

Evolution des paramètres ventilatoires au cours de 800m réalisés sur le mode compétition

Christine Hanon, Jean-Michel Le Chevalier, Claire Thomas, Henry Vandewalle

▶ **To cite this version:**

Christine Hanon, Jean-Michel Le Chevalier, Claire Thomas, Henry Vandewalle. Evolution des paramètres ventilatoires au cours de 800m réalisés sur le mode compétition. [Rapport de recherche] Rapport du Projet de Recherche n°335, Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2001. hal-01959478

HAL Id: hal-01959478
https://insep.hal.science//hal-01959478

Submitted on 18 Dec 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport du Projet de Recherche n°335



DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire de biomécanique et de physiologie

EVOLUTION DES PARAMETRES VENTILATOIRES AU COURS DE 800M REALISES SUR LE MODE COMPETITION

Christine Hanon, Jean-Michel Le Chevalier, Claire Thomas et Henry Vandewalle

Rapport de Recherche

Pour le Ministère de la Jeunesse et des Sports

et la FFA

INSTITUT NATIONAL DU SPORT, DE L'EXPERTISE ET DE LA PERFORMANCE
MAPI
Pôle Info-Doc/Médiathèque
11, avenue du Tremblay
75012 PARIS

Octobre 2001

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les différentes personnes qui ont permis la réalisation de ce mémoire particulièrement :

- Henry VANDEWALLE (habilité à diriger des recherches, MCU détaché à l'INSEP), Jean-Michel LE CHEVALIER (médecin/enseignant-chercheur) et Christine HANON (enseignant-chercheur), pour leurs conseils avisés et le partage régulier des réflexions ;
- Christian DENIS (Professeur des Universités) et André GEYSSANT (Professeur des Universités) pour leur accueil au sein du DEA ;
- Robin CANDAU (Professeur des Universités), pour avoir accepté d'être rapporteur hors DEA et pour son regard critique sur mon travail;
- Christian MILLER (Chef du Laboratoire de Biomécanique et de Physiologie de l'INSEP), pour la direction et l'organisation du stage ;
- Chantalle MATHIEU (Directrice du Département des Sciences du Sport de l'INSEP), pour son accueil chaleureux au sein du Département de recherche de l'INSEP ;
- Bruno GAJER (enseignant-chercheur), pour sa collaboration à l'expérience et son aide précieuse dans l'analyse biomécanique ;
- Antoine COUTURIER (enseignant-chercheur), pour sa contribution attentionnée dans l'analyse statistique des résultats ;
- Fabrice PRIEUR (maître de conférence) et Josiane CASTELLS (préparatrice), d'avoir permis la réalisation d'une expérience à St Étienne ;
- Stéphane PERREY (maître de cnférence), pour m'avoir fait parvenir des documents très utiles et pertinents ;
- Tous les athlètes, à savoir Régis RICHARDEAU, Cyrille MAILLARD, Mustapha JOHAR, Bouzid SIMOGRAZ, Jean Michel SAMPER, Boris LE HELLOCQUO, Frédéric ROGERS, Geoffrey BRIAN, Régis CALVEZ.

I. INTRODUCTION 1

II. REVUE DE QUESTIONS 1

A. POINT DE DIVERGENCES AU SEIN DE LA LITTÉRATURE 2
1. Atteinte de VO_2max au cours d'exercices supramaximaux 2
2. Atteinte de VO_2 sous maximal au cours d'exercices supramaximaux 2
B. ESSAI D'EXPLICATIONS POSSIBLES DES DIVERGENCES AU SEIN DE LA LITTÉRATURE 2
1. Type d'ergomètre utilisé et masse musculaire 3
2. Inertie du métabolisme aérobie et protocoles choisis 3
3. Expertise des sujets et discipline sportive 4
4. Méthodes de mesures 4
C. PROBLÈME POSÉ 5
1. 800m et VO_2 5
2. Variations de vitesse au cours d'un 800m de compétition 5
D. OBJECTIFS DU TRAVAIL 6

III. EXPÉRIMENTATIONS 6

A. MATÉRIELS ET MÉTHODES 6
1. Sujets 6
2. Appareil de mesures 6
B. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL 7
1. Épreuve de détermination de la consommation d'oxygène maximale : TUB2 7
2. Épreuve supramaximale 8
3. Modalités de traitement des résultats 8
4. Test de validation du K4 au moyen du GESS 10

IV. RÉSULTATS 11

A. CARACTÉRISTIQUES PHYSIOLOGIQUES DES SUJETS AU COURS DU TEST DE DÉTERMINATION DE VO2MAX 11
1. Analyse du test adapté du TUB2 11
B. ANALYSE DE L'ÉPREUVE SUPRAMAXIMALE 12
1. Vitesses et performances réalisées au cours du 800m 12
2. Résultats des différents paramètres mesurés au cours du 800m 12
C. ÉVALUATION DU K4 AVEC LE GESS 16
1. Résultats 16

V. DISCUSSION 17

A. ANALYSE DE LA CINÉTIQUE DE VO_2 AU DÉBUT DE L'EXERCICE SUPRAMAXIMAL 17
1. Atteinte de VO_2max 17
2. Inertie de VO_2 18
3. Intensité au début de l'épreuve en % de VO_2max 18
4. Modélisation de la cinétique de VO_2 au début de l'exercice supramaximal 19
B. ÉTUDE DE LA BAISSE DE VO_2 DANS LE DERNIER TIERS DU 800M 21
1. Baisse de VO_2 au cours de l'exercice supramaximal : Analyse de la littérature 21
2. Problème méthodologique 22
3. Incidence des variations de vitesses sur la cinétique de VO_2 24
4. Muscles respiratoires 24
5. Principe de Fick 26
6. Altération des capacités fonctionnelles du muscle 29

VI. CONCLUSION 30

VII. BIBLIOGRAPHIE 31

VIII. ANNEXE 35

I. Introduction

Un certain nombre de travaux dans la littérature ont envisagé l'étude de l'évolution de la cinétique du prélèvement d'oxygène ($\dot{V}O_2$) au cours d'exercices supramaximaux. Il n'existe cependant pas de consensus dans la littérature sur ce point. Certains montrent que la consommation d'oxygène maximale ($\dot{V}O_2max$) peut être sollicitée pendant ce type d'épreuve alors que d'autres indiquent des valeurs sous maximales. Par ailleurs, quelques études suggèrent une diminution de $\dot{V}O_2$ à la fin de ces épreuves. Avant de préciser les objectifs et les particularités de ce mémoire de DEA, nous commencerons par un bref rappel des données de la littérature concernant le sujet de la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours d'exercices supramaximaux.

II. Revue de questions

Cette revue de question s'intéressera essentiellement à la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours d'épreuves supramaximales. Nous essayerons de souligner et de pointer les résultats divergents de certaines de ces études, de chercher à en établir les principales explications, et de faire ressortir les questions qui demeurent posées.

De plus en plus d'études s'intéressent à la dépense énergétique occasionnée par les activités sportives. Prenons pour exemple les épreuves de 400m et de 800m en course à pied, l'épreuve du 200m en natation, l'épreuve du 500m en kayak ainsi que le kilomètre lancé en cyclisme, ou encore le 1500m handisport. Ces épreuves consistent en la réalisation d'un maximum de travail ou de distance pendant une durée comprise entre 30 s et 2-3 min. S'agissant d'une série de disciplines au sein desquelles la performance ne repose que sur les propres capacités physiologiques du sportif, la puissance maximale du métabolisme aérobie et la capacité anaérobie, en particulier lactique, y sont des facteurs limitant de la performance. Cependant, la contribution respective d'énergie provenant des métabolismes aérobie et anaérobie reste encore mal connue et il subsiste encore à ce jour des discordances entre l'importance de ces deux métabolismes dans ces disciplines. De plus, en ce qui concerne la participation du métabolisme aérobie, il existe des divergences entre les auteurs quant à l'atteinte ou non de $\dot{V}O_2max$ au cours de ces épreuves supramaximales.

A. Point de divergences au sein de la littérature

1. Atteinte de VO_2max au cours d'exercices supramaximaux

Pour certains auteurs, l'atteinte de $\dot{V}O_2max$ est effective lors d'un exercice supramaximal. Selon Astrand et Rodahl (1994) « un exercice durant une minute ou même moins peut mettre en jeu de

façon maximale le système de transport de l'oxygène ». Ainsi, au cours d'un Wingate test[1] de 30 s (Granier et al. 1995) et au cours d'un exercice supramaximal de 90 s sur ergocyle (Gastin et Lawson 1994), les sujets atteignent 99% de $\dot{V}O_2max$. De même, lors d'une épreuve de Kayak de 500m parcourue en 135,6 ± 11,6 s (Zamparo et al. 1999) et lors d'une épreuve de temps limite sur le terrain, réalisée jusqu'à l'épuisement en 131 ± 38 s à 120 % de $\dot{V}O_2max$ (Billat et al. 2000), $\dot{V}O_2max$ est atteinte pour tous les sujets sauf pour un dans l'étude de Billat et al. (2000), mais ce dernier s'en approche fortement.

2. Atteinte de VO_2 sous maximal au cours d'exercices supramaximaux

En revanche, pour d'autres, $\dot{V}O_2max$ peut ne pas être atteinte. Ainsi, lors d'un test supramaximal sur tapis roulant qui dure 98,2 ± 16,6 s, et qui est effectué à 130 % de la vitesse minimale sollicitant $\dot{V}O_2max$, $\dot{V}O_2$ plafonne à 90,7 % de $\dot{V}O_2max$ (Heugas et al. 1995). De même, Yamamoto et Kanehisa (1995) ainsi que Medbo et Tabata (1989) ont décrit que, pour des exercices supramaximaux sur bicyclette ergométrique, $\dot{V}O_2$ augmente jusqu'à un plateau de seulement 80-90 % de $\dot{V}O_2max$. Cependant, ces études diffèrent notablement par leur protocole ; il s'agit d'une part d'une épreuve all-out[2] de 120 s (Yamamoto et Kanehisa. 1995), et d'autre part, d'une épreuve à puissance constante 119 ± 2 % de $\dot{V}O_2max$ pendant 2-3 min (Medbo et Tabata. 1989).

B. Essai d'explications possibles des divergences au sein de la littérature

Les causes possibles de ces divergences peuvent relever

- du type d'ergomètre utilisé et de la masse musculaire sollicitée,
- de l'inertie du métabolisme aérobie et des protocoles choisis,
- de l'expertise des sujets,
- des méthodes de mesures.

1. Type d'ergomètre utilisé et masse musculaire

Le type d'ergomètre utilisé pose le problème de la masse musculaire impliquée pendant l'effort. En kayak et sur bicyclette ergométrique, la masse musculaire mise en jeu est plus faible qu'en course à pied ou en ski de fond par exemple. Il peut apparaître une fatigue locale des membres inférieurs. Ainsi, beaucoup de variables physiologiques, comme $\dot{V}O_2$, le débit ventilatoire ($\dot{V}E$) ou bien

[1] Le test de Wingate (ou Wingate test) consiste en un exercice de pédalage épuisant contre une résistance choisie en fonction du poids du sujet. Le sujet doit faire autant de révolutions que possible pendant 30 s (Bar'Or et al. 1978).

la fréquence cardiaque (FC), atteignent plus difficilement leurs valeurs maximales lors d'épreuves réalisées sur ergocycle ou kayak que sur tapis roulant.

2. Inertie du métabolisme aérobie et protocoles choisis

Les études anciennes de Margaria et al. (1965) et de Craig (1972) en course à pied et celles d'Astrand et Saltin (1961) en bicyclette ergométrique, montrent que pour des exercices supramaximaux, $\dot{V}O_2max$ est atteinte, et ceci dans un délai d'autant plus court que l'exercice est intense.

Toutes ces études ont été réalisées en laboratoire avec du matériel approprié aux conditions de laboratoire. Les types d'exercices effectués en laboratoire ne reflètent pas les conditions réelles du terrain et ne correspondent pas aux contraintes imposées au sujet lors des compétitions. La bibliographie témoigne de la diversité des protocoles de laboratoire et de leur durée. Certains sont réalisés à puissance supramaximale constante (Astrand et Saltin. 1961 ; Medbo et Tabata. 1989 ; Spencer et al. 1996 ; Spencer et Gastin. 2001) alors que d'autres sont de type all-out (Withers et al. 1991, Gastin et Lawson. 1994, Gastin et al. 1995, Granier et al. 1995). La diversité des protocoles et de leur durée soulèvent des questions de niveau et de répartition de l'intensité de l'effort au cours de l'exercice, ce qui peut influencer la cinétique de $\dot{V}O_2$.

Par exemple, dans les premières secondes d'exercices supramaximaux réalisés en kayak ou sur bicyclette, la puissance mécanique (caractérisée par la cadence de pédalage et la fréquence de pagayage respectivement) atteint une valeur pic maximale qui diminuera par la suite (Withers et al. 1991, Granier et al. 1995, Zamparo et al. 1999), ce qui pourrait expliquer une adaptation plus rapide du prélèvement d'oxygène et l'atteinte de $\dot{V}O_2max$ dans ces études.

Au contraire, la puissance de l'exercice maintenue constante sur tapis roulant ne reflète pas les conditions réelles des épreuves supramaximales, où une phase à intensité élevée est généralement observée en début d'épreuve, et ne permettrait donc pas de solliciter $\dot{V}O_2max$ de façon importante. Par exemple, l'étude de Nummela et Rusko (1995) relative à un exercice supramaximal réalisé sur une distance réelle de 400m et couru sur tapis roulant à vitesse constante, rapporte que $\dot{V}O_2$ atteint une valeur pic de 79 % de $\dot{V}O_2max$.

A priori, dans une épreuve all-out, l'augmentation de $\dot{V}O_2$ devrait être rapide et donc, l'atteinte de $\dot{V}O_2max$ plus précoce. Sachant que les compétitions sportives réalisées sur le terrain ne s'effectuent généralement pas à vitesse constante, mais sont plus rapides au début (Gajer et al. 2000), elles

[2] Lors d'un exercice all-out, on demande au sujet de pédaler à fond pendant une durée déterminée jusqu'à l'épuisement.

représentent donc une situation intermédiaire entre l'épreuve à vitesse constante et l'épreuve de type all-out.

3. Expertise des sujets et discipline sportive

On peut noter, par ailleurs, qu'il existe des différences entre les sujets en fonction de leur pratique et de leur spécialité sportive. Cette notion d'expertise des sujets renvoient aux caractéristiques individuelles des sujets, qu'ils soient sprinters, demi-fondeurs ou bien sédentaires par exemple. En effet, la valeur du pic de $\dot{V}O_2$ au cours d'un Wingate test de 30 s sur ergocycle est différente entre les athlètes sprinters et les athlètes endurants (87 % versus 99 %) (Granier et al. 1995). Les cyclistes de niveau national et international de l'étude de Green et al. (1996) atteignent 96 % de $\dot{V}O_2max$ pour un exercice supramaximal sur ergocycle de 3 min environ, alors que pour le même type d'effort, la $\dot{V}O_2$ des étudiants en éducation physique de l'étude de Medbo et Tabata (1989), plafonne à 85 % de $\dot{V}O_2max$. La différence de sollicitation des deux métabolismes entre ces groupes est probablement due à l'entraînement spécifique, aux facteurs génétiques, ou bien les deux .

4. Méthodes de mesures

Aujourd'hui, pour déterminer la part relative des métabolismes aérobie et anaérobie, la plupart des études en sont réduites à émettre des hypothèses, notamment sur la cinétique de la $\dot{V}O_2$ (Lacour et al. 1990), et sur le coût énergétique en course à pied lors d'exercices supramaximaux (Medbo et al. 1988).

La méthode de calcul du déficit maximal d'oxygène, décrite par Medbo et al. (1988), consiste à effectuer la différence entre la $\dot{V}O_2$ théorique à une vitesse supramaximale donnée et la $\dot{V}O_2$ mesurée au cours de l'exercice. La $\dot{V}O_2$ théorique à une vitesse supramaximale donnée est déterminée à partir de la droite de régression $\dot{V}O_2$ = f(vitesses sous-maximales). L'utilisation de cette méthode, suppose que pour estimer la part du métabolisme anaérobie le coût énergétique soit constant.

Lacour et al. (1990) ont abordé le problème de la contribution des métabolismes d'une part, par la mesure des concentrations sanguines de lactates au décours de la période de récupération d'un 800m de compétition, et en se basant sur des suppositions à propos de l'équivalence d'une mole de lactate qui correspondrait à l'utilisation de 3,3 ml O_2.kg ; et d'autre part, par l'estimation de la contribution du métabolisme aérobie à partir d'un modèle mono-exponentiel de la cinétique de $\dot{V}O_2$ présentée par Péronnet et Thibault (1989). Ce modèle suppose que la courbe d'évolution de $\dot{V}O_2$ est asymptotique avec $\dot{V}O_2max$, à la différence du modèle de Margaria et al. (1965), et il ne tient pas compte des effets

probable des variations de vitesse sur la cinétique de $\dot{V}O_2$.

C. Problème posé

1. 800m et VO_2

Compte tenu des travaux de Margaria et al. (1965) et de Craig (1972), on peut s'attendre à ce que $\dot{V}O_2max$ soit atteinte au cours d'une épreuve supramaximale de 800m. Or Spencer et al. (1996) et Spencer et Gastin (2001), ont simulé une course de 800m sur tapis roulant avec de bons coureurs de 800m. Ils ont montré que $\dot{V}O_2$ atteignait seulement 90 % et 88 ± 2 % de $\dot{V}O_2max$ respectivement au cours d'un 800m couru en 118 ± 2 s (Spencer et al. 1996) et 113 ± 2 s (Spencer et Gastin. 2001). Cependant, les épreuves de 800m étaient réalisées à une intensité de 112 % de $\dot{V}O_2max$ en 1996 et 113 % de $\dot{V}O_2max$ en 2001, ce qui n'était peut être pas suffisant pour atteindre 100 % de $\dot{V}O_2max$ dans un délai de deux minutes. En effet, les auteurs rapportent qu'au cours d'un 400m couru à une puissance constante de 170 ± 12 % de $\dot{V}O_2max$ en 1996 et 151 ± 4 % de $\dot{V}O_2max$ en 2001, l'état stable de $\dot{V}O_2$ se situe respectivement à 98 % de $\dot{V}O_2max$ et 88 % de $\dot{V}O_2max$. Cette différence s'explique par le niveau des sujets et l'intensité requise au cours de l'exercice.

2. Variations de vitesse au cours d'un 800m de compétition

En réalité, une épreuve de 800m est actuellement courue en compétition avec de grandes variations de vitesse, et non à vitesse constante comme au laboratoire. La cinétique de la vitesse se caractérise notamment par une puissante accélération au départ (Gajer et al. 2000), puis une stabilisation de la vitesse suivie de sa diminution progressive voire d'une chute très marquée dans le dernier 100m, mais qui reste cependant supérieure à la vitesse minimale qui sollicite $\dot{V}O_2max$ (appelée Vitesse Maximale Aérobie : VMA).

D. Objectifs du travail

Sur la base des études précédentes, il ressort qu'il subsiste des incertitudes concernant la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours d'un 800m couru sur le mode réel de la compétition, avec des sujets experts. La présente étude s'attachera plus précisément à vérifier les points suivants :

- l'atteinte éventuelle de $\dot{V}O_2max$
- son maintien au cours d'une épreuve supramaximale de 800m où l'intensité est supérieure en début d'épreuve à l'intensité moyenne.

III. Expérimentations

A. Matériels et méthodes

1. Sujets

Cinq sujets volontaires âgés de 27,4 ± 2,7 ans, ont participé à cette étude, tous coureurs de 800m de bon niveau, et régulièrement entraînés (5 à 7 fois par semaine). La taille et le poids moyen des sujets sont respectivement de 179,4 ± 6,9 cm et 68,2 ± 5,8 kg.

2. Appareil de mesures

a. Appareil de mesures des paramètres ventilatoires

Les mesures sont effectuées au moyen d'un appareil Cosmed K4 (Rome, Italie). Il s'agit d'un appareil portatif miniaturisé de 700g, qui permet d'équiper les athlètes pendant leur activité, et de mesurer et de transmettre, par télémétrie, la valeur de différents paramètres ventilatoires [$\dot{V}E$, fréquence respiratoire (FR), volume courant (V_T)...)] et respiratoires [$\dot{V}O_2$ et débit de la production de CO_2 ($\dot{V}CO_2$)...] à l'instar des appareils de laboratoires. Les valeurs obtenues résultent d'un moyennage des mesures effectué toutes les cinq secondes.

Le K4 utilisé ici est constitué d'une chambre d'échantillonage de 0,5 cm^3. Avant chaque expérimentation, les analyseurs de gaz sont étalonnés et calibrés à partir de l'air ambiant (20,93 % pour l'O_2 et 0,03 % pour le CO_2). Ces analyseurs sont thermostatés et prennent en compte les variations de pression barométrique et les variations d'humidité environnementale.

Pour déterminer la concentration en O_2, une électrode polarographique mesure la fraction en O_2 de l'air expiré (FEO_2). L'O_2 se déplace ainsi à travers une membrane dans une solution électrolytique. Pour la mesure du CO_2 dans l'air expiré, le K4 utilise une électrode à infrarouge. Ces deux gaz sont mesurés en conditions standards (STPD). Le prélèvement d'O_2 est calculé selon la formule suivante :

$$\dot{V}O_{2\,(STPD)} = \dot{V}E_{(STPD)} \times \left\{\left[\left((1 - (FEO_2 + FECO_2)) / (1 - FIO_2)\right) \times FIO_2\right] - FEO_2\right\}$$

Les masques sont équipés d'une turbine de 28 mm de diamètre. Cette turbine est calibrée avant chaque expérience grâce à une seringue 3-1 (Hans Rudolph Inc). La rotation de la turbine est mesurée par un système opto-électronique qui compte le nombre de révolution par seconde. Selon le constructeur Cosmed, cet appareil peut mesurer des débits ventilatoires compris entre 4 et 250 $l.min^{-1}$.

Les matériaux actuels plus souples des nouveaux masques employés actuellement, réduisent, voire suppriment les risques de fuite et permettent de respirer simultanément avec la bouche et le nez, ce qui aboutit à un plus grand confort surtout au repos.

b. Appareil de mesure des paramètres circulatoires

La fréquence cardiaque (FC) est mesurée avec un cardio-fréquencemètre de type Polar.

c. Appareil de mesure de la lactatémie

La concentration sanguine de lactate est déterminée par un dosage enzymatique au moyen d'un appareil de type Microzym-L (Inceltech, SGI, Toulouse).

B. Protocole expérimental

Les enregistrements sont réalisés au cours de deux protocoles de course distincts : d'une part un test de terrain destiné à déterminer $\dot{V}O_2max$, VMA et le coût énergétique de la course et, d'autre part, l'épreuve de 800m courue sur le rythme réel d'une compétition. Les deux épreuves sont effectuées durant une période proche des compétitions des sujets ce qui accrédite les performances réalisées.

1. Épreuve de détermination de la consommation d'oxygène maximale : TUB2

Cette épreuve est adaptée du Test de l'Université Bordeaux II : TUB2 (Cazorla G. et Léger L. 1993). Elle consiste à courir, sur une piste balisée, une succession de paliers de 3 minutes, débutant à 14 $km.h^{-1}$, incrémentés de 2 $km.h^{-1}$ jusqu'à 18 $km.h^{-1}$ puis ensuite de 1 $km.h^{-1}$, et séparés d'une récupération d'une minute. À chaque palier, les coureurs doivent suivre la vitesse cadencée par un bipeur (appareil émetteur de signaux sonores). À chaque bip, le coureur doit se trouver au niveau de l'un des repères placés tous les 25m le long d'une piste de 400m. En augmentant la fréquence des signaux à chaque palier, on oblige les sujets à courir plus vite. Lorsque le coureur n'est plus capable de suivre le rythme imposé, l'épreuve est interrompue. On se référera à la valeur de $\dot{V}O_2max$ mesurée au cours de ce test, par le terme « $\dot{V}O_2maxTUB2$ ».

2. Épreuve supramaximale

Il s'agit d'une course de 800m qui simule la compétition. L'échauffement avant le 800m est standardisé. La récupération entre la fin de l'échauffement et le 800m est de 4 minutes pour tous les athlètes. Pour chaque coureur, l'allure est préétablie à partir d'une modélisation décrite par Gajer et al. (2000), qui est fonction de son temps record sur 800m. La vitesse est contrôlée par un expérimentateur sur bicyclette qui accompagne et encourage le sujet au cours de son effort, et qui base sa vitesse de déplacement sur des bips produits tous les 50m.

Toutes les épreuves sont filmées, et la vitesse de course de chaque athlète est analysée ultérieurement par séquence de 25m.

Les échanges gazeux sont enregistrés avant, pendant et après l'épreuve. Des prélèvements de sang sont effectués au lobe de l'oreille, juste avant le départ de l'épreuve, à l'arrêt de l'épreuve puis aux 3, 5, 7, et $10^{ème}$ minutes de la récupération pour estimer le pic de lactatémie maximale.

3. Modalités de traitement des résultats

a. Détermination de la $\dot{V}O_2max$ et de la VMA lors du test « TUB2 »

Les critères de validation de $\dot{V}O_2max$ s'appuient sur les critères présentés par Mc Miken et Daniels (1976) : le constat d'un plafonnement de $\dot{V}O_2$ malgré l'élévation de la puissance de l'exercice, l'atteinte de la fréquence cardiaque maximale théorique (220 battements par minutes moins l'âge en années), une concentration sanguine de lactates supérieures à 8 $mmol.l^{-1}$ (Jousselin et Legros. 1990) et l'épuisement manifeste du sujet qui ne peut plus poursuivre l'épreuve.

Calcul de la VMA sur le terrain :

Au cours du test progressif de TUB2, la vitesse maintenue lors du dernier palier effectué en totalité par le coureur, peut être considérée comme la VMA brute, l'énergie du dernier palier amorcé, mais non achevé, étant principalement fournie par le métabolisme anaérobie.

Calcul de VMA à partir du coût énergétique :

Selon Lacour (1990), la VMA est égale au rapport de la différence entre $\dot{V}O_2max$ et $\dot{V}O_2$ au repos arbitrairement choisi égal à 5 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ et le coût énergétique (coefficient directeur de la droite de régression entre $\dot{V}O_2$ et la vitesse). C'est cette valeur de VMA qui est utilisée dans l'expression relative (% VMA) de la vitesse au cours du 800m.

b. Expression des résultats obtenus lors du 800m

Traitement des différentes données :

Les performances chronométriques des cinq athlètes lors du 800m étant sensiblement différentes, nous avons normalisé les résultats afin d'homogénéiser l'approche. Ainsi, pour chaque paramètre de chaque athlète, une courbe de tendance polynomiale (r = 0,99 pour toutes les courbes) est tracée en fonction du temps. Grâce au logiciel Origin 6.1, les valeurs des points en abscisse sont obtenues à chaque centième de seconde pour chaque courbe de tendance de chaque paramètre. À l'aide des temps de passage à chaque 25m, nous avons redéfini les courbes en fonction de la distance, ce qui permet d'obtenir un même nombre de point (33) et une normalisation précise de chaque paramètre pour tous les athlètes.

Calcul par la méthode de Medbo et al. (1988)

Dans le cadre de cette expérimentation, le calcul a consisté à effectuer la différence entre la $\dot{V}O_2$ théorique à chaque vitesse supramaximale mesurée tous les 25m, qui est déterminée à partir de la droite de régression $\dot{V}O_2$ / vitesses sous-maximales (test de TUB2) et $\dot{V}O_2$ normalisée tous les 25m. À la différence de l'expression en % de VMA L'expression de la vitesse ou de l'intensité de l'exercice en % de $\dot{V}O_2max$ déterminé selon la méthode de Medbo et al. (1988) est usuelle dans la littérature. Aussi, afin d'établir des comparaisons entre études, nous exprimerons la vitesse au cours du 800m en % de $\dot{V}O_2$maxTUB2

Calcul de la constante de temps du métabolisme aérobie (τ).

Pour chaque sujet, nous avons modélisé la première partie de la courbe de VO_2 par une courbe exponentielle de type $\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_{2baseline} + A \cdot (1 - e^{-(t/\tau)})$ où $\dot{V}O_2(t)$ est la $\dot{V}O_2$ à un temps t, $\dot{V}O_{2baseline}$ la $\dot{V}O_2$ à la fin de l'échauffement, A l'amplitude de $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2max$ - $\dot{V}O_{2baseline}$ et τ la constante de temps caractéristique (Barstow et Molé. 1991). Cette modélisation, effectuée à l'aide du logiciel Regressi 2.17, nous a permis de déterminer, pour chaque sujet, une constante de temps τ, et un $t_{1/2}$ égal à 0,693 τ.

c. Traitement statistique

Les valeurs des différentes variables sont exprimées par la moyenne ± l'erreur standard sur la moyenne (m ± SEM). Les évolutions des valeurs de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, V_T, FR, et FC au cours du 800m sont étudiées par une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA sur logiciel Stat View 5.0). Cette même analyse est employée pour déterminer s'il existe des différences significatives :

- entre les valeurs des variables mesurées lors du TUB2, à savoir $\dot{V}O_2max$, $\dot{V}Emax$ et FCmax et leurs valeurs respectives moyennées pendant leur état stable au cours du 800m, à savoir $\dot{V}O_2pic$, $\dot{V}Epic$ et FCpic.
- entre ces dernières valeurs pic et leurs valeurs respectives moyennées à la fin du 800m.

La différence est estimée significative pour $p < 0,05$. Une analyse de régression linéaire est ensuite effectuée afin de déterminer le degré de liaison entre les variables suivantes : $\dot{V}O_2$ et V_T, $\dot{V}O_2$ et $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$ et FR, $\dot{V}O_2$ et vitesse.

4. Test de validation du K4 au moyen du GESS

a. Validation du K4

Le K4 a été validé par Hausswirth et al. (1997) lors d'exercices réalisés sur bicyclette ergométrique à des puissances sous-maximales et maximales. Il est utilisé par de nombreux chercheurs et les résultats mesurés avec cet appareil sont acceptés dans de nombreuses revues, et sont concordants avec ceux de la littérature. Cependant, n'ayant pas encore fait l'objet d'une validation en conditions d'exercice supramaximal et au vue des valeurs de $\dot{V}O_2$ élevées obtenues chez certains sujets, présentées dans une étude préliminaire (rapport de DEA du mois de janvier 2001), nous nous sommes soumis à une nouvelle procédure de vérification en laboratoire à l'aide d'un système mécanique simulant les échanges gazeux humains : le GESS (Gas Exchange Simulation System).

b. GESS

Cet appareil a été conçu et réalisé par Prieur et al. (1998) à St Étienne. Il reproduit les gaz expirés saturés en vapeur d'eau, à une température proche du niveau de la bouche, et les gaz simulant les gaz inspirés sont à une température ambiante. Il permet de simuler différentes $\dot{V}O_2$ en modifiant Vt et/ou FR et/ou en modifiant la composition des gaz expirés.

c. Tests effectués

Les tests ont été effectués en utilisant les débits les plus élevés pouvant être produit par le GESS durant quelques minutes. Plusieurs types de test sont réalisés :

- **Test 1** : deux simulations de paramètres des échanges gazeux constants à $\dot{V}E$ élevé (150 $l.min^{-1}$ pendant 4 min)
- **Test 2** : six simulations des échanges gazeux durant un 800m
- **Test 3** : deux simulations des échanges gazeux durant un exercice incrémental
- **Test 4** : deux simulations des échanges gazeux avec $\dot{V}E$ identique mais avec une valeur de

FR différente durant chaque simulation.

Pour chaque test, le GESS fournit des gaz simulant les gaz expirés (T° = 30°C et saturé en vapeur d'eau). Le gaz inspiré est l'air ambiant (T° = 20° C et Humidité = 35 %). Le K4 mesure les échanges gazeux en continu. Les paramètres théoriques produits par le GESS sont calculés en prenant en compte la température ambiante, la pression barométrique, le facteur de conversion BTPS/STPD, F_{IO_2} et F_{ICO_2} utilisés par le K4. Pour toutes les simulations, les valeurs restituées par le K4 sont un moyennage des mesures effectuées sur cinq secondes.

IV. Résultats

A. *Caractéristiques physiologiques des sujets au cours du test de détermination de VO2max*

1. Analyse du test adapté du TUB2

Les valeurs des paramètres morphologiques et physiologiques [$\dot{V}O_2max$, FCmax, $\dot{V}Emax$, VMA calculée à partir du coût énergétique (Lacour 1990) et estimée sur le terrain à partir des mesures du K4, lactatémie maximale] mesurées lors du test progressif TUB2 sont indiquées dans le tableau n°1.

Tableau I Moyennes et écart types des paramètres déterminés au cours du test progressif TUB2

$\dot{V}O_2$maxTUB2 ($ml O_2.min^{-1}.kg^{-1}$)	$\dot{V}E$max ($l.min^{-1}$)	FCmax ($batt.min^{-1}$)	VMA ($km.h^{-1}$)		Lactatémie maximale ($mmol.l^{-1}$)
			Estimée	Calculée	
66,3 ± 2,3	129,2 ± 11,5	187 ± 12,7	19,9 ± 0,2	19,2 ± 0,5	10,6 ± 2,5

Les critères d'atteinte de $\dot{V}O_2max$ sont respectés au cours de ce test pour tous les sujets. Le niveau des caractéristiques physiologiques de ce groupe est représentatif d'une population de coureurs de demi-fond court bien entraînés, le niveau élite pour des spécialistes de demi-fond court s'illustrant par des valeurs de $\dot{V}O_2max$ supérieures à 71 ± 3,6 $ml O_2.min^{-1}.kg^{-1}$ (Jousselin et Legros. 1990).

Par ailleurs, il n'existe aucune différence significative entre les valeurs de VMA calculées à partir du coût énergétique et la vitesse correspondant à l'atteinte de $\dot{V}O_2max$. ($p > 0,05$).

B. *Analyse de l'épreuve supramaximale*

1. Vitesses et performances réalisées au cours du 800m

Tableau II Récapitulatif des vitesses et performances réalisées

Performance réalisée (s)	Vitesse moyenne au cours du 800m		
	km.h^{-1}	% de la VMA calculée	% de $\dot{V}O_2$maxTUB2
120,8 ± 3,4	23,9 ± 0,7	123,9 ± 5,8	120 ± 3,8

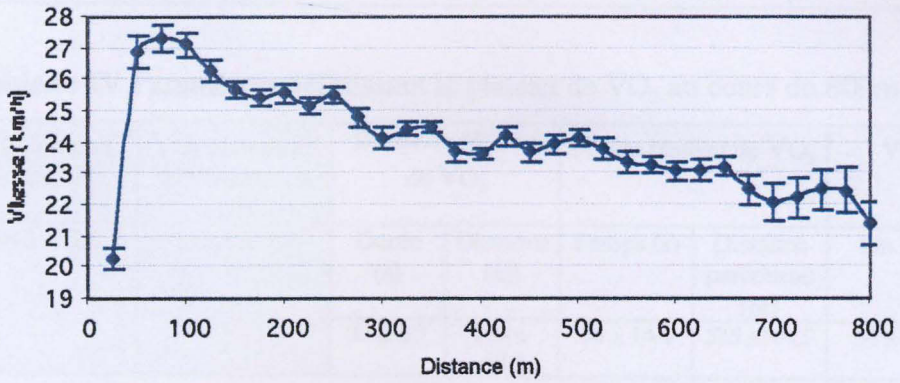


Fig. 1 Moyenne et écart type de la vitesse mesurée tous les 25m

La performance réalisée lors du 800m par chaque athlète est majorée de quelques secondes (en moyenne 5 %) par rapport à leur meilleure performance individuelle réalisée en compétition. On peut noter qu'il s'agit bien d'une épreuve supramaximale, car la vitesse moyenne au cours du 800m de 23,8 ± 0,8 km.h^{-1} correspond à 120 ± 3,8 % de $\dot{V}O_2$maxTUB2. Cette vitesse est supérieure à la VMA déterminée précédemment (19,2 ± 0,5 km.h^{-1}), soit 124,4 ± 5,8 % de cette VMA, et que la vitesse reste en permanence supérieure à VMA même en fin d'épreuve.

2. Résultats des différents paramètres mesurés au cours du 800m

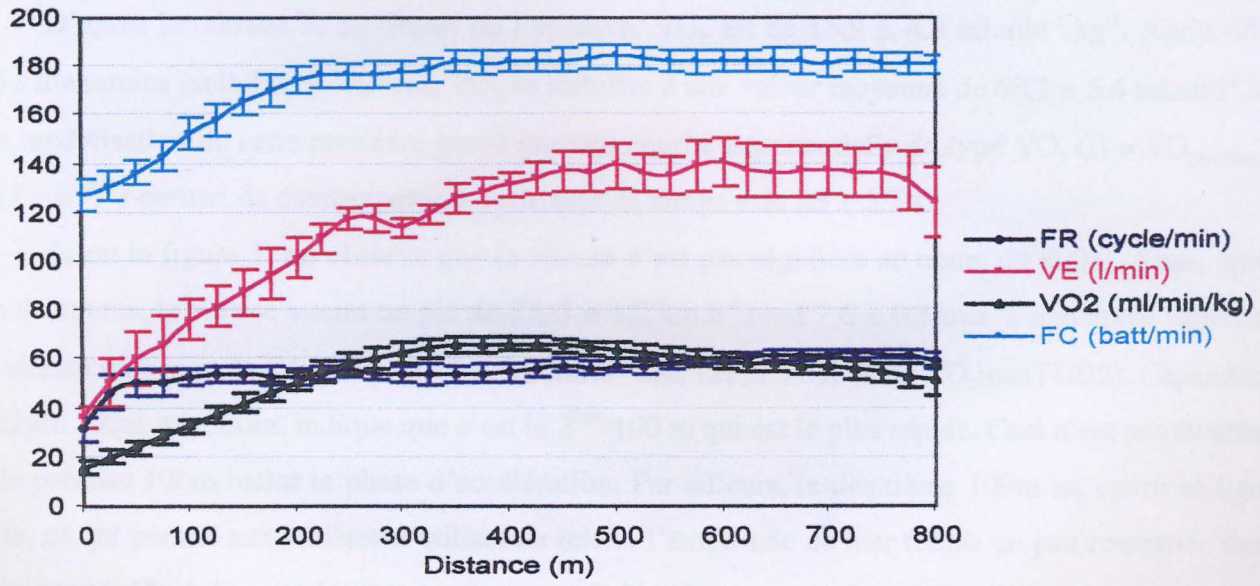


Fig. 2 Moyennes et écart types de 4 paramètres ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, FC, FR) mesurés au cours du 800m

a. Caractéristiques de la cinétique de $\dot{V}O_2$

Tableau III Paramètres définissant l'atteinte du pic de $\dot{V}O_2$ au cours du 800m

$\dot{V}O_2$ (ml.min^{-1}.kg^{-1})		τ (s)	$t_{1/2}$ (s)	Durée (s)	Distance parcourue (m)
Départ	Pic				
15,9 ± 4,8	68,1 ± 5,4	28 ± 5,7	19,4 ± 4,0	45 ± 10,6	316 ± 74,9

Tableau IV Paramètres définissant le plateau de $\dot{V}O_2$ au cours du 800m

$\dot{V}O_2$ plateau (ml.min^{-1}.kg^{-1})	$\dot{V}O_2$ plateau en % VO_2max du TUB2	Durée du plateau de $\dot{V}O_2$		Fin du plateau de $\dot{V}O_2$		Vitesse pendant le plateau de $\dot{V}O_2$		
		Durée (s)	Distance (m)	Temps (s)	Distance parcourue (m)	km.h^{-1}	% de $\dot{V}O_2$maxTUB2	% de VMA calculée
68,1 ± 5,4	102,8 ± 7,2	33 ± 5,7	219 ± 40,5	78 ± 14,4	535 ±104,9	24 ± 0,5	120,8 ± 2,9	124,4 ± 5,8

Tableau V Paramètres définissant la diminution de $\dot{V}O_2$

VO_2 à la fin du 800m			Durée		Vitesse dernier 25m		
ml.min^{-1}.kg^{-1}	% VO2max TUB2	% de diminution	Durée (s)	Distance (m)	km.h^{-1}	% de VO_2max TUB2	% de VMA calculée
54,5 ± 7,1	82,7 ± 9,3	20,6 ± 7	43,1 ± 16,8	265 ± 104	21,6 ± 1,8	111,1 ± 6,6	112,3 ± 9,6

Sur la figure 2, on observe que la cinétique de $\dot{V}O_2$ se décompose en trois parties : une phase d'inertie précédant une phase d'état stable de $\dot{V}O_2$, suivie ensuite d'une diminution. Les caractéristiques de chacune de ces parties sont présentées respectivement dans les tableaux 3,4 et 5.

1ère phase : inertie de $\dot{V}O_2$

D'après le tableau 3, au départ de l'épreuve, $\dot{V}O_2$ est de 15,9 ± 4,8 ml.min^{-1}.kg^{-1}. Après 45 ± 10,6 s d'exercice (soit 316 ± 74,9 m), $\dot{V}O_2$ se stabilise à une valeur moyenne de 68,1 ± 5,4 ml.min^{-1}.kg^{-1}. La modélisation de cette première partie par une courbe exponentielle de type $\dot{V}O_2$ (t) = $\dot{V}O_{2baseline}$ + A . (1 – e $^{-(t/\tau)}$) permet de déterminer une constante de temps τ de 28 ± 5,7 s.

Selon la figure 1, on observe que la vitesse n'est pas régulière au cours du 800m. Ainsi, après 75m de course, la vitesse atteint un pic de 27, 3 ± 1,2 km.h^{-1} (soit 7,6 ± 0,3 m.s^{-1}), nettement supérieur à la vitesse moyenne de l'épreuve (23,9 ± 0,7 km.h^{-1} soit 120,8 ± 3,8 % de $\dot{V}O_2$maxTUB2). Cependant, l'analyse 100m par 100m, indique que c'est le 2ème 100 m qui est le plus rapide. Ceci n'est pas étonnant car le premier 100m inclut la phase d'accélération. Par ailleurs, le deuxième 100m est couru en ligne droite, ce qui permet aux athlètes d'utiliser au mieux l'amplitude de leur foulée un peu contrariée dans le virage précédent. Ensuite la vitesse commence à décroître progressivement.

2ème phase : état stable de $\dot{V}O_2$

La valeur pic moyenne de $\dot{V}O_2$ au niveau de l'état stable n'est pas significativement différente ($p > 0,05$) de celle mesurée lors du TUB2 (66,3 ± 2,3 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$). Au cours de cette expérience, tous les sujets ont ainsi atteint leur niveau maximal de $\dot{V}O_2$. D'après les tableaux 3 et 4, cet état stable de $\dot{V}O_2$ est observé entre 45 ± 10,6 et 78 ± 14,4 s, soit entre 316 ± 74,9 et 535 ± 104,9 m, ce qui correspond à une durée de 33 ± 5,7 s, soit 219 ± 40,5 m. La vitesse moyenne au niveau de ce plateau s'élève à 24 ± 0,5 $km.h^{-1}$. Cette valeur correspond à 124,4 ± 5,8 % de VMA ou encore à 120,8 ± 2,9 % de $\dot{V}O_2max$.

3ème phase : diminution de $\dot{V}O_2$

D'après les tableaux 4 et 5, la baisse de $\dot{V}O_2$ débutant à 78 ± 14,4 s, soit 535 ± 104,9 m, dure 43,1 ± 16,8 s, soit 265 ± 104 m. La valeur de $\dot{V}O_2$ à la fin du 800m s'élève de 54,5 ± 7,1 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$, ce qui correspond à 82,7 ± 9,3 % de $\dot{V}O_2maxTUB2$. Ceci représente une diminution de 20,6 ± 7 %. De plus, la valeur moyenne de l'état stable de $\dot{V}O_2max$ est significativement différente ($p < 0,001$) de celle moyennée à la fin du 800m (54,5 ± 7,1 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$). Cette dernière valeur est de même statistiquement plus basse que celle du TUB2 ($p < 0,001$).

La vitesse décroît progressivement pour n'atteindre plus que 21,6 ± 1,8 $km.h^{-1}$ dans les derniers 25m, ce qui reste toutefois supérieure à VMA et à $\dot{V}O_2max$ (112,3 ± 9,6 et 111,1 ± 6,6 respectivement). Par ailleurs, il n'existe pas de corrélation ($r < 0,7$) entre la chute de $\dot{V}O_2$ et la chute de vitesse chez tous les sujets.

b. Analyse de la cinétique de la fréquence cardiaque

Sur la figure 2, on peut noter que FC augmente de façon parallèle à $\dot{V}O_2$, jusqu'à un plateau maintenu tout au long du 800m. Bien qu'il n'existe aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les valeurs de FCmax mesurées lors du TUB2 et celles de FCmax mesurées lors de l'état stable au cours du 800m (187 ± 13 versus 182 ± 10 $batt.min^{-1}$), aucun athlète n'atteint une valeur de FCmax aussi élevée qu'au TUB2. La même observation est faite par Withers et al. (1991) au cours d'un exercice exhaustif de 90 s sur ergocycle. Par ailleurs, il n'existe pas de différence significative ($p > 0,05$) entre la valeur moyenne du plateau et la valeur finale moyennée de FC (182 ± 10 $batt.min^{-1}$ versus 181 ± 1,1).

c. Analyse de la cinétique du débit ventilatoire, du volume courant et de la fréquence respiratoire

Sur la figure n°2, on observe que FR croît selon deux tendances : une première phase courte et

rapide et une seconde phase où FR croît très lentement, pour se maintenir à un pseudo-état stable seulement à partir de 95 s en moyenne, soit 640m ($p < 0,05$).

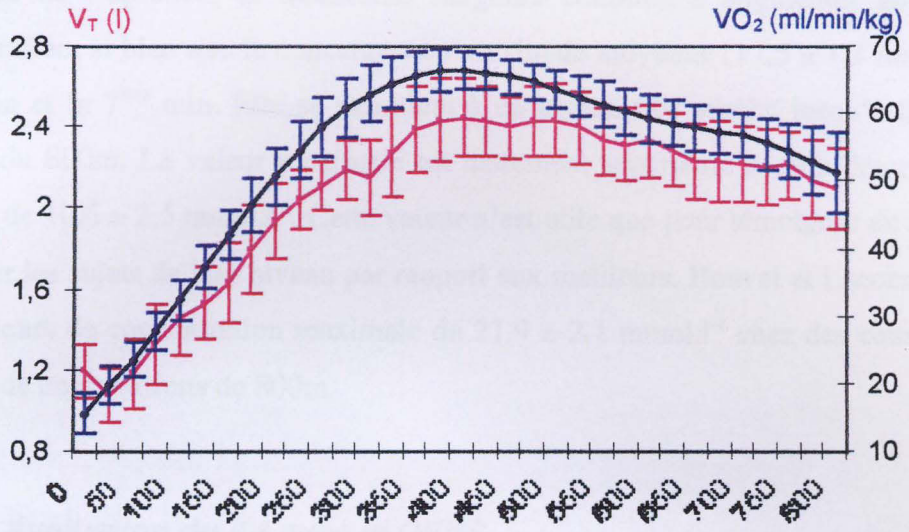


Fig. 3 Moyennes et écart types de VO_2 et de V_T

Sur la figure 3, on constate que la cinétique de V_T suit celle de $\dot{V}O_2$. Ceci se traduit par l'atteinte rapide d'un plateau s'élevant en moyenne à 2,4 ± 0,1 l après 65 s de course, soit 430m, puis par une diminution significative ($p < 0,05$) à partir de 90 s, soit en moyenne à partir de 600m. Chez tous les sujets, la diminution de V_T à une valeur de 2,2 ± 0,1 l est corrélée avec la diminution de $\dot{V}O_2$ (r égal à 0,98).

La première partie de la cinétique de $\dot{V}E$ est parallèle à celle de V_T. L'état stable de $\dot{V}E$ est atteint de même à 65 s, soit 430m ($p < 0,05$), et est postérieur à celui de $\dot{V}O_2$. Les sujets sont en état d'hyperventilation puisque la ventilation pulmonaire est supérieure à celle qui est atteinte lorsque la puissance fournie est moins intense quoique toujours maximale au terme du TUB2 où $\dot{V}O_2max$ est en principe atteint. Cependant, il n'existe pas de différence significative ($p > 0,05$) entre la valeur moyennée du plateau de $\dot{V}E$ au cours du 800m et la valeur maximale mesurée lors du TUB2 (137,3 ± 1,7 $l.min^{-1}$ versus 129,2 ± 11,5 $l.min^{-1}$). Après s'être maintenu à un état stable, $\dot{V}E$ a tendance à diminuer de 9,7 ± 8,9 % à l'arrivée du 800m de façon non significative ($p = 0,058$). On peut noter que dans le premier rapport de DEA du mois de janvier, nous précisions que $\dot{V}E$ baissait significativement ($p < 0,05$) en fin d'épreuve. Les statistiques étaient alors effectuées avec les sept sujets (voir discussion). Par ailleurs, la baisse de $\dot{V}O_2$ n'est pas corrélée avec l'évolution de $\dot{V}E$ lorsque l'on étudie les données lors de la phase de décroissance de $\dot{V}O_2$.

d. Cinétique de la concentration en lactates sanguins au cours du temps de récupération

La valeur moyenne de lactatémie relevée au départ du 800m est de 2,26 ± 0,61 mmol.l^{-1}. À l'arrivée de l'épreuve, la lactatémie sanguine continue à augmenter au début de la période de récupération, si bien que la concentration maximale moyenne (17,5 ± 1,3 mmol.l^{-1}) est atteinte entre la 5ème min et la 7ème min. Elle se maintient à un niveau très proche jusqu'à la dixième minute qui suit l'arrêt du 800m. La valeur maximale est nettement supérieure à celle déterminée lors du test TUB2, qui est de 10,6 ± 2,5 mmol.l^{-1}. Cette valeur n'est utile que pour témoigner de la crédibilité de l'épreuve, et situer les sujets de bon niveau par rapport aux meilleurs. Bouvat et Lacour (1988) ont ainsi rapporté des valeurs de concentration maximale de 21,9 ± 2,1 mmol.l^{-1} chez des coureurs de niveau national à l'issue de compétitions de 800m.

C. Évaluation du K4 avec le GESS

1. Résultats

Selon les résultats de quatre tests réalisés au laboratoire de St Étienne et présentés en annexe, il apparaît que $\dot{V}O_2$ mesurée par le K4 serait sous-estimée de 17,1 ± 42,7 %, pour des simulations d'exercice à fréquences respiratoires élevées. Dans le même temps, $\dot{V}CO_2$ serait sur-estimé pour des niveaux de $\dot{V}CO_2$ modéré puis sous-estimé pour des niveaux de $\dot{V}CO_2$ élevé. $\dot{V}CO_2$ ne serait donc sous-estimé que de 7,9 ± 45 %. Les variabilités importantes de ces erreurs seraient surtout dues aux problèmes de mesure rencontrés lors des simulations des échanges gazeux de repos.

Le test 2 (simulations d'échanges gazeux pendant un 800m) montre que lorsque $\dot{V}E$ devient trop élevé, la sous-estimation de $\dot{V}O_2$ s'aggraverait. Cette augmentation de l'erreur sur $\dot{V}O_2$ serait principalement due à une sur-estimation plus importante de FEO_2. Le test 4 nous permet de supposer que des fréquences respiratoires élevées conduiraient à des problèmes de mesure des gaz liés peut-être à des temps de réponse des analyseurs trop longs.

Cependant, la baisse de $\dot{V}O_2$ n'est pas corrélée (r de l'ordre de 0,01) avec l'augmentation de FR, lorsque l'ensemble des données recueillies sur les cinq sujets pendant la phase de décroissance est étudié.

V. Discussion

Au cours de cette discussion, seront analysés en premier lieu l'atteinte du pic de $\dot{V}O_2$, et ses modalités. Puis, nous examinerons aux plans méthodologique, physiologique et cellulaire les causes

susceptibles de provoquer la chute de la $\dot{V}O_2$ qui survient à la fin de cette épreuve.

A. Analyse de la cinétique de VO_2 au début de l'exercice supramaximal

1. Atteinte de VO_2max

Lors de cette expérience, nos résultats suggèrent que les cinq sujets atteignent $\dot{V}O_2$max avec une valeur pic moyenne de 69 ± 8,6 ml.min^{-1}.kg^{-1}. Cette valeur est non significativement différente de celle mesurée lors du TUB2 (66,3 ± 2,3 ml.min^{-1}.kg^{-1}), et correspond à leur niveau régional. Ce résultat est également en accord avec les valeurs des études de Spencer et al. (1996) et de Spencer et Gastin (2001) et de Craig et Morgan (1998), où les $\dot{V}O_2$max s'élèvent à 67 ± 2 et 64,8 ± 4,5 ml.min^{-1}.kg^{-1} respectivement pour des coureurs sensiblement du même niveau que les nôtres et de mêmes caractéristiques physio-morphologiques.

Cependant, nous devons signaler qu'en réalité nous avons acquis les données de sept sujets au départ. Or, deux des sept sujets ont été évincés de l'étude, car ils semblaient avoir une surestimation de leur $\dot{V}O_2$ au cours du 800m (83 ml.min^{-1}.kg^{-1} en moyenne au niveau de l'état stable) en regard de leur valeur de $\dot{V}O_2$max déterminée lors du TUB2. Peut-être n'ont-ils pas atteint leur vraie valeur de $\dot{V}O_2$max lors du TUB2 ? Ceci est peu probable car les critères d'atteinte de $\dot{V}O_2$max ont été respectés. Leur VMA est estimée en moyenne, pour tous les deux, à 20 km.h^{-1} sur le terrain. Selon Lacour (1990), $\dot{V}O_2$max est égale au produit de la VMA et du coût énergétique moyen en course à pied[3]. La $\dot{V}O_2$max de ces deux coureurs estimée ainsi à 70 ml.min^{-1}.kg^{-1}, est très proche des valeurs de $\dot{V}O_2$max mesurées lors du TUB2 : 68,5 et 68,2 ml.min^{-1}.kg^{-1} respectivement.

Par ailleurs, il est bien établi que la $\dot{V}O_2$max des coureurs de demi-fond de niveau national, plus particulièrement les coureurs de 800m possèdent une $\dot{V}O_2$max de l'ordre de 70 ml.min^{-1}.kg^{-1} (Jousselin et Legros 1990 ; Lacour et al. 1990). D'un autre côté, une valeur de $\dot{V}O_2$max supérieure à 80 ml.min^{-1}.kg^{-1} correspond statistiquement à une valeur de $\dot{V}O_2$ d'un champion olympique du 5000-10 000m. Il existe donc une discordance entre les valeurs relevées et le niveau réel des sujets. Ces arguments, en faveur d'une surestimation de $\dot{V}O_2$max au cours du 800m chez ces deux sujets, expliquent que nous ne les prenons pas en considération. Toutefois, il reste le problème de l'origine de cette probable surestimation de $\dot{V}O_2$max chez ces sujets.

[3] Lorsque les conditions aérobies sont prédominantes, le coût énergétique moyen en course à pied est de 3,5 ml.min^{-1}.kg^{-1}.km.h^{-1} pour des épreuves dont l'intensité est comprise entre 9 et 22 km.h^{-1} (Margaria et al. 1963)

2. Inertie de VO_2

L'atteinte de $\dot{V}O_2max$ après 45 ± 10,6 s (soit après 316 ± 74,9 m) confirme les résultats avancées par Lacour et al. (1990) au cours d'un 800m de compétition. En revanche, ils ne corroborent pas ceux de Spencer et Gastin (2001) et ceux de Spencer et al. (1996), qui suggèrent que seulement 90 % de $\dot{V}O_2max$ est atteinte au cours du 800m couru sur tapis roulant.

Cette différence entre nos résultats et ceux de Spencer et Gastin (2001) et de Spencer et al. (1996), peut s'expliquer par la plus grande importance du coût énergétique au départ, qui devrait contribuer à accélérer la cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$ ainsi que le rapportent les travaux d'Astrand et Saltin (1961) et Margaria et al. (1965) entre autres. Lors de cette présente étude, l'estimation du coût énergétique est probablement sous-estimée pour deux raisons. D'une part, dans les premiers 25 m, on ne tient pas compte de l'énergie nécessaire pour augmenter l'énergie cinétique et, d'autre part, par la suite, le coût énergétique correspond à celui de vitesses inférieures à 20 $km.h^{-1}$ puisque la dépense énergétique est calculée d'après la méthode de Medbo et al. (1988), selon laquelle on utilise un coût énergétique calculé à partir de vitesses inférieures à la VMA.

3. Intensité au début de l'épreuve en % de VO_2max

Déterminons maintenant l'intensité lors des premiers 75m de l'épreuve. En calculant l'intensité requise par la méthode de Medbo et al. (1988), afin d'établir la comparaison avec les résultats de Spencer et Gastin (2001) et Spencer et al. (1996), nous obtenons une valeur de 136,1 ± 8,1 % de $\dot{V}O_2maxTUB2$.

Au cours du 800m couru sur le terrain, les vitesses atteintes par les athlètes dans les premières fractions de 25m dépassent 22 $km.h^{-1}$, c'est-à-dire la fourchette de vitesse définie entre 9 à 22 $km.h^{-1}$ (Margaria et al. 1963), où la dépense énergétique augmente à peu près linéairement avec la vitesse. On ne peut donc pas considérer pour des vitesses supérieures à 22 $km.h^{-1}$ que le coût énergétique reste constant comme l'envisagent Medbo et al. (1988). En effet, selon Léger et Mercier (1983), il est plus élevé sur piste que sur tapis, car la composante aérodynamique sur piste entre en jeu. Une $\dot{V}O_2$ supplémentaire, liée à la résistance offerte par l'air à l'avancement du coureur, est donc à ajouter à la $\dot{V}O_2$ envisagée sur tapis roulant. Ceci se traduit par l'équation suivante : $\dot{V}O_2 = 2,209 + 3,1633v + 0,000525542v^3$ où $\dot{V}O_2$ est en $ml.min^{-1}.kg^{-1}$ et v, la vitesse de la course, en $km.h^{-1}$ (Léger et Mercier. 1983). Suivant cette équation, le coût énergétique pour une vitesse de 24,1 ± 0,6 $km.h^{-1}$ s'élève à 86 ± 2,6 $mlO_2.min^{-1}.kg^{-1}$. Les sujets atteindraient donc une intensité très élevée correspondant à 129,8 ± 4,2 % de $\dot{V}O_2maxTUB2$ au cours des premiers 75m.

À ces 86 ± 2,6 $mlO_2.min^{-1}.kg^{-1}$, il convient d'ajouter la dépense énergétique correspondant à l'accélération en début d'exercice.

Calculons la variation d'énergie cinétique nécessaire pour accélérer dans les 75 premiers mètres du 800m couru sur piste. La vitesse pic mesurée au bout de 75m de course étant de 27,3 ± 1,2 $km.h^{-1}$ soit 7,6 ± 0,3 $m.s^{-1}$ est nettement supérieure à la vitesse moyenne de l'épreuve (23,9 ± 0,7 $km.h^{-1}$). L'énergie cinétique nécessaire pour accélérer de 0 à 27,3 $km.h^{-1}$ correspond à $[(1/2)\ v^2]$ soit 0,5 x $7,56^2$ = 28,6 $Joules.kg^{-1}$. Si l'on considère que le rendement est de 25 %, la dépense énergétique s'élèverait à 28,6 x 4 = 114,3 $Joules.kg^{-1}$. En rapportant cette dernière valeur à l'équivalent énergétique de l'oxygène, nous obtenons le nombre de ml d'O_2 $.kg^{-1}$ consommé en plus lors de l'accélération, soit une fraction d'oxygène supplémentaire de 5,7 $ml.kg^{-1}$. Les 75 premiers mètres, les plus rapides de toute l'épreuve selon la figure 1, étant parcourus en moyenne en 11,2 ± 0,3 s, la consommation supplémentaire d'oxygène correspond à un débit de 31,7 ± 2,2 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$.

La dépense énergétique moyenne au cours des premiers 75m serait donc d'environ 86 + 31,7 = 117,7 ± 4,5 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$ soit 177,6 ± 7,1 % de $\dot{V}O_2$maxTUB2.

4. Modélisation de la cinétique de VO_2 au début de l'exercice supramaximal

Intéressons nous à la modélisation de la cinétique de $\dot{V}O_2$ décrite dans la littérature. Pour les exercices d'intensité sous maximale, il convient de distinguer trois phases au cours de l'exercice, chacune décrite par une fonction mono-exponentielle (Whipp et al. 1982 ; Hughson et al. 2000) : Une première phase durant 15 s environ, est souvent appelée phase cardiodynamique, car elle est fonction de l'augmentation du retour veineux sanguin et de la circulation sanguine perfusant les alvéoles. Une deuxième phase primordiale, où la $\dot{V}O_2$ augmente de manière exponentielle. Les processus adaptatifs du métabolisme oxydatif musculaire s'intensifient, alors que le retour veineux continue d'augmenter et que la quantité d'oxygène prélevée pendant l'exercice s'accroît. Survient ensuite une troisième phase correspondant à une phase plus ou moins stationnaire de $\dot{V}O_2$, où $\dot{V}O_2$ peut parfois augmenter légèrement lorsque l'exercice se déroule à haute intensité sous maximale, alors que la vitesse reste stable. Ce dernier évènement correspond à une phase dite de composante lente.

Intéressons nous maintenant à la modélisation de la cinétique de $\dot{V}O_2$ au début de l'exercice supramaximal. La modélisation de la cinétique de $\dot{V}O_2$ à partir de trois fonctions mono-exponentielles, lors d'exercices sous maximaux, s'explique par la durée de l'effort qui se prolonge. En revanche, du fait de la brièveté des exercices supramaximaux (Billat et al. 2000), la cinétique de l'augmentation de

$\dot{V}O_2$ jusqu'à $\dot{V}O_2$max au cours de ceux-ci est mieux décrite par une seule fonction mono-exponentielle[4] définie entre autre par Barstow et Molé (1991), comprenant à la fois les adaptations des capacités de transport (phase cardiodynamique) et d'utilisation de l'O_2 (inertie du métabolisme oxydatif musculaire).

Margaria et al. (1965) ont démontré que le processus de prélèvement de l'oxygène au début d'un exercice physique peut être décrit comme une fonction exponentielle de l'intensité de l'exercice (et non pas de $\dot{V}O_2$max), ayant une constante de temps d'environ 30 s. Selon Margaria et al. (1965), la valeur de τ resterait invariable pour des exercices exhaustifs de 30 à 120 s. Le modèle de Margaria et al. (1965) fait asymptote avec l'équivalent en oxygène de la dépense énergétique et non avec $\dot{V}O_2$max. Par conséquent, pour une même valeur de τ, le temps de 1/2 adaptation ($t_{1/2}$) est d'autant plus court que l'intensité d'exercice est élevée.

L'estimation de la valeur de τ à partir de données de $\dot{V}O_2$ et selon un modèle mono-exponentiel faisant asymptote avec $\dot{V}O_2$max (et non la dépense énergétique) donne donc des valeurs apparentes de τ plus faible que 30 secondes. Ceci explique par exemple que Zamparo et al. (1999) trouvent une valeur de τ de l'ordre de 24 s, pour un exercice supramaximal de 500m en kayak qui dure 135,7 ± 11,8 s. De même, Astrand et Rodahl (1994) indiquent que « la cinétique de l'augmentation de $\dot{V}O_2$ au cours des premières minutes d'un exercice qui conduit à un état stable, présente une constante de temps d'environ 30 s, mais que cette cinétique serait différente aux cours d'exercices maximaux et supramaximaux ».

Un modèle mono-exponentiel complémentaire faisant asymptote avec $\dot{V}O_2$max est utilisé dans le modèle de Péronnet et Thibault (1989). De même, Lacour et al. (1990), supposent qu'au cours du 800m de compétition, la courbe d'évolution de $\dot{V}O_2$ est asymptotique avec $\dot{V}O_2$max, pour une même constante de temps de 30 s. L'atteinte de $\dot{V}O_2$max est confirmée par nos résultats, qui suggèrent par ailleurs, que τ est égal à 28 ± 5,7 s pour un modèle mono-exponentiel faisant asymptote avec $\dot{V}O_2$max.

Cependant, après la phase d'inertie et d'état stationnaire de $\dot{V}O_2$, il se dégage au cours de la présente étude une troisième phase dans la cinétique de $\dot{V}O_2$. Cette phase apparaît pour tous les athlètes et se caractérise par une chute significative de la $\dot{V}O_2$ ($p < 0,05$), que nous allons étudier maintenant.

[4] $VO_2(t) = VO_{2baseline} + A \times (1 - e^{-(t/\tau)})$ où $VO_2(t)$ est la VO_2 à un temps t, $VO_{2baseline}$ la VO_2 à la fin de l'échauffement, A l'amplitude de VO_2 (VO_2max - $VO_{2baseline}$ et τ la constante de temps caractéristique. (Barstow et Molé. 1991)

B. Étude de la baisse de VO_2 dans le dernier tiers du 800m

Quels que soient les modèles proposés ci-dessus, on s'attendait à ce que l'état stationnaire de $\dot{V}O_2$ soit maintenu au niveau de $\dot{V}O_2max$ jusqu'à la fin du 800m. Or, chez tous les sujets, indépendamment de la grandeur atteinte, $\dot{V}O_2$ diminue de 20,6 ± 7 % très lentement et significativement ($p < 0,05$) à partir 78 ± 14,4 s (soit 535 ±104,9 m), à une valeur inférieure (54,5 ± 7,1 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$) à la valeur maximale déterminée lors du test de TUB2, c'est-à-dire inférieure à $\dot{V}O_2max$ ($p < 0,001$).

1. Baisse de VO_2 au cours de l'exercice supramaximal : Analyse de la littérature

L'observation de cette baisse est en contradiction avec la plupart des résultats rencontrés dans la littérature. Au cours du 800m couru sur tapis roulant à une puissance supramaximale constante de 112 % de $\dot{V}O_2max$ (Spencer et al. 1996) et de 113 % de $\dot{V}O_2max$ (Spencer et Gastin. 2001), $\dot{V}O_2$ se maintient à un état stable d'environ 90 % de $\dot{V}O_2max$ et on n'observe pas de dérive de $\dot{V}O_2$ vers $\dot{V}O_2max$ à la différence des exercices intenses sous maximaux. Ce résultat étonnant n'est pas discuté par ces auteurs. Précisons qu'au cours du 800m couru sur le mode de la compétition, cette phase de composante lente ne peut exister car l'état stable de $\dot{V}O_2$ de chacun des sujets est à son niveau maximal.

Néanmoins, les résultats présentés par Klotschkow et Wassiljewa en 1933 suggèrent une baisse de $\dot{V}O_2$ lors de simulation en laboratoire de 800m réalisée par des sportifs, non-spécialistes de demi-fond (boxeurs, skieurs, athlètes pluridisciplinaires...). Ne possédant pas un entraînement spécifique pour le 800m, ce qui se traduit par un temps d'épreuve nettement plus long (de l'ordre de 170 s), on peut penser que leurs métabolismes étaient moins sollicités spécifiquement que ne le sont ceux des athlètes de demi-fond au cours d'un 800m.

Des résultats plus récents de la littérature, mais sans lien avec le 800m, rapportent la même observation. Perrey et al. (1999 et 2001) ont mis en évidence et tenté d'expliquer, lors d'une épreuve sous maximale effectuée à 95 % de $\dot{V}O_2max$ et conduite jusqu'à l'épuisement, une décroissance de $\dot{V}O_2$ ($p < 0,01$) lors de la dernière phase de sa cinétique chez 7 sujets sur 13. De même, Nummela et Rusko (1995) ont décrit mais sans analyser, au cours d'un 400m, réalisé sur tapis roulant et mené jusqu'à l'épuisement, une baisse significative ($p < 0,05$) en fin d'exercice, chez 13 sujets sur 14. Par ailleurs, la description de la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours de l'exercice supramaximal par Astrand et Rodahl (1994) et Di Prampero et Ferretti (1999) indique une diminution de $\dot{V}O_2$ à la fin de l'exercice. Enfin, l'analyse attentive des figures présentées dans les articles d'Astrand et Saltin (1961), de Gastin

et Lawson (1994), de Yamamoto et Kanehisa (1995), de Zamparo et al. (1999), et de Bishop et al. (2000) fait apparaître, semble-t-il, le même phénomène.

Examinons quelles pourraient être les hypothèses qui permettraient d'expliquer la baisse de $\dot{V}O_2$ au cours du dernier tiers du 800m.

2. Problème méthodologique

Le K4 est utilisé à l'heure actuelle par de nombreux chercheurs (Billat et al. 2000 ; Zamparo 1999). Cet appareil a fait l'objet d'une validation par Hausswirth et al. (1997) pour des exercices sous maximaux et maximaux. Sa validité a été encore confirmée plus récemment par Kristopher et al. (2001) pour des exercices sous maximaux. Les résultats mesurés avec cet appareil sont acceptés dans de nombreuses revues, et sont concordants avec ceux de la littérature.

Cependant, du fait de la surestimation de la $\dot{V}O_2$ de deux sujets et de l'observation de la baisse, nous nous sommes interrogés sur la validité de notre appareil de mesure pour des exercices supramaximaux.

L'évaluation du K4 avec le GESS a donné des résultats apparemment discordants avec les études antérieures sur la validité du K4. Cette discordance pourrait être expliquée par des différences de cinétiques des fractions partielles en O_2 et CO_2 du GESS (proches d'un créneau) et celles correspondant à une expiration au cours de l'exercice : le K4 calcule-t-il les fractions d'O_2 et de CO_2 en fonction d'un modèle au lieu de les mesurer réellement ? Ceci n'est pas précisé dans la notice.

Cette étude montre que le K4 sous estimerait d'environ 17 % la valeur de $\dot{V}O_2$ mesurée, alors que nous nous attendions à l'observation d'une surestimation de $\dot{V}O_2$. Si l'on tient compte de ce résultat, nos valeurs de $\dot{V}O_2max$ s'élèveraient, pour nos sujets, autour de 77 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$. Ce qui est à priori étonnant compte tenu de leur niveau. De plus, les valeurs de $\dot{V}O_2max$ mesurées lors du TUB2 concordent parfaitement avec la littérature, le niveau des athlètes (Jousselin et Legros 1990 ; Lacour et al. 1990 ; Craig et Morgan 1998 ; Spencer et Gastin 2001) et la vitesse au dernier palier achevé complètement.

Par ailleurs, aucune différence significative n'est relevée entre les valeurs de VMA calculées à partir du coût énergétique selon la méthode de Lacour (1990) et celles qui sont estimées sur le terrain à partir des mesures du K4 ($p > 0,05$).

De même, le déficit d'O_2 global pendant le 800m, que nous avons évalué par la méthode de Medbo et al. (1988) à 31,9 % (Thomas et al. 2001), est très voisin des 31 et 34 % déterminés respectivement par Spencer et al. (1996) et Spencer et Gastin (2001). Nous obtenons par ailleurs, la

même dépense en oxygène totale estimée par Lacour et al. (1990) au cours d'un 800m de compétition.

De plus, à la suite de cette expérience, nous avons réeffectué des tests de détermination de $\dot{V}O_2max$ avec le K4. Nous avons obtenu des résultats tout à fait satisfaisants et correspondant précisément au niveau des sujets et aux valeurs prédites selon la méthode de Lacour (1990).

Si réellement le K4 sous estime les valeurs de $\dot{V}O_2$, la dynamique de la cinétique de $\dot{V}O_2$ dans sa première partie ne devrait pas être remise en cause pour autant. La question est de savoir maintenant si la baisse de $\dot{V}O_2$ est liée au K4 ? L'évaluation effectuée avec le GESS, montre que le K4 dysfonctionnerait pour de hautes valeurs de FR (60 cycles.min^{-1}). L'augmentation de FR ferait chuter $\dot{V}O_2$. Or, il n'existe aucune corrélation, chez chacun des sujets, entre la chute de $\dot{V}O_2$ et l'augmentation de FR. De même, chez certains sujets dont les FR sont peu élevées, la $\dot{V}O_2$ diminue aussi significativement.

Le test de fiabilité effectué avec le GESS suggère donc un dysfonctionnement du K4, qui semble cependant incertain en regard de tous ces arguments.

Par ailleurs, Nummela et Rusko (1995) et Perrey et al. (2001) ont eux aussi observé une baisse de $\dot{V}O_2$ mais avec d'autres types d'appareil de mesures des échanges gazeux que le K4. Nummela et Rusko (1995) ont utilisé un analyseur des gaz Sensormedics 2900Z fonctionnant avec une chambre de mélange. Perrey et al. (2001) ont employé deux appareils, afin de s'affranchir de ce problème d'ordre méthodologique, qui sont un analyseur des gaz de type CPX/D Medical Graphics et un spectromètre de masse de type Marquette MGA-110A, fonctionnant tous les deux en cycle par cycle.

Ainsi, le dysfonctionnement du K4 reste toutefois à confirmer et ne semble pas expliquer à lui seul les résultats expérimentaux.

3. Incidence des variations de vitesses sur la cinétique de VO_2

Selon Gajer et al. (2000), le 800m est une course située à la frontière du sprint long et du demi-fond court, et est réalisé à une vitesse au départ plus rapide que la vitesse moyenne, puis sa stabilisation et enfin une chute importante dans le dernier 100m. Ceci est observé pour des courses réalisées entre 1 min 43 et 1 min 52. D'après nos résultats, nous n'observons pas vraiment une stabilisation de la vitesse mais plutôt une décroissance progressive et continue. L'absence de course en peloton et de motivation aiguë de performance chronométrique peut expliquer ce constat car les athlètes ne réussissent pas à vaincre psychologiquement leur fatigue. Mais ils ont tous terminé leur épreuve dans un état de profonde fatigue.

Cependant, cette décroissance de la vitesse, plus ou moins rapidement, ne semble pas avoir un

lien direct sur la baisse de $\dot{V}O_2$. En effet, nos résultats suggèrent une absence de corrélation entre la baisse de $\dot{V}O_2$ et la baisse de vitesse. De plus, la vitesse de course dans le dernier 100m correspond à 110,9 ± 7,9 % de $\dot{V}O_2$maxTUB2 soit 114,8 ± 9,2 % de VMA (vitesse au dernier 25m de 111,1 ± 6,6 % de $\dot{V}O_2$maxTUB2 soit 112,3 ± 9,6% de VMA). La baisse de $\dot{V}O_2$ ne peut donc être expliquée uniquement par une diminution de vitesse, ce qui est confirmé par les études de Nummela et Rusko (1995) et Perrey et al. (1999 et 2001) montrant une diminution de $\dot{V}O_2$ lors d'épreuves réalisées à puissance constante sur tapis roulant.

Intéressons nous maintenant aux hypothèses physiologiques et cellulaires permettant d'expliquer la baisse de $\dot{V}O_2$ en fin d'exercice.

4. Muscles respiratoires

a. Hyperventilation et fatigue des muscles respiratoires

Au cours de cette expérience, nos résultats suggèrent qu'avant de baisser en fin d'épreuve, le débit ventilatoire se maintient à un plateau de 137 $l.min^{-1}$. Ce plateau correspond à un état d'hyperventilation des sujets. Ce débit est peu élevé en regard des 149 $l.min^{-1}$ et des 152 $l.min^{-1}$ mesurés respectivement chez des sujets quelconques (Johnson et al. 1996a) et chez des rameurs (Aaron et al. 1985) lors d'épreuves réalisées à 95 % de $\dot{V}O_2$max. On soupçonne généralement une dérive de l'appareil pour des très hauts débits, ce qui n'est pas le cas au cours de cette expérience.

Selon Astrand et Rodahl (1994), l'hyperventilation est la conséquence d'un abaissement du pH sanguin. Lors de l'exercice intense, les ions H^+ libérés par la glycolyse se combinent aux ions HCO_3^- pour donner du H_2CO_3 qui a son tour se dissocie en H_2O et CO_2. Cette formation extramétabolique de CO_2 stimule les centres respiratoires. Lorsque le pouvoir tampon des ions bicarbonates devient insuffisant, la concentration d'ions H^+ augmente, et ces derniers viennent stimuler directement les muscles respiratoires. (Astrand et Rodahl. 1994)). L'hyperventilation accroît la ventilation alvéolaire et par conséquent la fraction alvéolaire en O_2 (FAO_2). Ceci devrait faciliter les échanges au niveau de la membrane alvéolaire et faciliter la saturation de l'hème. Par ailleurs, l'hyperventilation et la sensation de dyspnée dans laquelle se trouve les sujets, constituent un facteur d'apparition d'une fatigue des muscles respiratoires.

b. Diminution du volume courant

D'après nos résultats, la diminution de $\dot{V}O_2$ est corrélée, pour chaque athlète, à la diminution du volume courant V_T ($r = 0,98$), qui survient cependant avec un léger retard. Au cours du 800m, la baisse de $\dot{V}O_2$ n'est pas corrélée à augmentation de FR. Le volume courant inspiré comprend à la fois une

fraction d'air inhalé qui atteint les alvéoles et participe aux échanges gazeux entre le gaz alvéolaire et le sang, et une fraction qui reste dans les conduits aériens et qui ne participe pas aux échanges gazeux. Par conséquent, la diminution du volume courant a pour conséquence une hypoventilation alvéolaire relative, entraînant une diminution des possibilités d'échanges gazeux avec le sang. Ces observations ont déjà été décrites par Mahler et Loke (1981), mais lors d'épreuves athlétiques de longues durées, et par Perrey et al. (2001) lors d'un exercice réalisé à 95 % de $\dot{V}O_2max$ jusqu'à l'épuisement.

Par ailleurs, la diminution de V_T et l'augmentation progressive de FR jusqu'à un pseudo-état stable témoignent aussi, mais indirectement d'une fatigue des muscles respiratoires (Gallagher et al. 1985), limitant ainsi la performance humaine pour des intensités d'exercice supérieures à 90-95 % de $\dot{V}O_2max$ (Johnson et al. 1996a). Tous ces évènements (diminution de V_T, hypoventilation alvéolaire relative) permettraient d'expliquer en partie la diminution de $\dot{V}O_2$ observée en fin de 800m.

c. Vasoconstriction périphérique

Pour lutter contre la fatigue, les muscles respiratoires prélèvent une part supplémentaire d'oxygène pour assurer leur fonctionnement. Par conséquent, ce phénomène permettrait d'expliquer une augmentation de la $\dot{V}O_2$ et non une baisse comme nous l'observons. Cependant, la part destinée aux muscles locomoteurs squelettiques en activité est réduite, lorsque les muscles respiratoires prélèvent une part supplémentaire d'oxygène (Astrand et Rodahl. 1994).

Ainsi, au cours d'un exercice physique, une baisse de la $\dot{V}O_2$ au niveau des muscles squelettiques des jambes, en activités, a déjà été observée lorsque l'on sollicite ensuite la participation des bras au cours de ce même exercice (Harms. 2000). Ces données sont expliquée par un phénomène de vasoconstriction périphérique provoquant une réduction de la circulation sanguine au niveau des jambes (Dempsey et al. 1996). Le flux sanguin est alors redistribué vers les muscles respiratoires, lorsque le débit cardiaque est proche ou égal à son niveau maximal (Harms. 2000). Cette hypothèse est avancée par Perrey et al. (2001) pour tenter d'expliquer la baisse de $\dot{V}O_2$ qu'ils observent à la fin d'un exercice réalisé à 95 % de $\dot{V}O_2max$ jusqu'à l'épuisement.

Ainsi, à partir d'un certain niveau d'hyperventilation lors de l'exercice très intense (exemple de l'exercice supramaximal comme le 800m), on peut supposer qu'il se produit une vasoconstriction périphérique au niveau des muscles locomoteurs afin que l'organisme puisse assurer sa fonction respiratoire vitale aux dépens de sa fonction locomotrice (Dempsey et al. 1996 ; Perrey et al. 2001). Notons, cependant, que pour que cette hypothèse soit valide et puisse expliquer une diminution du prélèvement d'oxygène au niveau buccal, il faudrait que l'effet de la diminution de $\dot{V}O_2$ au niveau musculaire soit plus important que le prélèvement au niveau des muscles respiratoires.

5. Principe de Fick

Le transport d'O_2 vers les muscles actifs en fonction des besoins, comme de CO_2 vers l'extérieur, dépend des possibilités d'adaptations du débit cardiaque (Qc) et de la différence de contenu en oxygène entre le sang artériel et le sang veineux mêlé. Le principe de Fick reliant ces paramètres s'écrit : $\dot{V}O_2 = Qc. (O_{2artériel} - O_{2\ veineux})$. Une diminution de $\dot{V}O_2$ pourrait donc provenir soit d'une diminution du débit cardiaque, qui doit être à son niveau maximal comme $\dot{V}O_2$, ou soit d'une diminution de la différence artério-veineuse en oxygène.

a. Débit cardiaque

Astrand et Rodahl (1994) ont noté que « lors de l'exercice supramaximal, l'augmentation de la puissance fournie détermine parfois une diminution de la consommation d'oxygène, du débit cardiaque et du volume d'éjection systolique, alors que la fréquence cardiaque peut augmenter légèrement ». De plus, l'équipe du Professeur Lonsdorffer à Strasbourg a observé qu'à la fin d'un test incrémental sur bicyclette ergométrique, $\dot{V}O_2$ diminuait juste avant l'épuisement total du sujet car le volume d'éjection systolique diminuait (Séminaire de DEA à Strasbourg en avril 2001. Intervention de Mr Richard).

La viscosité sanguine est un facteur déterminant du débit sanguin. À hautes vitesses de cisaillement, les propriétés hémorhéologiques du sang pourraient être modifiées par la forte acidose sanguine. La diminution de la déformabilité érythrocytaire provoque de ce fait un accroissement de la viscosité. De plus, la viscosité dépend de l'hématocrite qui augmente à l'exercice. En effet, il se produit une réaction en chaîne : l'augmentation de l'intensité entraîne une augmentation du débit cardiaque, laquelle induit une augmentation des pressions dans la circulation sanguine non seulement dans la grande circulation mais aussi au niveau de l'artère pulmonaire, ce qui provoque des phénomènes d'extravasation. L'extravasation de liquide sanguin dans le liquide interstitiel, qui va en s'aggravant au cours de l'exercice, augmente l'hématocrite et par conséquent la viscosité sanguin. L'extravasation devrait s'accompagner alors d'une diminution du volume sanguin, et donc d'une diminution de la précharge. Ainsi, l'augmentation de la viscosité sanguine conduirait à une diminution du débit cardiaque et à posteriori à une diminution de $\dot{V}O_2$.

D'autre part, la baisse de $\dot{V}O_2$ peut dériver d'une altération de la différence artério-veineuse consécutive soit d'une vasoconstriction au niveau des muscles locomoteurs actifs, énoncée précédemment, soit de l'apparition d'une hypoxémie artérielle induite par l'exercice (EIAH) reflétant ainsi une altération des échanges gazeux pulmonaires, ou bien soit d'une inhibition de la respiration au

niveau cellulaire.

b. Subœdème pulmonaire

L'EIAH pourrait résulter d'un trouble de la diffusion à travers la membrane alvéolo-capillaire du fait des phénomènes d'extravasation déjà évoqués. Ils auraient aussi pour autre répercussion, l'apparition d'un subœdème interstitiel. Ce dernier a déjà été observé lors d'épreuves de longues durées (Mahler et Loke. 1981) et lors d'exercices incrémentaux exhaustifs jusqu'à $\dot{V}O_2max$ (Caillaud et al. 1993). Aussi, la présence de liquide sanguin dans le liquide interstitiel constitue un milieu supplémentaire à franchir par l'oxygène. Il accroît ainsi la distance entre les alvéoles pulmonaires et les globules rouges, ce qui pourrait avoir une incidence sur la cinétique de $\dot{V}O_2$ à la fin de l'exercice supramaximal.

c. Désaturation artérielle

De nombreuses études ont mis en évidence une EIAH, en particulier chez des athlètes entraînés, lors d'exercices exhaustifs (Demspey et Wagner. 1999 ; Préfaut et al. 2000). Selon Dempsey et Wagner (1999), l'EIAH provoque une réduction de $\dot{V}O_2max$. Cependant, peut-on envisager l'apparition d'une EIAH lors d'un exercice supramaximal de moins de 2 minutes ? À ce sujet Billat et al. (1995) ont montré, pour des épreuves exhaustives réalisées à 105 % de $\dot{V}O_2max$ pendant moins de trois minutes, que la pression et la saturation artérielle en oxygène diminuent ($p < 0,05$), déclenchant alors une EIAH.

Ainsi, une relative désaturation artérielle est susceptible de s'installer à l'exercice au niveau de $\dot{V}O_2max$ (Dempsey et al. 1984). Cependant, l'importance de la désaturation artérielle varie avec les sujets selon l'état de leur entraînement. Ces auteurs attribuent ces modifications, pour l'essentiel, à la réduction du temps de transit[5] des globules rouges à travers les capillaires pulmonaires (et à l'éventualité d'une hypoventilation alvéolaire). Ceci provoquerait un défaut de la capacité de diffusion de l'oxygène de l'air au sang et de ce fait, l'équilibre entre les pressions alvéolaires et artérielles ne se ferait pas. Ainsi, en raison de l'acidose sanguine importante et d'un débit cardiaque élevé, les athlètes désaturent en fin d'exercice ou bien aggravent la désaturation observée à $\dot{V}O_2max$.

Remarquons que précédemment nous avons évoqué l'hypothèse d'une diminution du débit cardiaque du fait d'un accroissement de la viscosité sanguine. Dans ce cas, la diminution du débit cardiaque conduirait à une augmentation du temps de transit des globules rouges au niveau des capillaires pulmonaires et musculaires ce qui faciliterait les échanges gazeux. On arrive donc à des

[5] Le temps de transit des globules rouges correspond au rapport volume du lit pulmonaire sur débit cardiaque

modèles si complexes, que selon la valeur entrée dans le modèle, les effets de l'acidose et de l'intensité de l'exercice peuvent être totalement différents.

d. Acidose sanguine et effet Bohr

Au cours de l'exercice, les échanges gazeux, et donc la perfusion des unités d'échange, doivent être proportionnels à la $\dot{V}O_2$ et à la production de CO_2 des tissus. L'équilibre acide-base du sang (et des tissus) est étroitement lié à la pression et au contenu du sang en CO_2. Au plan pulmonaire, l'élimination du gaz carbonique et l'alcalinisation du sang qui en résulte, facilitent la fixation de l'oxygène.

Cependant, au cours de l'exercice supramaximal, l'élimination du CO_2 au niveau pulmonaire n'est peut-être plus suffisante. De plus, la production de lactates, donc d'ions H^+, est importante au cours du 800m (en moyenne de 17 $mmol.l^{-1}$ après 10 minutes de récupération chez les cinq sujets testés). L'acidose musculaire facilite la libération de l'oxygène fixé sur l'hémoglobine et permet un meilleur apport d'oxygène (effet Bohr). Toutefois, les ions hydrogènes ne peuvent être échangés au niveau du poumon. Le pH sanguin s'acidifie fortement, et le sang artériel conserve alors une composition veineuse.

Johnson et al. (1996b) ont proposé un modèle présenté figure n°4, selon lequel $\dot{V}O_2max$ dépend de la P50 et ils décrivent ainsi l'existence d'une P50 optimale. En cours d'exercice, la P50 augmente du fait de l'acidose sanguine et pourrait augmenter de façon si importante qu'elle correspond à la décroissance proposée par le modèle de Johnson et al. (1996b). Le pouvoir de fixation de l'oxygène aux hématies serait ainsi réduit du fait d'une diminution de l'effet Bohr. Notons que ce modèle (Johnson et al. 1996b) décrit ici chez le chien et le cheval de course, peut s'appliquer aussi à l'homme. Par ailleurs, nous pouvons penser que ce modèle serait en fait plus compliqué car l'acidose au niveau local devrait être plus importante qu'au niveau sanguin.

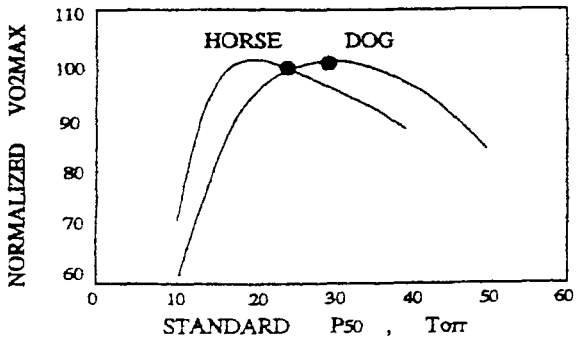


Fig. 4 d'après Johnson et al. (1996b) : Effect of P50 in optimizing maximal oxygène uptake

Jusqu'à présent pour essayer d'expliquer la baisse de $\dot{V}O_2$ d'un point de vue physiologique, nous avons évoqué des hypothèses relatives au transport d'oxygène. Intéressons nous maintenant à l'utilisation de l'oxygène par la fibre musculaire.

6. Altération des capacités fonctionnelles du muscle

La baisse de pH réduit la capacité fonctionnelle du muscle squelettique (Flandrois 1979 ; Poortmans 1994). Elle altère la rapidité des réactions chimiques qui se déroulent au niveau de la fibre musculaire : diminution de l'activité des enzymes clefs de la glycolyse et du cycle de Krebs, entre autres la phosphofructokinase (PFK) et l'α-céto-glutarate-déshydrogénase, qui sont des fournisseurs d'équivalents réduits, NADH et FADH, à la chaîne respiratoire. Il n'a cependant jamais été mis en évidence d'après nos connaissances, que ces altérations biochimiques provoqueraient une baisse de $\dot{V}O_2$ au niveau cellulaire

De plus, d'après la littérature, les changements de pH ont peu ou pas d'effet sur la respiration mitochondriale, bien que Gollnick et al. (1990) aient observé une diminution de la respiration mitochondriale à partir de son niveau maximal. Il n'est cependant pas sûr que la diminution de pH en soit la principale cause. Par ailleurs, la baisse en substrat énergétique comme nous aurions pu l'envisager, n'est pas un facteur limitant et n'affecte ainsi pas la respiration cellulaire (Willis et Jackman. 1994).

Il est donc un peu tôt pour avoir une explication valide d'une éventuelle baisse de $\dot{V}O_2$ au niveau cellulaire. Mais on peut toutefois penser que la forte acidose locale, puis générale, n'est pas sans conséquence sur l'intégrité de l'organisme.

VI. Conclusion

Fondés sur cette expérience, nos résultats suggèrent qu'au cours d'un exercice supramaximal de 800m, réalisé sur le terrain et d'intensité variable, le prélèvement d'oxygène d'un individu entraîné atteint son niveau maximal après 45 ± 10,6 s (soit 316 ± 74,9 m), qu'elle se stabilise pendant 33 ± 5,7 s (soit 219 ± 40,5 m), puis diminue lentement de 20,6 ± 7 % chez tous les sujets à partir de 78 ± 14,4 s (soit 535 ± 104,9 m), alors que l'exercice se poursuit.

La brièveté du 800m et la sollicitation extrême imposée aux sujets, font que cet exercice supramaximal crée un état de déséquilibre important au sein de l'organisme ; notamment, la baisse du pH sanguin et le fonctionnement excessif de certains compartiments, qui mènent l'organisme à l'épuisement. L'observation de la baisse de la $\dot{V}O_2$ en serait une des résultantes.

Toutefois ces résultats méritent d'être vérifiés car il reste une incertitude concernant la validité des mesures de $\dot{V}O_2$ réalisés avec le Cosmed K4 à fréquences respiratoires élevées. Un problème d'ordre méthodologique ne peut pas expliquer à lui seul la diminution de $\dot{V}O_2$ car c'est un phénomène qui a déjà été observé dans la littérature avec différents types d'appareil de mesure des échanges

gazeux (Nummela et Rusko. 1995 ; Perrey et al. 1999 et 2001). Nous avons vu qu'il existait de nombreuses explications possibles de cette baisse de $\dot{V}O_2$. Mais, à ce jour, il est difficile d'apprécier l'importance relative de ces différents facteurs en fin d'exercice supramaximal très intense avec acidose croissante.

VII. Bibliographie

- Aaron E, Henke KG, Pegelow DF, Dempsey JA. Effects of mechanical unloading of the respiratory system on exercise end respiratory muscle endurance. *Med Sci Sports Exerc* (1985) 17 : 290-297.
- Astrand PO, Saltin B. Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. *J Appl Physiol* (1961) 16 : 971-976.
- Astrand PO, Rodahl K. Précis de physiologie de l'exercice musculaire. *3ème édition MASSON* (1994).
- Bar'Or O, Dotan R, Inbar O, Rothstein A, Karlsson J, Tesch P. Anaerobic capacity and muscle fiber type distribution in man. *Int J Sports Med* (1978) 1 : 82-85.
- Barstow TJ, Molé PA. Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *J Appl Physiol* (1991) 71 (6) : 2099-2106.
- Billat V, Renoux, JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. Cinétiques des variables cardio-pulmonaires et métaboliques au cours d'épreuves exhaustives (temps limites) à 90, 100 et 105 % de la vitesse maximale aérobie chez 16 coureurs élites. *Revue des Sciences et techniques des activités physiques et sportives* (1995) 16 (37) : 53-62.
- Billat V, Morton RH, Blondel N, Berthoin S, Bocquet V, Koralsztein JP, Barstow TJ. Oxygen kinetics and modelling of time to exhaustion whilst running at various velocities at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol* (2000) 82 : 178-187.
- Bishop D, Bonetti D, Dawson B. The influence of warm up intensity on supramaximal kayak performance. *5th Annual Congress of the European College of Sport Science, Jyvaskyla, Finland* (2000) short communication p162.
- Bouvat E, Lacour JR. Lactatémie de fin de compétition en athlétisme de haut niveau (sprint long et demi fond). *Mémoire de DEA. Université de St Étienne* (1988).
- Caillaud C, Anselme F, Mercier J, Préfaut C. Pulmonary gas exchange and breathing pattern during and after in highly trained athletes. *Eur J Appl Physiol* (1993) 67 : 431-437.
- Cazorla C, Léger L. Comment évaluer et développer vos capacités aérobies ? Épreuve de course navette et épreuve vameval. *Edition Association Recherche et Évaluation en Activité Physique et en Sport* (1993).
- Craig FN. Oxygen uptake at the beginning of work. *J Appl Physiol* (1972) 33 (5) : 611-615.
- Craig IS et Morgan DW. Relationship between 800m running performance and accumulated oxygen deficit in middle-distance runners. *Med Sci Sports Exerc* (1998) 30 (11) : 1631-1636.
- Dempsey JA, Hanson PG, Henderson KS. Exercise-induced arterial hypoxemia in healthy persons at sea level. *J Physiol (Londres)* (1984) 355 : 161-175.
- Dempsey JA, Harms CA, Ainsworth DM. Respiratory muscle perfusion and energetics during

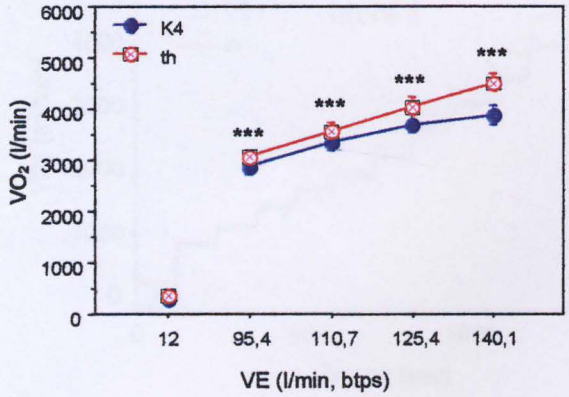
exercise. *Med Sci Sports Exerc* (1996) 28 (9) : 1123-1128.

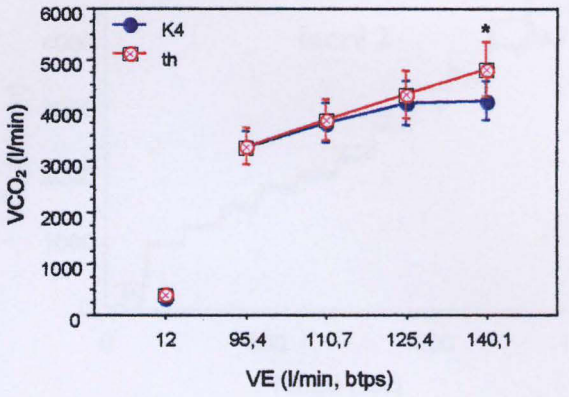
- Dempsey JA, Wagner PD. Exercise-induced arterial hypoxemia. *J Appl Physiol* (1999) 87 (6) : 1997-2006.
- Di Prampero PE, Ferretti G. The energetics of anaerobic muscle metablism : a reppraisal of older and recent concepts. *Resp Physiol* (1999) 118 : 103-115.
- Flandrois R. Énergétique de l'exercice musculaire maximal chez l'homme. *J Physiol* (1979) 75 : 195-205.
- Gajer B, Hanon C, Marajo J, Vollmer JC. Le 800 mètres : Analyse descriptive et entraînement. *Collection entraînement INSEP* (2000).
- Gallagher CG, Im Hof V, Younes M. Effect of inspiratory muscle fatigue on breathing pattern. *J Appl Physiol* (1985) 59 : 1152-1158.
- Gastin PB, Lawson DL. Influence of training status on maximal accumulated oxygen deficit during all-out cycle exercise. *Eur J Appl Physiol* (1994) 69 : 321-330.
- Gastin PB, Costill DL, Lawson DL, Krzeminski K, McConell GK. Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercice. *Med Sci Sports Exerc* (1995) 27 (2) : 255-263.
- Gollnick PD, Bertocci LA, Kelso TB, Witt EH, Hodgson DR. The effect of high intensity exercise on the respiratory capacity of skeletal muscle. *Pfluegers Arch* (1990) 415 : 407-413.
- Granier P, Mercier B, Mercier J, Anselme F, Préfaut C. Aerobic and anaerobic contribution to Wingate test performance in sprint and middle-distance runners. *Eur J Appl Physiol* (1995) 70 : 58-65.
- Green S, Dawson BT, Goodman C, Carey MF. Anaerobic ATP production and accumulated oxygen deficit in cyclists. *Med Sci Sports Exerc* (1996) 28 (3) : 315-321.
- Harms C. Effect of skeletal muscle demand on cardiovascular function. *Med Sci Sports Exerc* (2000) 32 (1) : 94-99.
- Hausswirth C, Bigard AX, Le Chevalier JM. The cosmed K4 telemetry system as an accurate device for oxygen uptake measurements during exercise. *Int J Sports Med* (1997) 18 : 449-453.
- Heugas AM, Brisswalter J, Brandet JP, Legros P. Évaluation de la capacité anaérobie à partir du déficit d'oxygène chez des sprinters d'un haut niveau de performance. *Science & Sport* (1995) 10 : 189-193.
- Hughson RL, O'Leary DD, Betik AC, Hebestreit H. Kinetics of oxygen uptake at the onset of exercise near or above peak oxygen uptake. *J Appl Physiol* (2000) 88 : 1812-1819.
- Johnson BD, Aaron EA, Babcock MA, Dempsey JA. Respiratory muscle fatigue during exercise : implications for performance. *Med Sci Sports Exerc* (1996a) 28 (9) : 1129-1137.

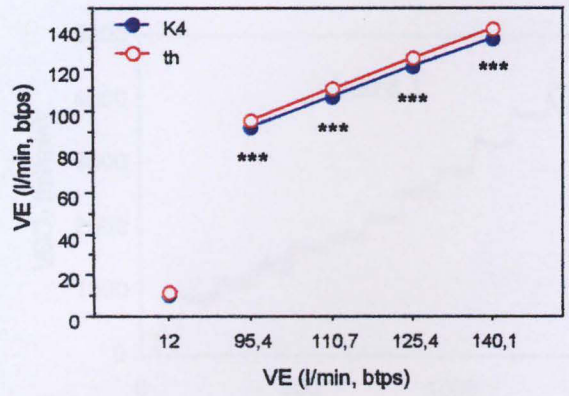
- Johnson RL, Heigenhauser GJ, Hsia CC, Jones N, Wagner PD. Determinants of gas exchange and acid-base balance during exercise. Handbook of physiology. Section 12. Exercise : Regulation and integration of multiple systems. Edited by Loring B Rowell and John T. Shephered. (1996b) p515-584.
- Jousselin E, Legros P. Exploration du métabolisme énergétique chez le sportif de haut-niveau. Métabolisme aérobie résultats par sports. *Collection médecine et sport. Publ. INSEP 71 pp* (1990).
- Klotschkow LA, Wassiljewa ES. Gaswechseluntersuchungen beim Lauf uber verschiedene Strecken. *Arbeitphysiol* (1933) 6 : 62-71.
- Kristopher H, Perrey S, Abe D, Hughson L. Field testing of VO2 peak in cross country skiers with portable breath by breath system. *Can J Appl Physiol* (2001) 26 (1) :1-11.
- Lacour JR, BouvatE, Bartthélémy JC. Post-competition blood lactate concentrations as indiactors of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *Eur J Appl Physiol* (1990) 61 : 172-176.
- Lacour JR. Vitesse maximale aérobie et performances. *Revue de l'Amicale des Entraîneurs Français d'Athlétisme* (1990) 115-116 spécial congrès ITFCA à Aix les Bains : 33-39.
- Léger L, Mercier D. Coût énergétique de la course sur tapis roulant et sur piste : une synthèse des courbes publiées. *Motricité humaine* (1983) 2 : 66-69.
- Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P, Sassi G. Energy cost of running. *J Appl Physiol* (1963) 18 (2) : 367-370.
- Margaria R, Mangili F, Cuttica F, Cerretelli P. The kinetics of the oxygen consumption at the onset of muscular exercise in man. *Ergonomics* (1965) 8 : 49-54.
- Mahler DA, Joke J. Lung function after marathon at warm and cold ambient temperatures. *Med Sci Sports* (1981) 8 (1) : 14-17.
- Mc Miken DF, Daniels JT. Aerobic requirements and maximum aerobic power in treadmill and track running. *Med Sci Sports* (1976) 8 (1) : 14-17.
- Medbo JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. Anaerobic capacity determined by accumulated O2 deficit. *J Appl Physiol* (1988) 64 : 50-60.
- Medbo JI, Tabata I. Relative importance of aerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J Appl Physiol* (1989) 67 (5) : 1881-1886.
- Nummela A, Rusko H. Time course of anaerobic and aerobic energy expenditure during short-therm exhaustive running in athletes. *Int J Sports Med* (1995) 16 : 522-527.
- Perrey S, Candau R, Millet GY, Borrani F, Rouillon JD. Chute de la consommation d'oxygène à la fin d'un exercice exhaustif chez des coureurs à pied entraînés. *Communication présentée dans le cadre du colloque « Biologie de l'exercice musculaire »*, Clermont-Ferrand 28-29 Mai 1999.

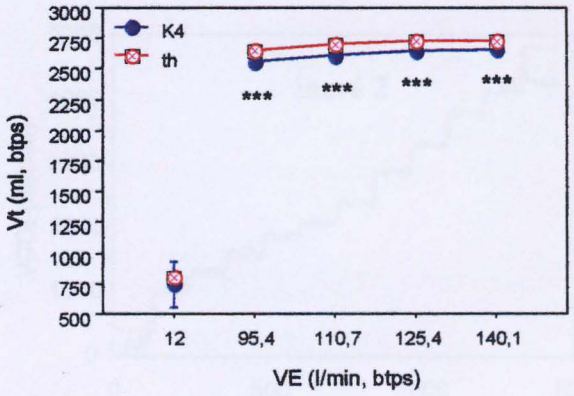
- Perrey S, Candau R, Millet GY, Borrani F, Rouillon JD. Decrease in oxygen uptake at the end of a high-intensity submaximal running in humans. Communication particulière. À paraître dans la revue *Int J Sport Med* (2001).
- Peronnet F, Thibault. Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol* (1989) 67 : 453-465.
- Poortmans JR. Limitations métaboliques de la performance en endurance. VIIIème séminaire de bioénergétique : les limites de la performance humaine. *Éditions : Revue EPS* (Mars 1988).
- Préfaut C, Durand F, Mucci P, Caillaud C. Exercise-induced arterial hypoxemia in athletes. *Sports Med* (2000) 30 (1) : 47-61.
- Prieur F, Bussot T, Castells J, Bonnefoy R, Geyssant A, Denis C. A system to simulate gas exchange in humans to control quality of metabolic measurements. *Eur J Appl Physiol* (1998) 78 : 549-554.
- Spencer MR, Gastin PB, Payne WR. Energy system contribution during 400 to 1500 meters running. *New Studies in Athl* (1996) 11 : 59-65.
- Spencer MR, Gastin PB. Energy contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* (2001) 33 (1) : 157-162.
- Thomas C, Hanon C, Le Chevalier JM, Couturier A, Vandewalle H. Estimation de la contribution énergétique d'origine aérobie et anaérobie et de sa répartition au cours d'un 800m couru sur le mode compétition. *Colloque de Biologie de l'exercice musculaire à Clermont-Ferrand* 18 et 19 Mai 2001.
- Willis WT, Jackman MR. Mitochondrial function during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc* (1994) 26 (11) : 1347-1353.
- Whipp BJ, Ward SA, Lamarra N, davis JA, Wasserman K. Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. *J Appl Physiol* (1982) 52 : 1506-1513.
- Withers RT, Sherman WM, Clark DG, Esselbach PC, Nolan, Mackay MH, Brinkman M. Muscle metabolism during 30, 60, and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur J Appl Physiol* (1991) 63 : 354-362.
- Yamamoto M, Kanehisa H. Dynamics of anerobic and aerobic energy supplies during sustained high intensity exercise on cycle ergometer. *Eur J Appl Physiol* (1995) 71 : 320-325.
- Zamparo P, Capelli C, Guerrini G. Energetics of kayaking at submaximal and maximal speeds. *Eur J Appl Physiol* (1999) 80 : 542-548.

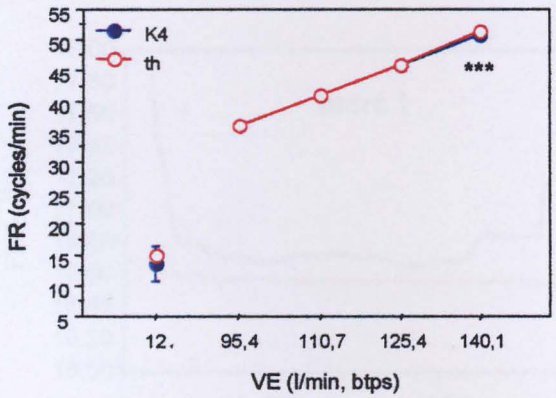
Annexe

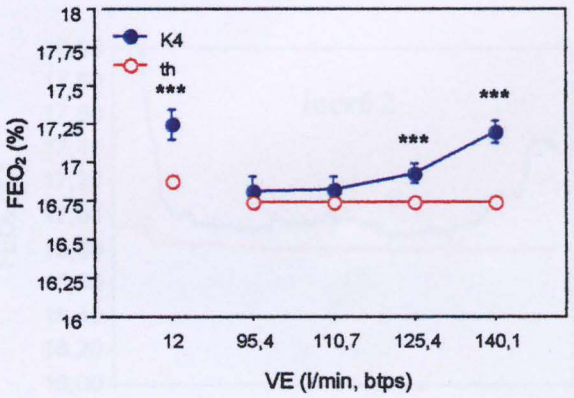












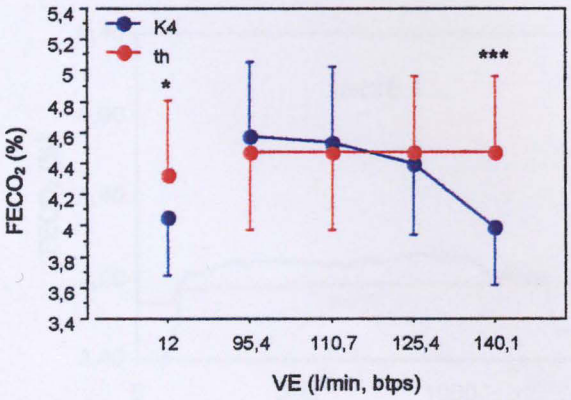
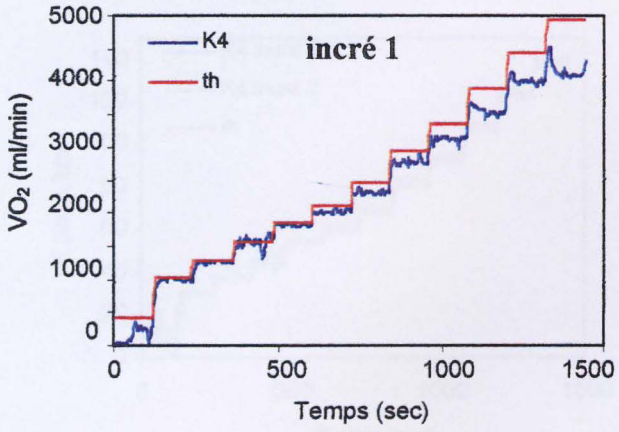
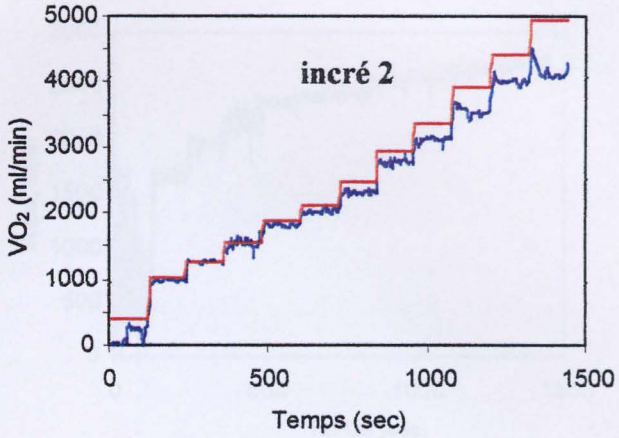
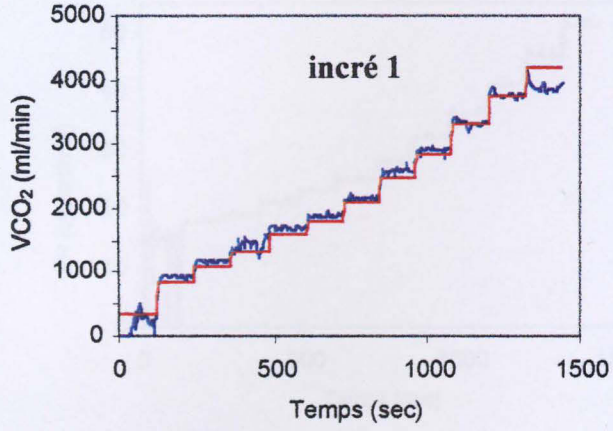
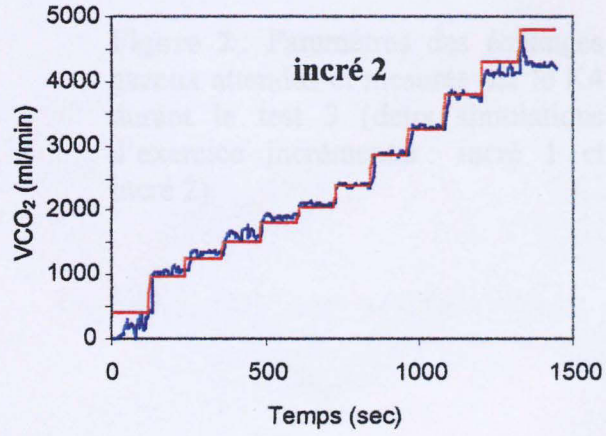


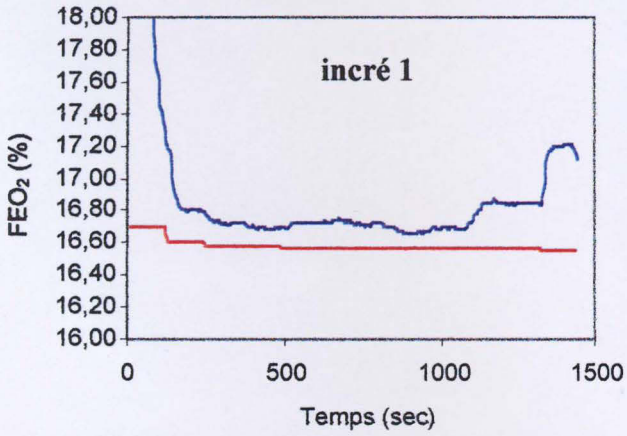
Figure 1 : Paramètres des échanges gazeux attendus et mesurés par le K4 durant le test 2.

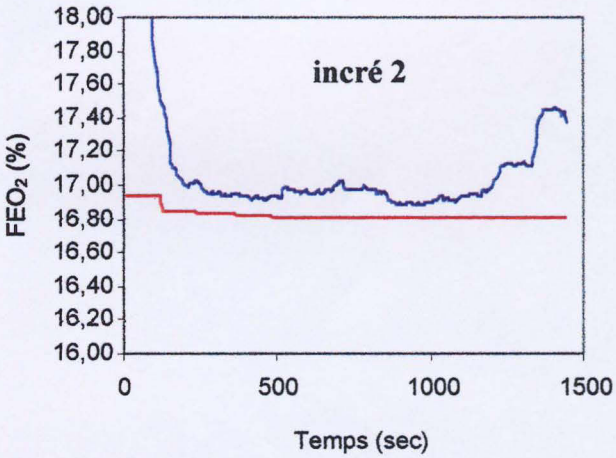

K4
th
incré 1
VO2 (ml/min)
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
500
1000
1500
Temps (sec)

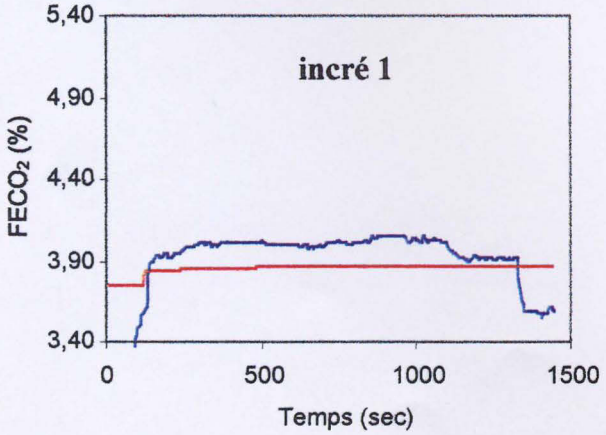

incré 2
VO2 (ml/min)
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
500
1000
1500
Temps (sec)

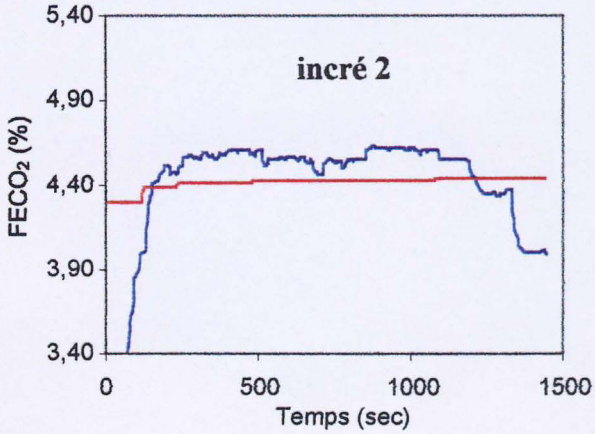

incré 1
VCO2 (ml/min)
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
500
1000
1500
Temps (sec)

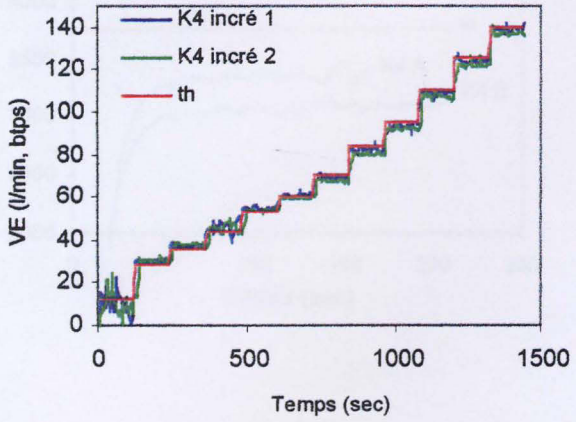

incré 2
VCO2 (ml/min)
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
500
1000
1500
Temps (sec)

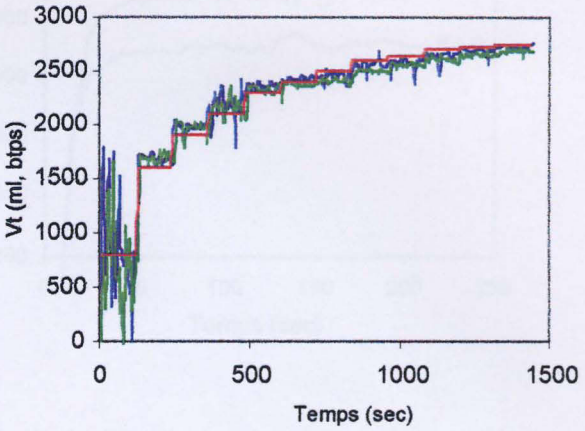

incré 1
FEO2 (%)
18,00
17,80
17,60
17,40
17,20
17,00
16,80
16,60
16,40
16,20
16,00
0
500
1000
1500
Temps (sec)


incré 2
FEO2 (%)
18,00
17,80
17,60
17,40
17,20
17,00
16,80
16,60
16,40
16,20
16,00
0
500
1000
1500
Temps (sec)


incré 1
FECO2 (%)
5,40
4,90
4,40
3,90
3,40
0
500
1000
1500
Temps (sec)


incré 2
FECO2 (%)
5,40
4,90
4,40
3,90
3,40
0
500
1000
1500
Temps (sec)





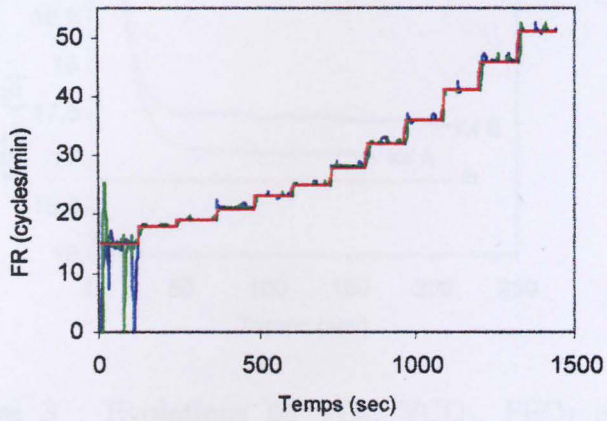


Figure 2 : Paramètres des échanges gazeux attendus et mesurés par le K4 durant le test 3 (deux simulations d'exercice incrémental : incré 1 et incré 2)

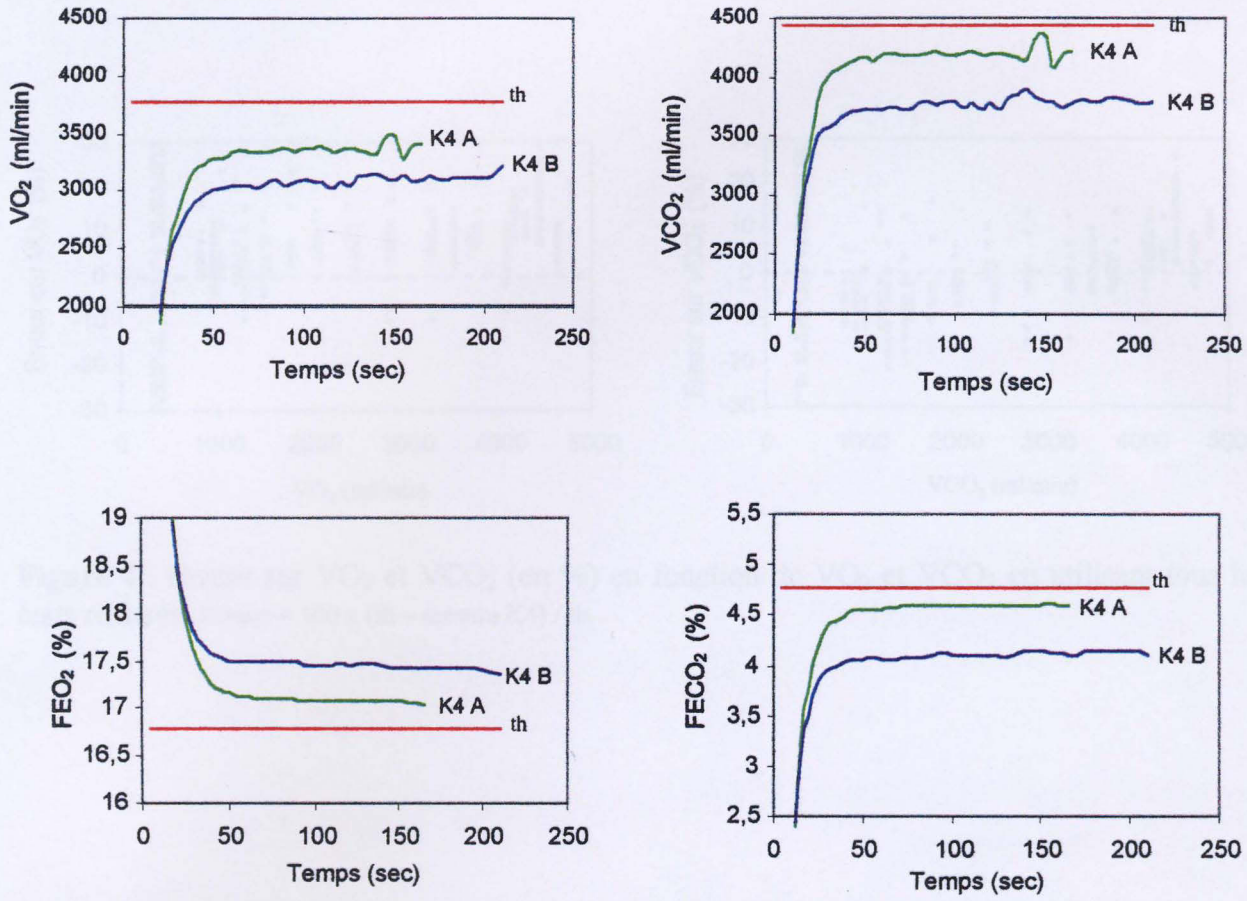


Figure 3 : Evolutions de VO_2, VCO_2, FEO_2 et $FECO_2$ mesurés par le K4 pour deux combinaisons différentes de FR et Vt donnant un même VE (120 l/min) lors du test 4. K4 A : Vt = 2667 ml (btps), FR = 45 cycles/min ; K4 B ; Vt = 2000 ml (btps), FR = 60 cycles/min.

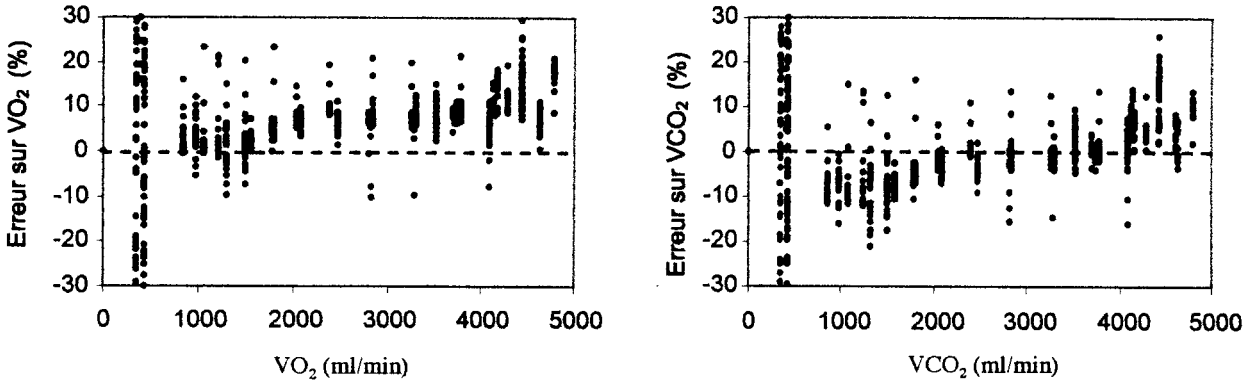


Figure 4 : Erreur sur VO_2 et VCO_2 (en %) en fonction de VO_2 et VCO_2 en utilisant tous les tests réalisés. Erreur = 100 x (th – mesure K4) / th.

Résumé

La présente recherche avait pour objet de recueillir et analyser les paramètres ventilatoires d'athlètes spécialistes de 800m réalisés sur le mode de la compétition c'est à dire en reproduisant le modèle usuel : départ rapide, maintien d'une vitesse plateau puis chute de la vitesse. A ce jour en effet, seuls étaient disponibles dans la littérature scientifique des résultats obtenus sur tapis roulant à puissance constante.

Les questions posées étaient : Atteint-on VO2max au cours d'un 800m ? Si oui au bout de combien de temps ? Cette valeur est-elle maintenue jusqu'au bout de la course ?

Huit athlètes ont été sollicités pour cette étude. Seuls 5 d'entre eux ont été retenus dans cette étude afin de satisfaire aux exigences fixées.

Chacun d'eux a procédé à 2 tests distincts : un test sur piste de détermination de VO2max (TUB2) et un 800m. Les sujets étaient équipés d'un K4 afin d'enregistrer en continu les échanges respiratoires au cours des 2 tests.

Les résultats de cette étude montrent que :

- les athlètes atteignent tous VO2max au cours du 800m
- VO2max est atteint après 45 secondes (soit un peu plus de 300m de course
- VO2 diminue ensuite progressivement d'environ 20% à partir de 78 secondes (soit un peu plus de 500m) de course.

Cet exercice supramaximal très intense crée une perturbation importante de l'homéostasie. La baisse du pH sanguin semble être une des causes les plus fréquemment invoquées.

Un travail exploratoire sur d'autres distances voisines telles que le 1500m, réalisées en compétition sans chute de vitesse, pourrait être source d'informations précieuses pour l'entraînement et pour la recherche.