peiffer JJ, Laursen PB. (2010) - Performance an physiological responses during a sprint interval training session : relationships with muscle oxygenation and pulmonary oxygen kinetics. *E J Appl Physiol.* 112 : 767-779.

Buchheit M, Ufland P. (2011) - Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated running. *Eur J Appl Physiol.* 111(2): 293-301.

Buchheit M, Abbiss CR, Peiffer JJ, Laursen PB. (2012) - Performance and physiological responses during a sprint interval training session : relationships with muscle oxygenation an pulmonary oxygen uptake kinetics. *Eur J Appl Physiol.* 112 : 767-779.

Buchheit M. (2012a) - Letter to the Editor : Fatigue during repeated sprints, precision needed. *Sports Med.* 42(2) : 165-168.

Buchheit M. (2012b) - Letter to the Editor : Should we be recommending repeated sprints to improve repeated-sprint performance. *Sports Med.* 42(2) : 169-173.

Burgomaster KA, Hughes S, Heigenhauser GJF, Bradwell SN, Gibala MJ. (2005) - Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans. *J Appl Physiol.* 98 : 1985-1990.

Busso T, Benoit H, Bonnefoy R, Feasson L, Lacour JR. (2002) - Effects of training frequency on the dynamics of performance response to a single training bout. *J Appl Physiol.* 92 : 572-580.

Brandon LJ. (1995) - Physiological factors associated with middle distance running performance. *Sports Med.* 19 : 268-277.

Brooks GA, Fahey TD, Baldwin K. (2004) - Exercise Physiology : Human bioenergetics and its applications. Boston : McGraw-Hill.

Brue F. (1985) - Une variante du test progressif et maximal de Léger et Boucher : le test vitesse maximale aérobie derrière cycliste (test VMA). *Bulletin Médical de la Fédération Française d'Athlétisme.* 7 : 1-18.

C

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

Casas A. (2008) - Physiology and methodology of intermittent resistance training for acyclic sports. *J Human Sport Exer*. 3(1): 23-52.

Castagna C, Impellizzeri FM, Chamari K, Carlomagno D, Rampinini E. (2006) - Aerobic fitness and yo-yo continuous and intermittent tests performances in soccer players: a correlation study. *J Strength Cond Res*. 20(2): 320-325.

Cazorla G. (1990) - Test de terrain pour évaluer la capacité aérobie et la vitesse maximale aérobie. In Cazorla G, Robert G. *L'évaluation en activité physique et en sport*. Cestas: AREAPS. 151-174.

Cerretelli P. (1988) - La dette d'oxygène : son rôle sa signification. pp218-231 in Rieu et coll. *Bioénergétique de l'exercice musculaire et de l'entraînement physique*. Paris: Presses Universitaires de France.

Chilibeck PD, Bell GJ, Farrar RP, Martin TP. (1998) - Higher mitochondrial fatty acid oxidation following intermittent versus continuous endurance exercise training. *Can J Physiol Pharmacol*. 76: 891-894.

Christensen EH, Hedman R, Saltin B. (1960) - Intermittent and continuous running. A further contribution to the physiology of intermittent work. *Acta Physiol Scand*. 50: 269-296.

Christmass MA, Dawson B, Passeretto P, Arthur PG. (1999a) - A comparison of skeletal muscle oxygenation and fuel use in sustained continuous and intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol*. 80: 423-435.

Christmass MA, Dawson B, Arthur PG. (1999b) - Effect of work and recovery duration on skeletal muscle oxygenation and fuel use during sustained intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol*. 80: 436-447.

Coe P. (1982) - Technique athlétique : exposé de l'entraînement de Sebastien Coe. *Revue de l'AEFA*. 78: 15-23.

Colliander EB, Dudley GA, Tesch PA. (1988) - Skeletal muscle fiber type composition and performance during repeated bouts of maximal contractions. *Eur J Appl Physiol*. 58: 81-86.

Conley DL, Krahenbuhl GS. (1980) - Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 12: 357-360.

Corbi A. (1994) - Aide à la mise en oeuvre d'une séance de développement de la vitesse maximale aérobie. *Revue de l'AEFA*. 135: 37-42.

D

Daniels JT, Yarbough RA, Foster C. (1978) - Changes in VO_{2max} and running performance with training. *Eur J Appl Physiol*. 39 : 249-254.

Daniels JT, Scardina N, Hayes J. (1986) - Elite and subelite female middle and long distance runners. In: Landers DM. *Sport and elite performers*. Champaign (IL): Human Kinetics Publishers. 57-72.

Daniels J. (1998) - Daniels's Running Formula. Human Kinetics, Champaign (IL).

Daussin FN, Ponsot E, Dufour SP, Lonsdorfer-Wolf E, Doutreleau S, Geny B, Piquard F, Richard R. (2007) - Improvement of VO_{2max} , by cardiac output and oxygen extraction adaptation during intermittent versus continuous endurance training. *Eur J Appl Physiol*. 101: 377-383.

Davies CTM. (1980) - Effects of wind assistance and resistance on the forward motion of a runner. *J Appl Physiol*. 48: 702-709.

Dellal A. (2010) - Impact physiologique des changements de directions au cours d'exercices intermittents spécifique au football. *ACFF*. 4: 8-19.

Demarie S, Koralsztein JP, Billat V. (2000) - Time limit and time at VO_{2max} during a continuous and an intermittent run. *J Sports med Phys Fitness*. 40: 96-102.

Demarle AP, Slawinski JJ, Laffite LP, Bocquet VG, Koralsztein JP, Billat VL. (2001) - Decrease of O_2 deficit is a potential factor in increased time to exhaustion after specific endurance training. *J Appl Physiol*. 90: 947-953.

De Pattengale PK, Holloszy JO. (1967) - Augmentation of skeletal muscle myoglobin by a program of treadmill running. *Am J Physiol*. 213: 783-791.

Desmedt JE. (1985) - Methods of studying neuromuscular function in humans: isometric myogram, excitation electromyogram, and topography of terminal innervation. *Acta Neurol Psychiatr Belg*. 58: 977-1017.

Di Prampero PE, Davies CTM, Cerretelli P, Margaria R. (1970) - An analysis of O_2 debt contracted in submaximal exercise. *J Appl Physiol*. 29: 547-551.

Di Prampero PE. (1986) - The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med*. 7: 55-72.

Di Prampero PE, Atchou G, Brückner JC, Moia C. (1986) - The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol*. 55: 259-266.

Dipla K, Tsirini T, Zafeiridis A, Manou V, Dalamitros A, Kellis E, Kellis S. (2009) - Fatigue resistance during high-intensity intermittent exercise from childhood to adulthood in males and females. *Eur J Appl Physiol.* 106(5): 645-653.

Dobson GP, Yamamoto E, Hochachka PW. (1986) - Phosphofructokinase control in muscle : nature and reversal of pH-dependent ATP inhibition. *Am J Physiol.* 250 (regulatory Integrative Comp Physiol 19) : R71-R76.

Dorado C, Sanchis-Moysi J, Calbet J.A. (2004) - Effects of recovery mode on performance, O₂ uptake and O₂ deficit during high-intensity intermittent exercise. *Canadian Journal Of Applied Physiology.* 29(3): 227-244.

Duffield R, Dawson B, Pinnington HC, Wong P. (2004) - Accuracy and reliability of Cosmed K4b2 portable gas analysis system. *J Sci Med Sport.* 7(1): 150-155.

Dupont G, Blondel N, Lensel G, Berthoin S. (2002) - Critical velocity and time spent at a high level of VO₂ for short intermittent runs at supramaximal velocities. *Can J Appl Physiol.* 27(2): 103-115.

Dupont G, Blondel N, Berthoin S. (2003a) - Performance for short intermittent runs: active recovery vs. passive recovery. *Eur J Appl Physiol.* 89: 548-554.

Dupont G, Blondel N, Berthoin S. (2003b) - Time spent at VO₂max : Methodological issue. *Int J Sports Med.* 24:291-297.

Dupond G, Berthoin S. (2004) - Time spent at a high percentage of VO₂max for short intermittent runs: Active versus passive recovery. *Can J Appl Physiol.* 29: 3-16.

Dupont G, Moalla C, Guinhouya C, Ahmaidi S, Berthoin S. (2004) - Passive versus active recovery during high-Intensity intermittent exercises. *Med Scien Sports Exer.* 36(2) : 302-308.

Dupont G, Millet GP, Guinhouya C, Berthoin S. (2005) - Relationship between oxygen uptake kinetics and performance in repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol.* 95: 27-34.

Dupont G, Bosquet L. (2007) - Méthodologie de l'entraînement. Paris : Ellipse Edition Marqueting.

E

Edwards RH, Ekelund LG, Harris RC, Hesser CM, Hultman E, Melcher A, Wigertz O. (1973) - Cardiorespiratory and metabolic costs of continuous and intermittent exercise in man. *J Physiol (Lond).* 234: 481-97.

Edward RH. (1983) - Biochemical bases of fatigue in exercise performance : catastrophe theory of muscular fatigue. In : *Biochemistry of exercise V* (Eds) Knuttgen HG, Vogel JA, Poortmans JR. Human Kinetics Publisher : Champaign, pp 3-28.

Edgerton VR, Essén B, Saltin S, Simpson DR. (1975) - Glycogen depletion in specific types of human skeletal muscle fibers in intermittent and continuous exercise. In: Howald H,

Poortamans JR (eds). Metabolic Adaptation to Prolonged Physical Exercise. Birkhauser Verlag, Basel. 402-415.

Enoka RM, Stuart DG. (1992) - Neurobiology of muscle fatigue. J Appl Physiol. 72: 1631-1648.

Esfarjani F, Laursen PB. (2007) - **Manipulating high-intensity interval training: effect on $\text{VO}_{2\text{max}}$, the lactate threshold and 3000 m running performance in moderately trained males.** J Sci Med Sport. 10: 27-35.

Essén B, Hagenfeldt L, Kaijser L. (1977) - Utilization of blood-borne and intramuscular substrates during continuous and intermittent exercise in man. J Physiol. 265:489-506.

Essén B. (1978a) - Studies on the regulation of metabolism in human skeletal muscle using intermittent exercise as an experimental model. Acta Physiol Scand. Suppl 454: 1-32.

Essén B. (1978b) - Glucogen depletion of different fibre types in human skeletal muscle during intermittent and continuous exercise. Acta Physiol Scand. 103: 446-455.

Ettama JH. (1962) - Limits of human performance and energy production. Int Z Angew Physiol. 22: 45-54.

F

Faria I.E. (1984) - Applied physiology of cycling. Sports Med. 1: 187-204.

Fuglevand A, Zackowski KM, Huey KA, Enoka RM. (1993) - Impairment of neuromuscular propagation during human fatiguing contractions at submaximal forces. J Physiol. 460: 549-572.

Foskett A, Williams C, Boobis L, Tsintzas K. (2008) - Carbohydrate availability and muscle energy metabolism during intermittent running. Med Science Sports Exerc. 40(1): 96-103.

Foster C. $\text{VO}_{2\text{max}}$ and training indices as determinant analysis of competitive running performance. J Sports Sci. 1: 13-22.

Foster C, Kuffel E, Bradley N, Battista RA, Wright G, Porcari JP, Lucia A, deKoning JJ. (2007) - VO_2 max during successive maximal efforts. Eur J Appl Physiol. 102: 67-72.

Fox EL, Bartels RL, Billings CE, Mathews DK, Lakomy HK, Nevill AM. (1973) - Intensity and distance of interval training programs and changes in aerobic power. Med Sci Sports. 5: 18-22.

Fox EL, Mathews DK. (1974) - Interval Training. Philadelphia: W.B. Saunders Company.

Fox EL, Bartels RL, Billings CE, O'Brien R, Bason R, Mathews DK. (1975) - Frequency and duration of interval training programs and changes in aerobic power. J Appl Physiol. 38(3): 481-484.

Fox EL, Bartels RL, Klinzing J. (1977) - Metabolic responses to interval training programs of high and low power output. *Med Sci Sports Exerc.* 9: 191-6.

Fox EL, Mathews DK. (1981) - *Physiological Basis of Physical Education and Athletics.* Philadelphia: W.B. Saunders Company.

Franch J, Madsen K, Djurhuus MS, Pedersen PK. (1998) - Improved running economy following intensified training correlates with reduced ventilatory demands. *Med Sci Sports Exerc.* 30: 1250-1256.

G

Gacon G. (1983) - *La course d'endurance.* Dijon: CRDP Université Dijon.

Gacon G, Assadi H. (1990) - Evaluation et développement de la vitesse maximale aérobie. *Revue EPS.* 222.

Gacon G. (1990) - Vers une nouvelle définition du travail maximal aérobie chez le coureur de demi-fond. Un nouveau concept d'entraînement : la pondération. *Revue de l'AEFA.* 115-116: 55-69.

Gacon G. (1993) - le 30/30 prototype de l'entraînement intermittent en demi-fond. *Revue de l'AEFA.* 130: 19-23.

Gacon G. (1995) - L'endurance et ses faux synonymes, Capacités Aérobie, VO₂max, Puissance Maximale Aérobie, Vitesse Maximale Aérobie. *Revue de l'AEFA.* 137: 30-38.

Gaesser GA, Brooks GA. (1984) - Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Med Scien Sports Exer.* 16: 29-34.

Gaitanos GC, Williams C, Boobis LH, Brooks S. (1993) - Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol.* 75(2): 712-719.

Gandevia SC. (2001) - Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.* 81(4): 1725-1789.

Gerbeaux M, Lensele-Corbeil G, Branly G, Dierkens JM, Jacquet A, Lefranc JF, Savin A, Savin N. (1991) - Estimation de la vitesse maximale aérobie chez les élèves des collèges et lycées. *Science et Motricité.* 13: 19-26.

Gerbino A, Ward SA, Whipp BJ. (1996) - Effects of prior exercise on pulmonary gas-exchange kinetics during high-intensity exercise in humans. *J Appl Physiol.* 80: 99-107.

Gharbi A, Chamari K, Khallel A, Ahmaidi S, Talka Z, Abdelkarim Z. (2008) - Lactate kinetics after intermittent and continuous exercise training. *J Sports Science Med.* 7: 279-285.

Gibala MJ, McGee SL, Garnham AP, Howlett KF, Snow RJ, Hargreaves M. (2009) - Brief intense interval exercise activates AMPK and p38 MAPK signaling and increases the expression of PGC-1α in human skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 106(3): 929-934.

Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D. (2011) - Repeated-sprint ability, factors contributing to fatigue. *Sports Med.* 41(8): 673-694.

Gisolfi C, Robinson S, Turell ES. (1966) - Effects of aerobic work performed during recovery from exhausting work. *J Appl Physiol.* 21: 1767-1772.

Gjovaag T, Dahl HA. (2008) - Effect of training with different intensities and volumes on muscle fibre enzyme activity and cross sectional area in the m. triceps brachii. *Eur J Appl Physiol.* 103: 399-409.

Glaister M. (2005) - Multiple Sprint Work : Physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med.* 35(9): 757-777.

Gondin J, Guette M, Jubeau M, Ballay Y, Martin A. (2006) - Central and peripheral contributions to fatigue after electrostimulation training. *Med Sci Sports Exerc.* 38: 1147-1156.

Goodman C, Henry G, Dawson B, Gillam I, Beilby J, Ching S, Fabian V, Dasig D, Kakulas B, Morling P. Biochemical and ultrastructural indices of muscle damage after a twenty-one kilometre run. *Aust J Sci Med Sport.* 29: 95-98.

Gorostiaga EM, Walter CB, Foster C. (1991) - Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. *Eur J Appl Physiol.* 63: 101-107.

Guiraud T, Nigam A, Gremeaux V, Meyer P, Juneau M, Bosquet L. (2012) - High-intensity interval training in cardiac rehabilitation. *Sports Med.* 42 (7) : 1-19.

Grant S, Craig I, Wilson J. the relationship between 3 km running performance and selected physiological variables. *J Sports Sci.* 15: 403-410.

Greally, F. (2004) - Strength, Science, Support, & Sleep: Paula Radcliffe's journey from disappointing fourth to dominant first. June, 28-31. *Running Times.*

Green HJ. Altitude acclimatization, training and performance. *J Sci Med Sport.* 3: 299-312.

Guezennec CY. (2000) - La fatigue centrale: électrophysiologique ou neurochimique. *Sci Sports.* 15: 228-233.

H

Häkkinen K, Komi PV. (1983) - Changes in neuromuscular performance in voluntary and reflex contraction during strength training in man. *Int J Sports Med.* 4:282-288.

Häkkinen K, Komi PV. (1986) - Effects of fatigue and recovery on electromyographic and isometric force and relaxation time characteristics of human skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol.* 55:588-596.

Häkkinen K, Alen M, Kraemer WJ, Gorostiaga E, Izquierdo M, Rusko H. (2003) - Neuromuscular adaptations during concurrent strength and endurance training versus strength training. *Eur J Appl Physiol.* 89: 42-52.

Hamilton AL, Nevill ME, Brooks S, Williams C. (1991) - Physiological responses to maximal intermittent exercise: differences between endurance-trained runners and games players. *J Sports Sci.* 9: 371-382.

Hargreaves L, McKenna MJ, Jenkins DG, Warmington SA, Li JL, Snow RJ, Febbraio MA. (1998) - Muscle metabolites and performance during high-intensity, intermittent exercise. *J Appl Physiol.* 84: 1687-1691.

Harris RC, Hultman E, Kaijser L, Nordejö LO. (1975) - The effect of circulatory occlusion on isometric exercise capacity and energy metabolism of the quadriceps muscle in man. *Scand J Lab Invest.* 35: 87-95.

Harris RC, Edwards RH, Hultman E, Nordejö LO, Nylin B, Sahlin K. (1976) - The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflugers Arch.* 367(2): 137-142.

Hautier CA, Belli A, Lacour JR. (1998) - A method for assessing muscle fatigue during sprint exercise in humans using a frictionloaded cycle ergometer. *Eur J Appl physiol.* 12: 231-235.

Hawley JA, Myburgh KH, Noakes TD, Dennis SC. (1997) - Training techniques to improve fatigue resistance and enhance endurance performance. *J Sports Sci.* 15: 325-333.

Hawley JA. (2002) - Adaptation of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training. *Clini Expe Pharma Physiol.* 29: 218-222.

Hermansen L, Stensvold I. (1972) - Production and removal of lactate during exercise in man. *Pflügers Arch.* 367: 137-142.

Heugas AM, Brisswalter J, Vallier JM. (1997) - Effet d'une période d'entraînement de trois mois sur le déficit maximal en oxygène chez des sprinters de haut niveau de performance. *Can J Appl Physiol.* 22: 171-181.

Hill DW, Rowell AL. (1997) - Responses to exercise at velocity associated with VO_{2max} . *Med Sci Sports Exerc.* 29: 113-116.

Howley ET, Bassett DR, Welch HG. (1995) - Criteria for maximal oxygen uptake : review and commentary. *Med Sci Sports Exerc.* 27: 1292-1301.

Hugon M. (1973) - Methodology of the Hoffmann reflex in man. In: *New Developments in Electromyography and Clinical Neurophysiology*, edited by Desmedt JE. Basel: Karger, vol 3, pp 277-293.

Hultman, E., Sahlin, K. (1980) - Acid-base balance during exercise. *Exerc Sport Sci Rev* 8, 41-128.

Humphreys J. (1980) - Interval and continuous running. 62-63. In Long Distances : contemporary theory, technique and training. Los Altos, California : Tafnews Press.

I

Iaiche R, Toraa M, Friemel F. (1996) - Evaluation de VO_{2max} et de VMA en laboratoire et sur le terrain. Science et Sports. 11 : 91-95.

J

Jones AM, Doubst JH. (1996) - A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. J Sports Sci. 14: 321-327.

Jones AM, Wilkerson DP, Berger NJ, Fulford J. (2007) - Influence of endurance training on muscle (PCr) kinetics during high-intensity exercise. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 293: R392-R401.

K

Karlsson J, Astrand PO, Ekblom B. (1967) - Training of the oxygen transport system in man. J Appl Physiol. 22: 1061-1068.

Karlsson J, Saltin B. (1971) - Oxygen deficit and muscle metabolites in intermittent exercise. Acta Physiol Scand. 82: 115-122.

Kavanaugh T, Shepherd RJ. (1973) - Interval versus continuous training of post-coronary patients. Med Sci Sports. 5 :67-71.

Kentish JC. (1986) - The effects of inorganic phosphate and creatine phosphate on force production in skinned muscles from rat ventricles. J Physiol. 370 : 585 -604.

Kubukeli ZN, Noakes TD, Dennis SC. (2002) - Training techniques to improve endurance exercise performances. Sports Med. 32: 489-509.

Krustrup P, Söderlund K, Mohr M, Gonzalez-Alonso J, Bangsbo J. (2004) - Recruitment of fibre types and quadriceps muscle protons during repeated, intense knee-extensor exercise in humans. Eur J Physiol. 449 : 56-65.

L

Lacour JR, Montmayer A, Dormois D, Gacon G, Padilla S, Vial C. (1989) - Validation de l'épreuve de mesure de la vitesse maximale aérobie (VMA) dans un groupe de coureurs de haut niveau. Sciences et Motricité. 7: 3-8.

Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Barthélémy JC, Dormois D. (1990) - The energetics of middle distance running. Eur J Appl Physiol. 60:38-43.

Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Chatard JC, Arsac L, Barthélémy JC. (1991) - Assessment of running velocity at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol.* 62: from a head 77-82.

Laffite LP, Mille-Hamard L, Koralsztejn JP, Billat V. (2003) - The effects of interval training on oxygen pulse and performance in supra-threshold runs. *Arch Physiol Biochem.* 111(3): 202-210.

Lambert MI, Viljoen W, Bosch A, Pearce AJ, Sayers M. (2008) - General Principles of Training. pp1-48 in *The Olympic Textbook of Medicine in Sport*. Oxford: Blackwell Publishing.

Lattier G, Millet GY, Martin A, Martin V. (2004) - Fatigue and recovery after high-intensity exercise part I: Neuromuscular Fatigue. *Int J Sports Med.* 25:450-456.

Laursen PB. (2010) - Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? *Scand J Med Sci Sports.* 20: 1-10.

Laursen PB, Jenkins DG. (2002) - The scientific basis for high-intensity interval training: optimizing training programs and maximizing performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med.* 32: 53-73.

Laursen PB, Shing CM, Peake JM, Coombes JS, Jenkins DG. (2002a) - Interval training program optimization in highly trained endurance cyclists. *Med Sci Sports Exerc.* 34: 1801-7.

Laursen PB, Balchard MA, Jenkins DG. (2002b) - Acute high-intensity interval training improves Tvent and peak Power output in highly trained males. *Can J Appl Physiol.* 27(4): 336-348.

Lee IM, Sesso HD, Oguma Y. (2003) - Relative intensity of physical activity and risk of coronary heart disease. *Circulation.* 107 (8) : 1110-1116.

Léger L, Boucher R. (1980) - An indirect continuous running multistage field test: the Université de Montréal track Test. *Can J Appl Sports Sci.* 5: 77-84.

Lepers R, Hausswirth C, Maffiuletti NA, Brisswalter J, Van Hoecke J. (2000a) - Evidence of neuromuscular fatigue after prolonged cycling exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 32: 1880-1886.

Lepers R, Pousson ML, Maffiuletti NA, Martin A, Van Hoecke J. (2000b) - The effects of a prolonged running exercise on strength characteristics. *Int J Sports Med.* 21: 275-280.

Lepers R. (2009) - Muscle fatigue following prolonged dynamic exercise. In *Advances in Neuromuscular Physiology of Motor Skills Muscle Fatigue*. Shinohara M. Kerala, India: Research Signpost. pp369-390.

Lepers R. (2010) - Intérêts et limites de la neurostimulation percutanée dans l'évaluation de la fatigue musculaire. *Science et Motricité.* 70: 31-37.

Lindsay FH, Hawley JA, Myburgh KH. (1996) -Improved athletic performance in highly trained cyclist after interval training. *Med Sci Sports Exer.* 28: 1427-1434.

Lindsay FH, Hawley JA, Noakes TD, Dennis SC. (1997) - Training techniques to improve fatigue resistance and enhance endurance performance. *J Sports Sci.* 15: 325-333.

Londeree BR. (1997) - Effect of training on lactate/ventilator thresholds: a meta-analysis. *Med scin Sports Exerc.* 29: 837-843.

M

Maffiuletti NA, Martin A, Babault N, Pensini M, Lucas B, Schieppati M. (2001) - Electrical and mechanical H(max)-to-M(max) ratio in power and endurance trained athletes. *J Appl Physiol.* 90: 3-9.

Marcinik, E., Potts, J., Schlaback, G., Will, S., Dawson, P., Hurley, B. (1991) - Effects of strength training on lactate threshold and endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* 23(6): 739-743.

Margaria R, Oliva R, Di Prampero PE, Ceretelli P. (1969) - Energy utilization in intermittent exercise of supramaximal intensity. *J Appl Physiol.* 26: 752-756.

Margaria R, Cerretelli P, Di Prampero PE, Massari C, Torelli G. (1980) - Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man. *J Appl Physiol.* 18:371-377.

McArdle WD, Katch FI, Katch VL. (1987) - *Physiologie de l'activité physique.* Paris: Vigot.

McCartney N, Spriet LL, Heigenhauser G, Kowalchuk JM, Sutton JR, Jones N. (1986) - Muscle power and metabolism in maximal intermittent exercise. *J Appl Physiol.* 60(4): 1164-1169.

McCully, KK, Lotti, S, Kendrick, K, Wang, Z, Posner, JD, Leiggh, J, Jr, Chance, B. (1994) - Simultaneous in vivo measurements of HbO₂ saturation and PCr kinetics after exercise in normal humans. *J Appl Physiol.* 77: 5-10.

McDougall JD, Hicks AL, MacDonald JR, McKelvie R, Green HJ, Smith KM. (1998) - Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training. *J Appl Physiol.* 84(6): 2138-2142.

McKay BR, Paterson DH, Konalchuk JM. (2009) - Effect of short-term high-intensity interval training vs continuous training on O₂ uptake kinetics, muscle deoxygenation and exercise performance. *J Appl Physiol.*

McLaren DPM, Gibson H, Parry-Billings M, Edwards RT. (1989) - A review of metabolic and physiological factors in fatigue. *Ex Sport Rev.* 17: 29-66.

McLaughlin JE, King GA, Howley ET, Basset DR, Ainsworth BE. (2001) - Validation of the COSMED K4b2 Portable Metabolic System. *Int J Sports Med.* 22: 280-284.

Medbo JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. (1988) - Anaerobic capacity determined by accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol.* 64: 50-60.

Medbo JI, Tabata I. (1990) - Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J Appl Physiol.* 67: 1881-1886.

Medbo JI, Tabata I. (1993) - Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *J Appl Physiol.* 75: 1654-1660.

Merce TH, Gleeson NP, Claridge S, Clement S. (1998) - Prolonged intermittent high intensity exercise impairs neuromuscular performance of the knee flexors. *Eur J Appl Physiol.* 77: 560-562.

Merton PA. (1954) - Voluntary strength and fatigue. *J Physiol.* 123: 553-564.

Metzger JM, Ross RL. (1990) - Effects on tension and stiffness due to reduced pH in mammalian fast-and slow-twitch skinned skeletal muscle fibers. *J Physiol.* 428: 737-750.

Midgley AW, Mc Naughton LR, Wilkinson M. (2006a) - Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners? Empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations. *Sports Med.* 36(2): 117-132.

Midgley AW, Mc Naughton LR. (2006b) - Time at or near VO₂max during continuous and intermittent running. A review with special reference to considerations for the optimization of training protocols to elicit the longest time at or near VO₂max. *J Sports Med Phys Fitness.* 46: 1-14.

Midgley AW, Mc Naughton LR, Poman R, Marchant D. (2007) - Criteria for determination of maximal oxygen uptake: A brief critique and recommendations for future research. *Sports Med.* 37(12): 1019-1028.

Millet GP, Candau R, Fattori P, Fattori, Bignet F, Varray A. (2003a) - VO₂ responses to different intermittent runs at velocity associated with VO₂max. *Can J Appl Physiol.* 28(3): 410-423.

Millet GP, Libicz S, Borrani F, Fattori, Bignet F, Candau R. (2003b) - Effects of increased intensity of intermittent training in runners with differing VO₂ kinetics. *Eur J Appl Physiol.* 90: 50-57.

Millet GY, Lepers R, Maffiuletti NA, Babault N, Martin V, Lattier G. (2002) - Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. *J Appl Physiol.* 94: 193-198.

Millet GY, Lepers R. (2004) - Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports med.* 34: 105-116.

Morgan RE, Adamson GT. (1961) - Circuit training, 2^e éd. London: Bell and sons LTD.

Moritani T, Muro M, Kijima A, Gaffey FA, Parsons D. (1985) - Electromechanical changes during electrically induced and maximal voluntary contractions: surface and intramuscular EMG responses during sustained maximal voluntary contraction. *Exp Neurol.* 88: 484-499.

Murias JM, Spencer MD, Kowalchuk JM, Paterson DH. (2011) - Muscle deoxygenation to VO₂ relationship differs in young subjects with varying tVO₂. 111: 3107-3118.

N

Newham DJ, Mills KR, Quigley BM, Edwards RH. (1983) - Muscle pain and fatigue after concentric and eccentric muscle contractions. *Clin Sci.* 64: 55-62.

Newsholme E. (1986) - Application of principles of metabolic control to the problem of metabolic limitations in sprinting, middle distance, and marathon running. *Int J Sports Med.* 7: 66-70.

Newsholme E, Leech T, Duester G. (1994) - Keep on running. The science of training and performance. John Wiley and Sons, Ltd., Chichester, England.

Niklas P, Li W, Jens W, Michail T, Kent S. (2010) - Mitochondrial gene expression in elite cyclists: effects of high-intensity interval exercise. *Eur J Appl Physiol.* 110: 597-606.

Noakes T. (2001) - Lore of running. Oxford: Oxford University Press.

Noakes T, StClair Gibson A. (2004) - Logical limitation in the "catastrophe" models of fatigue during exercise in humans. *Br J Sports Med.* 38: 648-649.

Nosaka K, Aldayel A, Jubeau M, Chen TC. (2011) - Muscle damage induced by electrical stimulation. *Eur J Appl Physiol.* 111: 2427-2437.

Nourry C, Deruelle F, Guinhouya C, Baquet G, Fabre C, Bart F, Berthoin S, Mucci P. (2005) - High-intensity intermittent running training improves pulmonary function and alters exercise breathing pattern children. *Eur J Appl Physiol.* 94: 415-423.

Nummela AT, Paavolainen LM, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD, Rusko HK. (2006) - Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol.* 97: 1-8.

O

Ostojic SM, Markovic G, Calleja-Gonzalez J, Jakovoljevic DG, Vucetic V, Stojanovic MD. (2010) - Ultra short-term heart rate recovery after maximal exercise in continuous versus intermittent endurance athletes. *Eur J Appl Physiol.* 108: 1055-1059.

Overend TJ, Paterson DH, Cunningham DA. (1992) - The effect of interval and continuous training on the aerobic parameters. *Can J Sport Sci.* 17: 129-134.

P

Paavolainen LM, Nummela AT, Rusko HK. (1999a) - Neuromuscular characteristics and muscle power as determinant of 5-km running performance. *Med Sci Sports Exerc.* 80: 159-161.

Paavolainen LM, Hakkinen K, Hamalainen I, Nummela, A., Rusko, H. (1999b) - Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol.* 86: 1527-1533.

Padilla S, Bourdin M, Barthélémy JC, Lacour JR. (1992) - Physiological correlates of middle-distance running performance. *Eur J Appl Physiol.* 62: 561-566.

Parra J, Cadefau JA, Rodas G. (2000) - The distribution of rest periods affects performance and adaptations to sprint interval training. *J Appl Physiol.* 169: 157-165.

Pavia L, Myers J, Cesare R. (1999) - Recovery kinetics of oxygen uptake and heart rate in patients with coronary artery disease and heart failure. *Chest.* 116: 808-813.

Péronnet F, Thibault G. (1987) - Analyse physiologique de la performance en course à pied, revision du modèle hyperbolique. *J Physiol (Paris).* 82: 52-60.

Perrey S, Racinais S, Saimouaa K, Girard O. (2010) - Neural and muscular adjustments following repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol.* 109: 1027-1036.

Piron A. (2008) - Apprentissage moteur et intelligence motrice. *Revue EPS (Paris).* 329: .
Poole DC, Gaesser GA. (1985) - Response of ventilatory and lactate thresholds to continuous and interval training. *J Appl Physiol.* 58(4): 1115-1121.

Place N, Maffiuletti NA, Ballay Y, Lepers R. (2005) - Twitch potentiation is greater after a fatiguing submaximal isometric contraction performed at short vs long quadriceps muscle length. *J Appl Physiol.* 98: 429-436.

Place N, Maffiuletti NA, Martin A, Lepers R. (2007) - Assessment of the reliability of central and peripheral fatigue after sustained maximal voluntary contraction of the quadriceps muscle. *Muscle Nerve.* 35: 486-495.

Platonov VN. (1987) - Adaptation des sportifs aux charges d'entraînement. Traduction INSEP. Paris, Editions EPS.

Pollock ML, Jackson AS, Pate RR. (1980) - Discriminants analysis of physiological differences between good and elite distance runners. *Res Q Exerc Sport.* 51: 521-532.

Poole DC, Shaffartzik W, Knight DR, Derion T, Kennedy B, Guy HJ, Prediletto R, Wagner PD. (1991) - Contribution of exercising legs to the slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *J Appl Physiol.* 71: 1245-1253.

Poortmans JR. (2009) - Biochimie des activités physiques et sportives. Paris, De boeck.

Poumarat G, Dabonneville M. (1989) - Les circuits de musculation. Répercussions sur la force musculaire et la consommation maximale d'oxygène. Science et Motricité. 9: 32-45.

Pugh LG. (1971) - The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. J Physiol. 213: 255-276.

R

Rampini E, Sassi A, Azzalin A, Castagna C, Menaspa P, Carlomagno D, Impellizzeri F. (2010) - Physiological determinants of Yo-Yo intermittent recovery tests in male soccer players. Eur J Appl Physiol. 108: 401-409.

Ratel S, Lazaar N, Dore E, Baquet G, Williams CA, Berthoin S, Van Praagh E, Bedu M, Duché P. (2004) - High-intensity intermittent activities at school: controversies and facts. J Sports Med Phys Fitness. 44: 272-280.

Ratel S, Duché P, Williams CA. (2006) - Muscle fatigue during high-intensity exercise in children. Sports Med. 36(12): 1031-1065.

Ratel S, Lazaar N, Williams CA, Bedu M, Duché P. (2008) - Age differences in human skeletal muscle fatigue during high-intensity intermittent exercise. Acta Paediatr. 92: 1-7.

Ratamess NA, Izquierdo M. (2008) - Neuromuscular adaptations to training. pp 67-87 in The Olympic Textbook of Medicine in Sport. Oxford: Blackwell Publishing.

Reindell H, Roskamm H. (1959) - Ein Beitrag zu den physiologischen Grundlagen des interval training unter besonderer Berücksichtigung des Kreislaufes. Schweiz Z Sportmed. 7: 1-8.

Richardson RS, Noyszewski EA, Kendrick KF. (1995) - Myoglobin O₂ desaturation during exercise. J Clin Invest. 96(4): 1916-1926.

Robinson DM, Robinson S, Hume PA, Hopkins WG. (1991) - Training intensity of elite male distance runners. Med Sci Sports Exerc. 23: 1078-1082.

Rodas G, Ventura JL, Cadefau JA, Cusso R, Parra J. (2000) - A short training programme for the rapid improvement of both aerobic and anaerobic metabolism. Eur J Appl Physiol. 82:480-486.

Rossiter HB, Ward SA, Kowalchuk JM, Howe FA, Griffiths JR, Whipp BJ. (2001) - Effects of prior exercise on oxygen uptake and phosphocreatine kinetics during high-intensity knee-extension exercise in humans. J Physiol. 537: 291-303.

Rossiter HB, Ward SA, Kowalchuk JM, Howe FA, Griffiths JR, Whipp BJ. (2002) - Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate and high-intensity exercise in humans. *J Physiol.* 541: 991-1002.

S

Sabapathy S, Kingsley RA, Schneider DA, Adams L, Morris NR. (2004) - Continuous and intermittent exercise responses in individuals with chronic obstructive pulmonary disease. *Thorax.* 59: 1026-1031.

Sahlin K. (1992) - Metabolic factors in fatigue. *Sports Med.* 13: 99-107.

Sale DG, MacDougall JD, Jacobs I, Garner S. (1990) - Interaction between concurrent strength and endurance training. *J Appl Physiol.* 68(1): 260-270.

Saltin B, Blomqvist G, Mitchell JH, Johnson RL, Wildenthal K, Chapman CB. (1968) - Response to submaximal and maximal exercise after bed rest and training. *Circulation.* 38(7): 1-78.

Saltin B, Karlsson. (1971a) - Muscle glycogen utilization during work at different intensities in Muscle metabolism during exercise. B Pernow and B Saltin. New York, Plenum. 289-300.

Saltin B, Essén B. (1971b) - Muscle glycogen, lactate, ATP and CP in intermittent exercise. In: Pernow B, Saltin B. (eds). *Muscle metabolism during exercise: Advances in Experimental Medicine and Biology.* Plenum Press. Vol II: 419-424.

Saltin B, Bangsbo J, Graham TE, Johansen L. (1992) - Metabolism and performance in exhaustive intense exercise; different effects of muscle glycogen availability, previous exercise and muscle acidity. In: Marconnet P, Komi PV, Saltin B, Sejersted OM, Graham TE, Johansen L (Eds). *Muscle Fatigue Mechanisms in Exercise and Training*, pp 87-114. Basel: Karger.

Scott CB, Roby FB, Lohman TG, Bunt JC. (1991) - The maximally accumulated oxygen deficit as an indicator of anaerobic capacity. *Med Sci Sports Exercise.* 23: 618-624.

Seiler S, Sjursen JE. (2004) - Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scand J Med Sci Sports.* 14: 318-325.

Seiler S, Hetlelid KJ. (2005) - The impact of rest duration on work intensity and RPE during interval training. *Med Science Sports Exercise.* 1601-1607.

Seiler S, Joranson K, Olesen BV, Hetlelid KJ. (2011) - Adaptations to aerobic interval training: interactive effects of exercise intensity and total work duration. *Scand J Med Sci Sports.* doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01351.x

Serpiello FR, McKenna MJ, Stepko NK, Bishop DJ, Aughey RJ. (2011) - performance and physiological responses to repeated-sprint exercise : a novel multiple-set approach. *Eur j Appl Physiol.* 111 : 669-678.

Sharp RL, Costill DL, Fink WJ, King DS. (1986) - Effects of eight weeks of bicycle ergometer sprint training on human muscle buffer capacity. *Int J Sports Med.* 7 : 13-17.

Shephard RJ. (1968) - Intensity, duration and frequency of exercise as determinant of the response to a training regime. *Int Z Angew Physiol.* 26 : 272-278.

Shephard B, MacDougall J, Cipriano N, Sutton JR, Tornoposky MA, Coates G. (1992) - Physiological effects of tapering in highly trained athletes. *J Appl Physiol.* 72: 706-711.

Short KR, Sedlock DA. (1997) - Excess post-exercise oxygen consumption and recovery rate in trained and untrained subjects. *J Appl Physiol.* 83: 153-159.

Signorile JF, Ingalls C, Tremblay LM. (1993) - The effects of active and passive recovery on short-term, high intensity power output. *Can J of Appl Physiol.* 18:31-42.

Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, Marcotte M, Thibault MC, Bouchard C. (1987) - Effects of two high-intensity intermittent training programs interspaced by detraining on human skeletal muscle and performance. *Eur J Appl Physiol.* 56: 516-521.

Sjogaard G. (1990) - Exercise-induced muscle fatigue: The significance of potassium. *Acta Physiol Scand Suppl.* 593: 1-63.

Smith TP, McNaughton LR, Marshall KJ. (1999) - Effect of 4-wk training using V_{max}/T_{max} on VO_{2max} and performance in athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 31: 892-896.

Smith TP, Coombes JS, Geraghty DP. (2003) - Optimising high-intensity treadmill training using the running speed at maximal O_2 uptake and the time for which this can be maintained. *Eur J Appl Physiol.* 89: 337-343.

Sinnett AM, Berg K, Latin RW. The relationship between field tests of anaerobic power and 10-km run performance. *J Strength Con Res.* 15: 405-412.

Spencer MD, Bishop D, Dawson B, Spencer M. (2005) - Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities. *Sports Med.* 35: 1025-1044.

Spriet L, Lindinger MI, McKelvie S, Heigenhauser F, Jones NL. (1989) - Muscle glycogenolysis and H^+ concentration during maximal intermittent cycling. *J Appl Physiol.* 66(1): 8-13.

Stephens NK, Hawley JA, Dennis SC, Hopkins WG. (1999) - Effects of different interval training programs on cycling time-trial performance. *Med Sci Sports Exerc.* 31: 736-41.

Stephens NK, Martin DT, Fallon KE, Hawley JA. (2001) - Metabolic demands of intense aerobic interval training in competitive cyclists. *Med Sci Sports Exerc.* 33(2): 303-310.

Stephens NK, Coffey VG, Carey AL, Ponnampalam AP, Canny BJ, Powell D, Hawley JA. (2009) - Global gene expression in skeletal muscle from well-trained strength and endurance athletes. *Med sci Sports Exerc.* 41: 546-565.

Stolen T, Chamari K, Castagna C, Wisloff U. (2005) - Physiology of Soccer. Sports Med. 35(6): 501-536.

Syrotuick D, Game A, Gillies E, Bell G. (2002) - Effects of creatine monohydrate supplementation during combined strength and high intensity rowing training on performance. Can J Appl Physiol. 26(6): 527-542.

Syrotuick D, Game A, Gillies E, Bell G. (2002) - Effects of creatine monohydrate supplementation during combined strength and high intensity rowing training on performance. Can J Appl Physiol. 26(6): 527-542.

T

Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, Yamamoto K. (1996) - Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO₂max. Med Sci Sport Exer. 28:1327-1330.

Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M. (1997) - Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. Med Sci Sports Exer. 29(3): 390-395.

Tanasescu M, Leitzmann MF, Rimm EB. (2002) - Exercise type and intensity in relation to coronary heart disease in men. JAMA. 288(16) : 1994-2000.

Tanner RK, Fuller KL, Ross MLR. (2010) - Evaluation of three portable blood lactate analysers: Lactate Pro, Lactate Scout and Lactate Plus. Eur J Appl Physiol. 109: 551-559.

Tardieu-Berger M, Thevenet D, Zouhal H, Prioux J. (2004a) - Effects of active recovery between series on performance during an intermittent exercise model in young endurance athletes. Eur J Appl Physiol. 93: 145-152.

Tardieu M, Leclair E, Thevenet D, Prioux J. (2004b) - Réponses physiologiques à l'exercice intermittent maximal sur piste et sur tapis roulant. Science et Motricité. 52: 127-129.

Taylor HL, Buskirk E, Henschel A. (1955) - Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. J Appl Physiol. 8: 73-80.

Terrados N, Jansson E, Sylven C, Kaijser L. (1990) - Is hypoxia a stimulus for synthesis of oxidative enzymes and myoglobin? J Appl Physiol. 68: 2369-2372.

Terrados N. (1992) - Altitude training and muscular metabolism. Int J Sports Med. 13(1): 206-209.

Theurel J, Lepers R, Pardon L, Maffiuletti NA. (2007) - Differences in cardiorespiratory and neuromuscular responses between voluntary and stimulated contractions of the quadriceps femoris muscle. Resp Physiol Neuro. 157: 341-347.

Theurel J, Lepers R. (2008) - Neuromuscular fatigue is greater following highly variable versus constant intensity endurance cycling. *Eur J Appl Physiol.* 103(4): 461-468.

Thevenet D, Tardieu M, Zouhal H, Jacob C, Abderrahman BA, Prioux J. (2007a) - Influence of exercise intensity on time spent at high percentage of maximal oxygen uptake during an intermittent session in young endurance-trained athletes. *Eur J Appl Physiol.* 102:19-26.

Thevenet D, Tardieu-Berger M, Berthoin S, Prioux J. (2007b) - Influence of recovery mode (passive vs. active) on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young and endurance-trained athletes. *Eur J Appl Physiol.* 99: 133-142.

Thevenet D, leclair E, Tardieu-Berger M, Berthoin S, Regueme S, Prioux J. (2008) - Influence of recovery intensity on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young, endurance-trained athletes. *J Sports Sciences.* 1-9.

Thibault G, Marion A. (1999) - Interval training a practical model. *Coaches rep.* 6: 16-20.

Thibault G. (2009) - Entraînement cardio sports d'endurance et performance. Québec : Vélo Québec Editions.

Tjonna AE, Lee SJ, Rognmo O, Stolen TO. (2008) - Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic syndrome. *Circulation.* 118 : 346-354.

Tomlin DL, Wenger HA. (2001) - The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. *Sports Med.* 31(1) : 1-11.

Toubekis AG, Douda HT, Tokmakidis SP. (2005) - Influence of different rest intervals during active or passive recovery on repeated sprint swimming performance. *Eur J Appl Physiol.* 93: 694-700.

Tordi N, Perrey S, Harvey A, Lughson RL. (2002) - Oxygen uptake kinetics during two bouts heavy cycling separated by fatiguing sprint exercise in humans. *J Appl Physiol.* 94: 533-541.

Tordi N, Mourot N, Collin E, Regnard J. (2010) - Intermittent versus constant aerobic exercise : effects on arterial stiffness. *Eur J Appl Physiol.* 108 : 801-809.

Tuimil JL, Boullosa DA, Fernandez-del-Olmo MA. (2011) - Effect of equated continuous and interval running programs on endurance performance and jump capacity. *J Strength Cond Research.* 25(8): 2205-2211.

Turner AP, Cathcart AJ, Parker ME, Butterworth C, Wilson J, Ward SA. (2006) - Oxygen uptake and muscle desaturation kinetics during intermittent cycling. *Med Sci Sports Exerc.* 38(3):492-503.

Twist C, Eston R. (2005) - The effects of exercise-induced muscle damage on maximal intensity intermittent exercise performance. *Eur J Appl Physiol.* 94 : 652-658.

V

Van Aaken E. (1980) - Training problems of distance runners. 57-61. In Long Distances : contemporary theory, technique and training. Los Altos, California : Tafnews Press.

Vanderthommen M, Kelleter B, Crielaard JM. (1992) - Détermination de la fréquence de stimulation produisant la contraction tétanique maximale du quadriceps fémoral, in Pelissier J, Roques CF Ed., *Electrostimulation des Nerfs et des Muscles*. Paris: Masson, pp 33-37.

Van Praagh E. (2007) - Physiologie du sport : Enfant et Adolescent. Bruxelles : De Boeck.

Viitasalo JT, Komi PV. (1981) - Interrelationships between electromyographic, mechanical, muscle structure and reflex time measurements in man. *Acta Physiol Scand.* 111 :97-103.

Vuorimaa T, Vasankari T, Rusko H. (2000) - Comparison of physiological strain and muscular performance of athletes during two intermittent running exercises at the velocity associated with VO₂max. *Int J Sports Med.* 21(2) : 96-101.

W

Wakefield BR, Glaister M. (2009) - Influence of work-interval intensity and duration on time spent at a high percentage of VO₂max during intermittent supramaximal exercise. *J Strength Cond Res.* 23(9): 2548-2554.

Wenger HA, Bell GJ. (1986) - The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Med.* 3 : 346-356.

Westgarth-Taylor C, Hawley JA, Richard S, Myburgh KH, Noakes T. (1997) - Metabolic and performance adaptations to interval training in endurance trained cyclists. *Eur J Appl Physiol.* 75(4): 298-304.

Weston AR, Myburgh KH, Lindsay FH, Dennis SC, Noakes TD, Hawley JA. (1997) - Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity training by well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol.* 75 :7-13.

Wilmore JH, Costill DL. (1994) - Physiology of sport and exercise. Champaign: Human Kinetics.

Wittenberg BA, Winttenberg JB. (1975) - Role of myoglobine in the oxygen supply to red skeletal muscle. *J Biol Chem.* 250(23): 9038-9043.

Wragg CB, Maxwell NS, Doust JH. Evaluation of the reliability and validity of soccer-specific field test of repeated sprint ability. *Eur J Appl Physiol.* 83: 77-83.

Y

Yoshida T, Watari H, Tagawa K. (1996) - Effects of active and passive recovery on splitting of the inorganic phosphate peak determined by ³¹P-nuclear magnetic resonance spectroscopy. *NMR Biomed.* 9: 13-19.

Yoshida T, Watari H. (1997) - Effect of circulatory occlusion on human muscle metabolism during exercise and recovery. *Eur J Appl Physiol.* 75: 200:205.

Z

Zafeiridis A, Sarivasiliou H, Dipla K, Vrabas IS. (2010) - The effects of heavy continuous versus long and short intermittent aerobic exercise protocols on oxygen consumption, heart rate, and lactate responses in adolescents. *Eur J Appl Physiol.* 110(1): 17-26.

Zory R, Boerio D, Jubeau M, Maffiuletti NA. (2005) - Central and peripheral fatigue of the knee extensor muscles induced by electromyostimulation. *Int J Sports Med.* 26: 847-853.