

Evaluation de la contribution du système aérobie lors d'une épreuve de 1500 m en course à pied

Christine Hanon, Laurence Vivier, Jean-Michel Lévêque, Stéphane Perrey, Jean-François Pontier

▶ **To cite this version:**

Christine Hanon, Laurence Vivier, Jean-Michel Lévêque, Stéphane Perrey, Jean-François Pontier. Evaluation de la contribution du système aérobie lors d'une épreuve de 1500 m en course à pied. [Rapport de recherche] Rapport du projet de recherche No 03-050, Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2005. hal-01961043

HAL Id: hal-01961043
https://insep.hal.science//hal-01961043

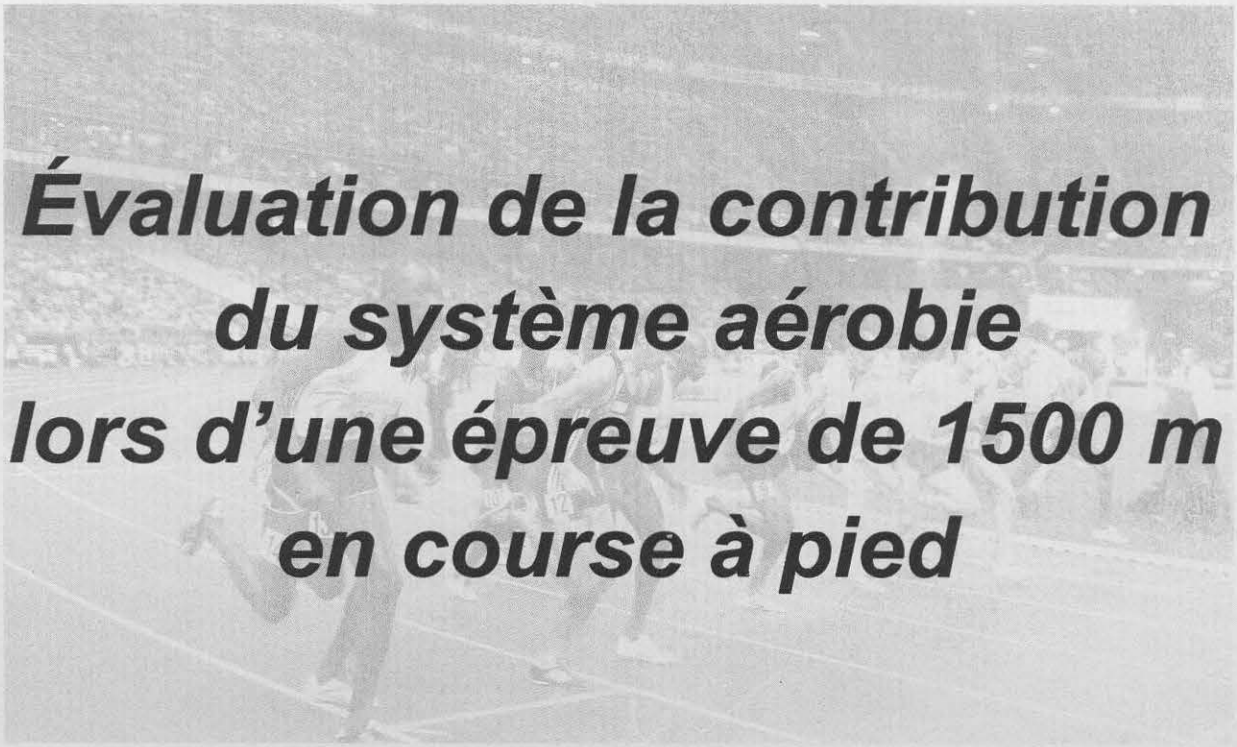
Submitted on 19 Dec 2018

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.

Septembre 2005

Rapport du projet de recherche N° 03-050
Département des Sciences du Sport
Laboratoire de Biomécanique et Physiologie



Évaluation de la contribution du système aérobie lors d'une épreuve de 1500 m en course à pied

Christine HANON[1], Laurence VIVIER[2]

Collaborateurs scientifiques : J-M. LEVÊQUE[1], S. PERREY[3]

Collaborateurs Fédéraux : PONTIER J.-F.[2]

Travail effectué par

[1]Laboratoire de Biomécanique et Physiologie, INSEP

En collaboration avec

[2]Fédération Française d'Athlétisme

[3]Faculté des sciences du sport, EA 2991 Efficience et Déficience Motrices, Montpellier

Téléchargement sur le site : http://sciences.campus-insep.com

INSEP
Institut National du Sport

Institut National du Sport et de l'Éducation Physique
11, avenue du Tremblay—75012 Paris
01 41 74 41 00—www.insep.fr

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE LA JEUNESSE, DES SPORTS ET DE LA VIE ASSOCIATIVE

Rapport du projet de recherche N° 03-050



DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

LABORATOIRE DE BIOMECANIQUE ET PHYSIOLOGIE

Evaluation de la contribution du système aérobie lors d'une épreuve de 1500 m en course à pied.

HANON Christine[1], VIVIER Laurence [2]

Collaborateurs scientifiques :
Levêque J.M [1], Perrey S [3]

Collaborateurs Fédéraux : Pontier J.F[2]

Travail effectué par :

[1] Laboratoire de Biomécanique et Physiologie, INSEP (Responsable : C. Hanon)

En collaboration avec

[2] Fédération Française d'Athlétisme
[3] Faculté des sciences du sport, EA 2991 Efficience et Déficience Motrices, Montpellier

Septembre 2005

Téléchargement sur le site http://sciences.campus-insep.com/

Sommaire

Remerciements

Introduction ..... *page 1*

Partie 1 : Revue de la littérature ..... *page 4*

I. Les exercices supramaximaux ..... *page 5*

A. Relation entre VO_2max et la performance ..... *page 6*

B. Evolution des paramètres ventilatoires et circulatoires aux cours des exercices supra-maximaux ..... *page 9*

1. *Evolution de la consommation d'oxygène (VO_2) selon l'intensité de l'exercice* ..... *page 9*
    a. Description de la phase d'inertie ..... *page 10*
    b. Atteinte ou non de VO_2 max ..... *page 15*
    c. Chute ou non de VO_2 ..... *page 20*
2. *Lactatémie, déficit en oxygène, dette d'O_2* ..... *page 22*
    a. La lactatémie ..... *page 22*
    b. Le déficit en oxygène ..... *page 26*
    c. Les mesures « post-exercice » de la dette d'O_2 ..... *page 31*
3. *Contribution relative des systèmes aérobie / anaérobies lors d'exercices supra-maximaux* ..... *page 33*

II. Evolution des paramètres mécaniques, en course ..... *page 37*

III. Répartition des efforts ..... *page 41*

A. Etude descriptive ..... *page 41*

1. *Observations du 3000 au marathon* ..... *page 41*
2. *Observations sur 800 m* ..... *page 42*
3. *Observations sur 1500 m* ..... *page 43*

B. Stratégie et performance ..... *page 48*

C. Stratégie et paramètres physiologiques ..... *page 50*

D. Stratégie et sports ..... *page 50*

IV. Objectifs de notre étude ..... *page 51*

Partie 2 : Etude Préalable .....*page 55*

Etude chronométrique : Etude du profil de course pour des épreuves de 1500 m courues dans un objectif de performance..... .....*page 55*

I. **Méthodologie** ....*page 55*

A. Population étudiée .....*page 56*

B. Matériel et méthode .....*page 56*

1. Caméra, images télévisées, et documents vidéos .....page 56

2. Magnétoscope.....page 56

3. Chronomètre .....page 56

4. Outil Internet .....page 56

5. Balisage .....page 57

6. Mode de recueil .....page 57

7. Problèmes rencontrés .....page 58

C. Variables mesurées .....*page 59*

D. Variables calculées .....*page 59*

1. Temps moyen par 100 m .....page 59

2. Pourcentage de la vitesse moyenne par fraction de 100 m .....page 59

A. Traitement statistique .....*page 59*

II. **Résultats de l'étude A** .....*page 60*

A. Analyse globale des résultats obtenus .....*page 60*

B. Analyse par niveau .....*page 62*

III. **Discussion et conclusion** .....*page 66*

Partie 3 : Etude des paramètres physiologiques et biomécaniques au cours du 1500 m ..... *page 69*

I. **Méthodologie** ..... *page 69*

A. Population étudiée ..... *page 69*

1. *Caractéristiques biométriques* ..... *page 69*
2. *Caractéristiques sportives* ..... *page 69*

B. Matériel et technique de mesures ..... *page 70*

1. *Enregistreur de gaz portable (K4 RQ)* ..... *page 70*
2. *Cardiofréquencemètre* ..... *page 71*
3. *Appareil de mesure de la lactatémie* ..... *page 71*
4. *Caméscope et magnétoscope* ..... *page 71*

C. Protocole expérimental ..... *page 72*

1. *L'épreuve de détermination de VO_2 max* ..... *page 72*
2. *L'épreuve du 1500 m* ..... *page 73*

a. Marquage au sol ..... *page 73*

b. Organisation et réglage des caméras ..... *page 74*

c. Procédure expérimentale ..... *page 72*

D. Variables mesurées ..... *page 74*

1. *Variables physiologiques* ..... *page 76*
2. *Variables bio-mécaniques* ..... *page 76*

a. L'amplitude (Ampl) ..... *page 76*

b. La vitesse (V) ..... *page 77*

c. La fréquence (Fréq) ..... *page 77*

E. Expression des résultats et variables calculées ..... *page 77*

1. *Expression des résultats* ..... *page 77*
2. *La constante de temps ($\mathscr{T}$* ..... *page 78*
3. *Le déficit en O_2* ..... *page 78*

F. Traitement statistique ..... *page 79*

II. Résultats .....*page 80*

A. Test triangulaire TUB2 .....*page 80*

1. Caractéristiques physiologiques des athlètes .....*page 80*

B. Le 1500 Mètres .....*page 81*

1. Performances réalisées et profil de course .....*page 81*

a. Observations concernant l'ensemble du groupe ..*page 81*

b. Comparaison des deux groupes de sujets .....*page 84*

2. Evolution des paramètres mécaniques et comparaison des deux groupes .....*page 87*

a. Evolution tour par tour pour l'ensemble des sujets.....
.....*page 87*

b. Evolution de l'amplitude et de la fréquence pour chacun des groupes de sujets .....*page 88*

c. Comparaison des deux groupes de sujets.....*page 88*

3. Evolution des paramètres physiologiques et comparaison des deux groupes .....*page 90*

a. Etude de la cinétique de VO_2 .....*page 90*

1) *Atteint-on VO_2max ?* .....*page 91*

2) *Quel est le délai d'atteinte de VO_2max? page 91*

3) *Evolution de VO_2 après l'atteinte du pic.....page 92*

c. Evolution de FC, VT, FR et VE au cours du 1500 m
.....*page 95*

1) Valeurs maximales .....*page 95*

2) Evolution des paramètres cardio-respiratoires avec la distance .....*page 94*

d. Contribution respective des métabolismes aérobie et anaérobies à la resynthèse de l'ATP.....*page 98*

Partie 4 : Discussion .....page 100

I. Analyse physiologique .....page 100

II. Analyse biomécanique .....page 110

III. Conséquences pour l'entraînement .....page 113

IV. Retour pour l'athlète et son entraîneur .....page 126

Conclusion .....page 127

Bibliographie .....page 130

Annexe : document remis aux entraîneurs et aux athlètes. .....page 144

Partie 1 : Revue de la littérature

Mots clefs : consommation d'oxygène, déficit en oxygène, lactatémie ou lactate sanguin, fréquence cardiaque, effort supra-maximal, coureurs de demi-fond experts, mesures directes, métabolisme ou production d'énergie aérobie/anaérobie.

Cette première partie se propose tout d'abord de faire une revue de la littérature relativement large des connaissances physiologiques actuelles sur les exercices supra-maximaux. La participation du système aérobie dans la performance sera appréhendée au travers du facteur VO_2max et des différentes phases de la cinétique de VO_2 au cours de ce type d'effort. Nous nous appuierons sur ces données pour faire ultérieurement l'analyse des 1500 m réalisés dans le cadre de notre étude. Différentes méthodes existent pour évaluer la contribution respective des métabolismes aérobie et anaérobies dans la resynthèse de l'ATP. Elles seront présentées et serviront de support pour calculer l'implication du système aérobie lors des épreuves de 1500 m. Par ailleurs, il nous est apparu réducteur d'étudier la performance uniquement au regard des connaissances dans le domaine physiologique et une seconde partie plus succincte sera consacrée à l'étude des paramètres mécaniques même si ces aspects ne constituent pas l'objet premier de ce mémoire de recherche. Ainsi, les évolutions notamment de la fréquence et de l'amplitude relevées par la suite lors de nos sessions expérimentales pourront être discutées. Enfin, en choisissant d'explorer la course de 1500 m, nous voulions observer un certain nombre de facteurs en lien avec la performance. La dernière partie s'intéressera aux connaissances qui existent sur la répartition des efforts et les stratégies utilisées lors d'exercices supra-maximaux conduits pour la performance. Et dans ce cadre, les épreuves tactiques ayant pour objectif la meilleure place possible ne seront pas développées.

I. Les exercices supra-maximaux

La course de 1500 m appartient au groupe « demi-fond » dans la classification des spécialités en athlétisme. D'un point de vue physiologique, cette épreuve est qualifiée d'effort supra-maximal car l'athlète développe une puissance supérieure à la puissance maximale aérobie (PMA). Les recherches de ces dernières décennies ont surtout porté sur les caractéristiques bioénergétiques des athlètes spécialisés en courses de demi-fond (DI-PRAMPERO, 1981 ; LACOUR et al. 1989).

Dans ce domaine, les principaux facteurs de performance en demi-fond se révèlent être les suivants

- **VO_2max** et **la puissance ou vitesse maximale aérobie associée**,
- **Le coût énergétique de la course** (C correspond au coût en oxygène de la course à une vitesse donnée),
- **L'endurance** définie comme la capacité à maintenir une puissance relative élevée de VO_2max ou de la vitesse maximale aérobie (VMA) pendant une période prolongée (PERONNET et THIBAULT, 1989).

De manière plus spécifique, l'endurance peut être influencée par la capacité anaérobie alactique (ou voie des phosphagènes) et lactique (ou glycolyse anaérobie). Le déficit en oxygène contracté au début d'un exercice permet d'apprécier la contribution des deux systèmes énergétiques précédents à la resynthèse de l'ATP.

Le chapitre développé ci-après, se propose de faire le point sur les données de la littérature concernant la relation qui lie VO_2max et la performance en demi-fond. Dans un second temps, l'adaptation des paramètres ventilatoires et circulatoires lors d'exercices supra-maximaux sera abordée.

A. Relation entre VO_2max et la performance

Comme dans toute activité sportive, différentes filières énergétiques (aérobie et anaérobie) sont mises à contribution lors de la course de demi-fond. Quelques travaux sur la part respective de ces différents métabolismes énergétiques ont été menés pour différentes épreuves de course à pied (LACOUR et al. 1989 ; DI PRAMPERO et al. 1993 ; HILL, 1999 ; SPENCER et GASTIN, 2001). Tous ont montré globalement que la resynthèse d'énergie provenait de manière prédominante du métabolisme aérobie.

La puissance maximale du métabolisme aérobie correspond au débit maximal de resynthèse de l'ATP. Cette puissance peut être estimée par la mesure de VO_2max (exprimée en $l.min^{-1}$ ou en $ml.min^{-1}.kg^{-1}$). Des valeurs brutes comprises entre 4,5 et 5 $l.min^{-1}$ ont été relevées pour des spécialistes de demi-fond (SPENCER et GASTIN, 2001). Mais pour le coureur, compte tenu des caractéristiques spécifiques de l'activité (déplacement par l'athlète de son poids de corps), le débit d'oxygène consommé s'exprime préférentiellement en valeur relative ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$).

Les valeurs moyennes de VO_2max mesurées pour des coureurs de demi-fond de haut niveau se situent entre 68 et 85 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ (Tableau 1).

Tableau 1: valeurs de VO_2 max recueillies pour des athlètes de demi-fond et de fond.

Auteurs	Population	Valeurs de VO_2max
BOILEAU, 1982	coureurs de demi-fond de Haut niveau	68 et 77 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$
BOILEAU, 1982	coureurs de fond de haut niveau	75 à 85 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$
SVEDENHAG et SJODIN, 1984	coureurs de 800 m	69 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$
LACOUR et al. 1990	coureurs de 800 m	69 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$
JOUSSELIN et LEGROS, 1990	coureurs de 1500 m de niveau national	75,5 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$
BILLAT et al. 1994	Coureurs de fond élite	71 ± 4,5 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$
BILLAT et al. 1995	Coureurs de fond de niveau national	75 ± 5,3 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$

Parmi quelques études portant sur des coureurs de 1500 m de niveau national, JOUSSELIN et LEGROS (1990) trouvent pour cette population d'athlètes, des VO_2 max de 75,5 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ et un seuil anaérobie (défini dans cette étude à 4 $mmol.l^{-1}$) à environ 92% de VO_2max.

L'existence d'une relation significative entre VO_2max et la performance en course à pied a pu être mise en évidence dés lors que l'étude porte sur des groupes de niveau de performances hétérogènes (COSTILL et al. 1973 ; FOSTER et al. 1978). Plus la distance augmente, meilleure est la relation qui lie les variables aérobie et les temps réalisés en demi-fond (BRANDON, 1995). En revanche, pour des athlètes de niveaux homogènes, VO_2max n'est pas un facteur discriminant de la performance (CONLEY et KRAHENBUHL, 1980 ; DANIELS, 1985 ; MORGAN et al. 1989 ; BRANDON, 1995 ; BILLAT et KORALSZTEIN, 1996). Plusieurs auteurs (LACOUR et al. 1990 ; DEASON et al. 1991 ; CRAIG et MORGAN, 1998) n'ont pas trouvé de relation entre la vitesse correspondant à la performance en demi-fond et VO_2 max pour des athlètes spécialistes qu'ils soient ou non de haut niveau. Plus spécifiquement sur 800 m, DEASON et al. (1991) montre qu'un haut niveau de VO_2max est requis pour réussir (> 60 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$) mais la faible corrélation entre VO_2 et les performances sur cette distance, suggère que VO_2max seul, n'est pas un bon prédicteur de la performance. En revanche, la combinaison de VO_2max et du coût énergétique (C) au travers du facteur « vitesse maximale aérobie » offre d'autres perspectives. VMA est définie par la relation suivante (LACOUR, 1990 ; PADILLA et al. 1992) :

$$VMA = (VO_2max - VO_2 \text{ repos}) / C$$

- VMA est exprimé en $m.s^{-1}$
- C correspond s'exprime en $ml.kg^{-1}.m^{-1}$
- VO_2max est exprimé en $ml.kg^{-1}.s^{-1}$
- VO_2 repos est égal à 0,083 $ml.kg^{-1}.s^{-1}$ (soit 5 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$) ; cette valeur de VO_2 correspond à l'intersection de la relation VO_2/v, établie par MEDBO et al. (1988) où v = vitesse de course.

Le coût énergétique (C) a été étudié en laboratoire. Par exemple, LACOUR et al. (1990) l'ont estimé à 0,181 $ml.kg^{-1}.m^{-1}$ pour courir un 1500 m chez des athlètes de niveau national sur tapis roulant (à 6,1 $m.s^{-1}$ = 22 $km.h^{-1}$). Si le coût énergétique dépend d'éléments extérieurs (le vent, la déclivité du terrain, le poids des chaussures, etc.), un certain nombre d'auteurs (DANIELS, 1985 ;

WILLIAMS et al. 1991) ont établi qu'il était également différent selon les individus. Des facteurs intrinsèques (longueur des segments, composition des fibres musculaires, etc.) l'influenceraient également, comme le résument HAUSSWIRTH et BRISSWALTER (1999) ou BRANDON (1995).

Pour un même individu, ce coût peut augmenter avec l'intensité de l'effort. Le coût énergétique pour courir un 400 m (en 46 s) est 30% plus important que le coût énergétique pour courir un 800 m (en 1 min 46 s). Il semble néanmoins que C ne s'améliore pas avec l'intensité de l'effort (MEDBO et al. 1988). En revanche, C peut diminuer par un entraînement approprié (MORGAN et al. 1989 ; BAILEY et PATE, 1991 ; WILLIAMS et al. 1991) ; d'où probablement, l'intérêt de le mesurer pour chaque individu à des périodes ciblées, plutôt que de fixer une valeur théorique commune et arbitraire. L'évaluation de VMA (qui prend en compte simultanément VO_2max et le coût énergétique) est devenue prioritaire pour les entraîneurs par rapport à l'évaluation de VO_2 max seule. En effet, plusieurs études montrent une relation significative entre la performance sur des distances supérieures au 800 m et la VMA des athlètes : pour 27 spécialistes de haut niveau, VMA se révèle un bon prédicteur de la performance pour les courses de 1500 m, 3000 m et 5000 m (LACOUR et al. 1990) ; la relation a été confirmée par PADILLA et al. (1992) pour des athlètes des deux sexes, et de haut niveau également ; et les conclusions sont identiques pour ABE et al. (1997) pour un groupe composé de 29 coureurs de niveau moindre (moyenne sur 1500 m = 4 min 10 s).

B. Adaptation des paramètres ventilatoires et circulatoires aux cours des exercices supra-maximaux

La source immédiate d'énergie pour la contraction musculaire est l'ATP. Cependant la quantité d'ATP stockée dans les cellules musculaires est très limitée et ne durerait que quelques contractions pour un exercice maximal. C'est pourquoi, si l'exercice se prolonge, l'ATP doit être régénéré au même rythme qu'il est utilisé.

La resynthèse de l'ATP se fait grâce :

- aux phosphorylations oxydatives dont la consommation d'oxygène est le reflet (processus aérobie).
- à la glycolyse anaérobie (processus anaérobie lactique).
- à la dégradation des phosphagènes et principalement la créatine phosphate (processus anaérobie alactique).

Pour des exercices maximaux de courte durée, les processus aérobie et anaérobies sont tous deux fortement sollicités. Pour mesurer la quantité d'ATP resynthétisée au cours de l'effort par la filière anaérobie, seule des estimations ont été faites au cours d'épreuves compétitives ; des mesures invasives (techniques de biopsies musculaires) sur le muscle existent mais sont impossibles à mettre en oeuvre en situation de compétition. En revanche, la mesure de la consommation d'oxygène semble un indicateur précis et reconnu pour estimer le débit d'ATP resynthétisés par le processus aérobie (1 litre d'oxygène correspond à 290 mmol d'ATP si le substrat oxydé est le glycogène selon HERMANSEN et MEDBO (1984)).

Quelles sont les différentes phases qui caractérisent l'évolution temporelle de VO_2 (appelée communément cinétique de VO_2) au cours de l'effort ?

1. Evolution de la consommation d'oxygène (VO_2) selon l'intensité de l'exercice.

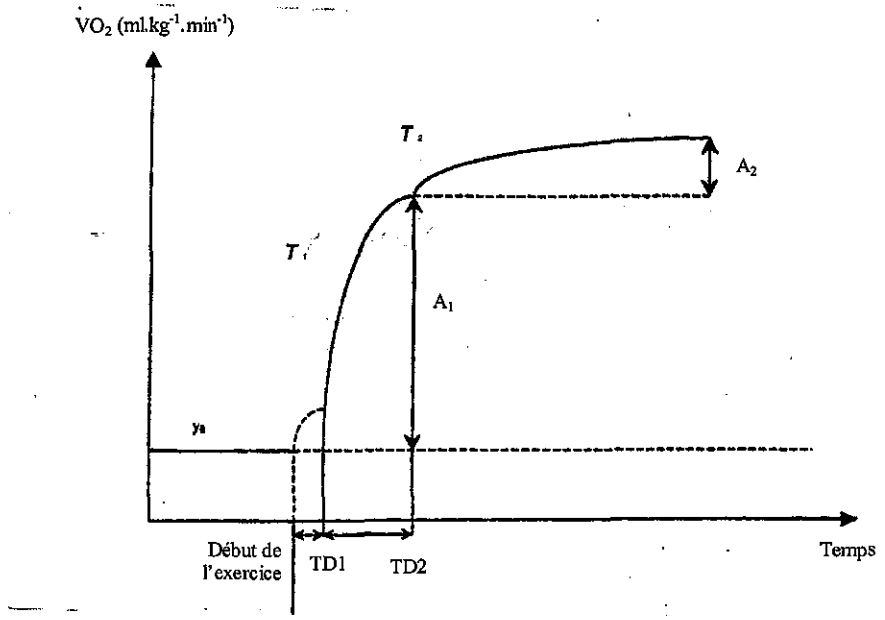
La cinétique de VO_2 est influencée par des adaptations centrales (systèmes respiratoires et cardio-vasculaires, liés au transport de l'oxygène) et périphériques (prélèvement et utilisation de l'oxygène au niveau musculaire).

a. Description de la phase d'inertie :

Plusieurs auteurs (WHIPP et al. 1982 ; HUGHSON et al. 2000) ont montré qu'il existait un délai (TD_1) à l'issue duquel une augmentation exponentielle de VO_2 est observée, tout comme l'évolution de la consommation d'oxygène au niveau du muscle actif. En d'autres termes, c'est après TD1 que la mesure de VO_2 dans les gaz expirés reflète indirectement VO_2 au niveau musculaire. En début d'exercice, il existe un délai d'ajustement (TD2) de la consommation d'oxygène aux besoins de l'exercice. La valeur du déficit d'oxygène initial dépend de la cinétique de VO_2 au cours de cette phase (BILLAT, 2002).

Ainsi au cours d'exercices sous-maximaux d'intensité constante, la modélisation mathématique des cinétiques de VO_2 permet d'identifier plusieurs phases distinctes. Lorsque l'intensité est supérieure au seuil anaérobie, la modélisation met en évidence une 3ème phase dont les caractéristiques diffèrent en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice (BARSTOW, 1994). La figure 1 ci-dessous illustre les trois fonctions mono-exponentielles qui caractérisent la phase d'inertie (MARGARIA et al. 1965).

Figure 1 : illustration de la cinétique de VO_2 en début d'exercice pour un effort sous-maximal intense (SLAWINSKI et al. 2001).



Cette figure représente la cinétique de la consommation d'oxygène où VO_2 ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$) est la consommation d'oxygène de base ; A_1, A_2 ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$) représentent les incréments asymptotiques relatifs à la composante rapide et la composante lente de la consommation d'oxygène, $\mathscr{T}_1$ et $\mathscr{T}_2$ (s) les constantes de temps de ces mêmes composantes.

- **La première phase** (phase 1), communément appelée « composante initiale », définit un accroissement rapide de VO_2 observable sur une période de 15-25 secondes qui suit le début d'exercice (WHIPP, 1987). Durant cette période, la cinétique de VO_2 est décrite comme une composante exponentielle dont l'incrément asymptotique observé chez des sujets sains est d'environ 500 $ml.min^{-1}$ (BARSTOW et al. 1996). L'évolution de VO_2 au cours de cette phase 1, largement dépendante de l'augmentation rapide du débit cardiaque ainsi que de la capacité du système cardiovasculaire à accroître de manière abrupte le débit sanguin pulmonaire, est également appelée « phase cardiodynamique » (WHIPP et al. 1982). La durée de cette phase dépend du temps de transit du sang veineux désaturé en oxygène au niveau des muscles actifs pour atteindre l'étage pulmonaire (BARSTOW et al. 1990; WHIPP et WARD, 1990). Cette phase ne reflète donc pas ce qui se passe au niveau du muscle.

- **La phase 2** de la cinétique de VO_2 est définie dans la littérature comme « la composante rapide » (XU et RODHES, 1999). Elle correspond à l'élévation exponentielle de VO_2 et apparaît après un temps de délai qui correspond à la durée de la composante initiale (TD_1). Les valeurs de constante de temps (τ_1) qui caractérisent cette phase au cours de l'exercice sont généralement comprises entre 25 et 35 secondes (THOMAS et al. 2001 ; BILLAT, 2002 ; LEVEQUE, 2002). Les caractéristiques de cette phase semblent identiques malgré l'augmentation de l'intensité. La constante de temps de la composante rapide ne semble pas affectée par l'intensité de l'exercice (BARSTOW et MOLE, 1991) et resterait invariable pour des exercices exhaustifs de 30 à 120 s selon les travaux de MARGARIA et al. (1965). Mais des études plus récentes (HUGHSON et al. 2000) ont montré que ce n'était plus le cas et que la constante de temps pouvait varier avec l'intensité de l'exercice. La comparaison de résultats issus d'études sur le muscle isolé (PIIPER et al. 1968 ; MEYER, 1988) avec ceux obtenus à l'exercice (BARSTOW, 1994) confirme la similitude entre la constante de temps propre à l'évolution de la consommation d'oxygène au niveau musculaire

et τ. Si tous les auteurs s'accordent à penser que cette phase est révélatrice de la consommation d'O_2 par les tissus (WHIPP, 1987 ; BARSTOW et MOLE, 1987 ; BARSTOW et al. 1993), les avis divergent quant à l'influence des ajustements cardio-vasculaires (caractérisant l'apport en O_2 aux tissus actifs) sur la constante de temps.

- Les caractéristiques de la **phase 3** de la cinétique de VO_2 diffèrent selon l'intensité de l'exercice (WHIPP, 1987 ; BARSTOW et al. 1993 ; GAESSER et POOLE, 1996) :
    - Lorsque l'exercice est effectué à une intensité constante, inférieure au seuil anaérobie, la cinétique de VO_2 est caractérisée par une évolution exponentielle de VO_2 atteignant un état stable aux environs de la 3ème minute d'exercice (WHIPP et WASSERMAN, 1970). Dans ces conditions d'exercice, l'état stable de VO_2 caractérise la phase 3 de la cinétique de VO_2.
    - Lorsque l'intensité est supérieure au seuil anaérobie, la cinétique de VO_2 est plus complexe. La phase 3 se caractérise par une élévation de VO_2 appelée composante lente de VO_2 par opposition à la phase rapide d'augmentation du début de l'exercice. Son existence a été mise en évidence pour plusieurs activités cycliques de locomotion telles que le cyclisme, la course à pied, le pédalage à bras, le kayak ou la natation (LEVEQUE, 2002). L'amplitude de cette composante additionnelle augmente avec l'intensité d'exercice et peut soit amener à l'obtention d'un état stable retardé, soit augmenter inexorablement jusqu'à l'obtention de VO_2max.
    - *En revanche, pour des efforts plus courts et plus intenses, la cinétique de l'augmentation de VO_2 jusqu'au pic de VO_2 est mieux décrite par une seule fonction mono-exponentielle correspondant à la phase 2* avec *pour asymptote VO_2max (THOMAS et al. 2001). La fonction mathématique qui décrit alors la cinétique de VO_2 est la suivante (BARSTOW et MOLE, 1991) :*

$$VO_2(t) = VO_{2base} + A \times (1 - e^{-t/\tau})$$

Où

- $VO_2(t)$ représente la consommation d'O_2 à un temps t
- t : le temps de course
- $VO_{2\,base}$: VO_2 dans la position avant l'effort
- A : l'incrément asymptotique
- τ : la constante de temps

La constante de temps d'ajustement de la consommation d'oxygène (τ) est un indicateur utilisé par certains auteurs pour caractériser la cinétique de VO_2 en début d'exercice et par conséquent le déficit initial en oxygène que nous aborderons plus loin (CASABURI et al. 1989 ; DI-PRAMPERO et al. 1970 ; WHIPP et WASSERMAN, 1970). τ est le temps qu'il faut pour atteindre 63% de l'amplitude d'élévation de VO_2, en début d'exercice.

D'autres indicateurs comme le temps de ½ adaptation (T½) sont trouvés dans la littérature (DIAMOND et al. 1977). T½ correspond au temps nécessaire pour atteindre 50% du plateau de VO_2 obtenu au cours de l'exercice, avec T½ = 0,693 τ, ce qui permet la comparaison entre les différentes études.

Le pourcentage de VO_2 pic atteint dans les 30 premières secondes est également calculé (cf. tableau 2) par certains chercheurs (SPENCER et al. 1996 ; GASTIN, 1998). Cette donnée relevée à un moment ciblé, reste néanmoins moins précise que τ qui illustre l'évolution de VO_2 au début de l'effort.

Tableau 2 : Pourcentage du pic de VO_2 atteint lors des 30 premières secondes d'efforts supra-maximaux.

	Epreuves	400 m	800 m	1500 m
SPENCER et al. (1996)	% VO_2 pic	94%	69%	59%
	Epreuves	400 m	Demi-fond	
GASTIN (1998)	% VO_2 pic	90%	70 à 80%	

Plusieurs facteurs peuvent influencer le temps d'ajustement de la consommation d'oxygène lors d'exercices sous-maximaux :

- La présence ou non d'échauffement,

- Le type d'échauffement : un échauffement de type 30 s / 30 s permet de diminuer le délai d'atteinte du pic de VO_2 en comparaison d'un échauffement mené à 50% de VO_2max (BILLAT et al. 2000),
- Un entraînement en endurance ferait diminuer la valeur de $\mathscr{T}$(BILLAT et al. 2000 ; BARSTOW, 1994). Les athlètes entraînés en endurance sollicitent plus rapidement et de façon importante le métabolisme aérobie. Ils atteignent un pic de VO_2 dans la première minute d'effort : 20-30 s pour Di-PRAMPERO (1999), 45 s pour THOMAS et al. (2001).
- Le niveau de pratique : l'étude de l'évolution de la consommation d'oxygène au début et pendant un effort permettrait de caractériser une population de haut niveau (HEUGAS et al. 1995).
- Inversement, le repos, le désentraînement, ou les conditions d'hypoxie réduisent le contenu en oxygène du sang et ralentissent la cinétique de VO_2 : $\mathscr{T}$augmente (BARSTOW, 1994).

Au plan théorique, certains auteurs expliquent ces variations plutôt au niveau des facteurs périphériques (BARSTOW, 1994) :

- Le potentiel oxydatif du muscle actif directement lié à la densité mitochondriale des fibres et aux enzymes oxydatives.
- Les fibres musculaires qui composent le muscle ont une influence : les fibres de type I possèdent un potentiel oxydatif plus important qui permet de réduire le déficit d'oxygène initial.

D'autres chercheurs (HUGHSON et al. 2000 ; PERREY et al. 2001) ont plutôt expliqués les variations du temps d'ajustement de la cinétique de VO_2 par le système d'approvisionnement et de diffusion en oxygène. Ces auteurs font l'hypothèse que les capacités de transport de l'oxygène limiteraient majoritairement l'adaptation de l'organisme dans les premiers temps de l'effort : l'oxygène est un modulateur de la cinétique de VO_2. Des situations d'exercices permettant d'apporter artificiellement plus d'oxygène aux muscles actifs (ischémie et chémoréflexe, différentes positions d'exercice, hyperoxie) ont montré l'influence de l'augmentation du volume sanguin et plasmatique, de la pression sanguine au niveau des muscles actifs, sur la constante de temps

(PERREY et al. 2001). Mais, la majeure partie des études dont sont issues ces données sur la cinétique de VO_2 ont été réalisées pour des vitesses inférieures à VMA. Peu d'explorations existent dans des situations sportives de terrain, ni pour des efforts qui se déroulent à des vitesses supra-maximales (débit d'énergie requis supérieur à VO_2max).

La capacité de l'athlète à atteindre rapidement VO_2max permettrait-elle d'épargner la filière anaérobie lactique ? En ce sens, la constante de temps est-elle un facteur de performance pour les courses de demi-fond court (800 m, 1500 m) comme semble l'indiquer BILLAT en 2002 ?

De nouvelles recherches sur la cinétique de VO_2 au début de ce type d'effort pourront peut-être confirmer ces hypothèses.

b. Atteinte ou non de VO_2max

A l'issue de cette phase d'ajustement de la consommation d'oxygène jusqu'au pic de VO_2, l'athlète exploite-t-il ensuite pleinement son potentiel aérobie ? En d'autre terme, le pic de VO_2 atteint est-il égal ou non à VO_2max, c'est ce que nous allons étudier ci-après.

Pour des exercices supra-maximaux de courte durée, la majorité des études ont été effectuées en laboratoire où la consommation d'oxygène a été mesurée. Des sujets spécialistes de sprint et d'endurance ont été testés soit sur bicyclette (GRANIER et al. 1995), soit sur tapis roulant (NUMMELA et RUSKO, 1995 ; SPENCER et al. 1996, 2001). Pour des durées d'effort comprises entre 30 et 90 s, les valeurs du % de VO_2max obtenues par les athlètes sont pour certains auteurs très proches de VO_2max, alors que pour d'autres, seulement 79% de VO_2max est atteint (cf. tableau 3).

Tableau 3: pourcentage de VO_2max atteint au cours d'un exercice maximal de courte durée.

Auteurs	Sujets	Ergomètre	Intensité et Type d'effort	Durée de l'effort	% VO_2 max
GRANIER et al. 1995	spécialistes d'endurance	ergocycle	all-out	30 s	**99%**
SPENCER et GASTIN, 1996	spécialistes de sprint et de demi-fond.	tapis roulant	vitesse constante : 170±12% de vVO_2max	400 m	**98%**
SPENCER et GASTIN, 2001	athlètes très entraînés spécialistes de 400 m	tapis roulant	2 modalités : • vitesse constante • départ plus lent que vitesse moyenne pour finir 400 m vite 151±4% de vVO_2max	400 m	**89%**
GRANIER et al. 1995	spécialistes de sprint	ergocycle	all-out	30 s	**87%**
NUMMELA et RUSKO, 1995	sprinters et coureurs d'endurance	tapis roulant	vitesse constante	49 s	**79%**

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer les différences obtenues : probablement le niveau d'expertise et la spécialisation des sujets, l'intensité requise au cours de l'exercice, et le temps d'effort qui reste très bref pour permettre les adaptations. Ces exercices d'une durée inférieure à 1 min, font appel de façon prédominante au système anaérobie lactique.

Pour des exercices supra-maximaux d'une durée supérieure à 1 min 30 s, les études menées en laboratoire sur bicyclette ergométrique ou sur tapis roulant ne mettent pas en évidence l'atteinte de VO_2max pour des durées inférieures à 4 minutes (cf. tableau 4). Les protocoles sont certes, réalisés à intensité supra-maximale, mais pour la plupart à des vitesses constantes. Nous pouvons néanmoins relever des résultats similaires pour quelques études où des variations de vitesse existaient : sur bicyclette ergométrique, les sujets de YAMAMOTO et KANEHISA (1995) ont utilisé un départ « all-out » sans atteindre VO_2max. Sur tapis roulant, à notre connaissance, seule l'étude de SPENCER et GASTIN (2001) a envisagé des variations de vitesses. Les valeurs de VO_2 obtenues étaient élevées (80 à 96 % VO_2max), mais restaient en deça de 100% de VO_2max.

Tableau 4: pourcentage de VO_2max atteint au cours d'exercices supra-maximaux, de plus en plus longs.

Auteurs	Sujets	Ergomètre	Intensité de l'effort	Distance et/ou Durée	% VO_2max
HEUGAS et al. 1995	spécialistes de 400 m	tapis roulant	Vitesse constante 130% de leur VMA,	98 ± 16 s →	**91 %**
SPENCER et GASTIN, 2001	Athlètes très entraînés spécialistes de 800 m	tapis roulant	Vitesse constante et départ plus lent que vit moy pour finir 400 m vite 113 % vVO_2max	1 min 53 ± 2 s →	**88 %**
SPENCER et al. 1996	Spécialistes de sprint et de demi-fond	tapis roulant	Vitesse constante 112 % vVO_2max	800 m en 1min 58 ± 2 s →	**90 %**
YAMAMOTO et KANEHISA, 1995	8 sujets masculins	bicyclette ergométrique	Epreuve « all-out »	2 min	**Plateau entre 80-90 %**
DRAPER, 1999	6 sujets en bonne condition physique	tapis roulant	Vitesse constante qui permet d'atteindre l'épuisement en 2 min	2 min →	**93 %**
MEDBO et TABATA, 1989	Etudiants en EPS	bicyclette ergométrique	Puissance constante 119% de vVO_2max	jusqu'à l'épuisement atteint entre 2 et 3 min	**Plateau entre 80-90 %**
GREEN et al. 1996	Cyclistes confirmés	bicyclette ergométrique	112% de vVO_2max	173 ± 24 s	**96 %**
SPENCER et al. 1996	Spécialistes de sprint et de demi-fond	tapis roulant	Vitesse constante 102 % de vVO2max	1500 m : 4 min 2 s ± 3 s →	**94 %**
SPENCER et GASTIN, 2001	Athlètes très entraînés	tapis roulant	Vitesse constante et départ plus lent que vitesse moyenne pour finir 400 m vite 103 ± 6 s	1500 m 3 min 55 s ± 3 s →	**94 %**
DRAPER (1999)	6 sujets en bonne condition physique	tapis roulant	Vitesse constante qui permet d'atteindre l'épuisement en 5 min	5 min →	**100 %**

Pour des durées d'exercice proches de 2 min, les résultats fluctuent selon les études entre 88% et 93% de VO_2max. Pour des durées proches de 4 minutes, la fourchette est moins large : entre 94 et 96%.

Une étude comparative menée par SPENCER et al. (1996), mérite d'être présentée. Les auteurs ont étudié des athlètes sur tapis roulant en simulant le temps et l'intensité requis pour réaliser un 400, un 800 et un 1500 m. Dans les 3 cas, VO_2max n'était pas atteint même si un pic de VO_2 élevé (97% VO_2max)

était obtenu pour la course de 400 m. La durée des exercices était peut-être insuffisante pour atteindre 100% de VO_2max pour un exercice à allure constante (SPENCER et GASTIN, 2001).
Par ailleurs, la vitesse ou les variations de vitesse étant imposée sur le tapis roulant, nous pouvons raisonnablement envisager qu'une forme de course plus libre, peut dans une certaine mesure, influencer la valeur du pic de VO_2 obtenue.

Enfin, il existe quelques études menées sur le terrain avec des systèmes portables de mesure des échanges gazeux (cf. tableau 5) : l'intérêt de ce type d'étude se situe dans la possibilité de mise en place de protocoles relativement proches de la réalité des épreuves en compétition. En effet, les sujets peuvent gérer plus librement leur allure selon les exigences définies par la compétition elle-même.

Tableau 5 : pourcentage de VO_2max atteint pour des exercices supra-maximaux effectués sur le terrain, avec un appareil d'enregistrement télémétrique des échanges gazeux et des paramètres ventilatoires.

Auteurs	Sujets	Spécialité	Durée de l'effort	Intensité	% VO_2max
ZAMPARO et al. 1999	8 athlètes spécialistes de kayak	kayak	136 ± 11 s 290 ± 22 s	119 % VO_2 pic 102%	**100 %**
THOMAS et al. 2001	5 coureurs spécialiste de 800 m	Course	121 ± 3 s	Maxi sur la distance	**100 %**
BILLAT et al. 2000	7 étudiants en EPS	Course	5 min 47s ± 1 min 50 s	100% de vVO_2max	**100 %**
BILLAT et al. 2000	7 étudiants en EPS	Course	2 min 11 ± 38 s	120% de vVO_2max	6 sujets sur 7 atteignent VO_2max,
BILLAT et al. 2000	7 étudiants en EPS	Course	1 min 12 ± 18 s	140% de vVO_2max	3 sujets sur 7 atteignent VO_2max.

Ce tableau montre l'atteinte de VO_2max dans un contexte de terrain, ce qui n'était pas le cas dans les deux études menées par SPENCER et al. (1996, 2001) sur tapis roulant pour des durées équivalentes. THOMAS et al. (2001), attribuent ces résultats à une dépense énergétique plus élevée au début de

l'effort, lors d'épreuves de terrain où le départ est très rapide. Ce dernier contribuerait à accélérer la cinétique d'adaptation de VO_2.

L'étude de la bibliographie témoigne du peu de données issues d'épreuves menées sur le terrain et de la diversité des protocoles de laboratoire. Certaines études sont réalisées à puissance supra-maximale constante (MEDBO et TABATA, 1989 ; SPENCER et al. 1996 ; DRAPER, 1999 ; BILLAT et al. 2000), d'autres permettent un départ plus lent pour finir plus vite (SPENCER et GASTIN, 2001), alors que certaines sont de type « all-out » (GASTIN et LAWSON, 1994 ; GASTIN et al. 1995 ; GRANIER et al. 1995). A priori, dans une épreuve « all-out », l'augmentation de VO_2 est supposée être rapide et donc, l'atteinte de VO_2max plus précoce. ASTRAND et SALTIN (1961) évoquaient déjà l'idée que « plus l'intensité requise au départ est importante, plus VO_2 atteint rapidement une valeur proche ou égale à VO_2 max ».

Plus spécifiquement, l'observation du déroulement des courses de demi-fond en compétition ne montrent pas de stratégie « all-out » maintenue tout au long de l'épreuve. En effet, celle-ci aurait des répercussions néfastes pour l'athlète dans la seconde partie de course (baisse des réserves énergétiques, fatigue neuro-musculaire, acidose, etc.). Une vitesse constante du début à la fin ne reflète pas non plus la réalité. Les courses sont plus rapides au début pour se placer dans le groupe (GAJER et al. 2000). Selon la distance, nous verrons dans un des chapitres suivants qu'il existe des stratégies de course qui prédisposent à des demandes énergétiques. La compétition en demi-fond représente une situation intermédiaire entre l'épreuve à vitesse constante et celle de type « all-out » où la répartition de l'intensité de l'effort au cours de l'exercice peut influencer la cinétique de VO_2 (THOMAS et al. 2001). Sur la base des précédents travaux, il semblerait qu'un départ relativement rapide permette aux athlètes d'atteindre des valeurs proches de VO_2max. Un certain niveau d'expertise acquis dans ce type d'effort permettrait également d'utiliser de façon plus importante les processus aérobies. Reste à savoir si avec l'apparition de la fatigue, le pic atteint (proche ou égal à VO_2max) se maintient ou tend à chuter ?

c. Chute ou non de VO_2

L'atteinte d'un pic de VO_2 proche ou égal à VO_2max semble refléter l'implication des processus aérobie lors d'épreuves supra-maximales. Mais l'intervention du système anaérobie avec ses conséquences (acidose et baisse du pH au niveau musculaire et sanguin), a-t-il une incidence sur la capacité de l'athlète à maintenir un haut niveau de VO_2 tout au long de l'épreuve ?

Lors des efforts sous-maximaux :

PERREY et al. (2002) ont mis en évidence pour un exercice à 95% de VMA, conduit jusqu'à épuisement, une 4ème phase dans la cinétique de VO_2. Elle apparaît chez plus de 50% des athlètes et se caractérise par une chute significative de VO_2 juste avant l'épuisement.

Lors des efforts supra-maximaux :

Plusieurs études (cf. tableau 6) ont mis en évidence une chute de VO_2 en fin d'exercice, que ce soit sur tapis roulant à vitesse constante (NUMMELA et RUSKO, 1995 ; SPENCER et al. 1996) ou sur le terrain avec une stratégie plus proche de celle utilisée par les athlètes en compétition (THOMAS et al. 2001). De même, pour un effort intense d'une durée moyenne de 49,5 s, NUMMELA et RUSKO (1995) ont montré chez 13 sujets sur 14 une diminution de VO_2, dans la seconde moitié de course.

Tableau 6 : chute de VO_2 constatée en fin d'effort.

Auteur	Epreuve	Baisse de VO_2	Quand ?
THOMAS et al. 2001	120,8 ± 3,4 s (800 m)	100 à 79,4%	à partir de 78 ± 14 s d'effort
SPENCER et al. 1996 (*)	242 ± 3 s (1500 m)	94 à 91%	Plateau à partir de 60 s
NUMMELA et RUSKO, 1995	49,5 ± 6 s (groupe de sprinters)	79 à 43-47%	Entre la 1ère et la seconde moitié de la course.
NUMMELA et RUSKO, 1995	49,4 ± 5,3 s (groupe de coureurs d'endurance)	79 à 54-63%	Entre la 1ère et la seconde moitié de la course.

(*) il n'est pas précisé si la baisse constatée est significative.

Pour THOMAS et al. (2001), cette diminution de VO_2 est indépendante de la valeur atteinte. Les athlètes entraînés aux efforts de sprint montrent une baisse plus marquée par rapport aux spécialistes d'endurance (NUMMELA et RUSKO, 1995). SPENCER et al. (1996) ont étudié le comportement des athlètes sur plusieurs distances. Après un pic de VO_2 obtenu dans la première minute d'effort, un plateau est observé à 89% de VO_2max lors du 800 m et à 91% de VO_2max lors du 1500 m. Les auteurs ne discutent pas une éventuelle chute de VO_2 ; pourtant nous pouvons observer sur 1500 m, des valeurs pic qui se situent à 94 % VO_2max et des valeurs observées en fin d'effort à seulement 91% VO_2max.

Sur le terrain, il n'existe pas encore assez de données pour confirmer dans le cas d'exercices supra-maximaux, l'apparition de façon systématique, d'une chute de VO_2 en fin d'exercice, lorsque celui-ci est mené en vue d'une performance chronométrique. L'analyse du profil de course (cinétique de la vitesse) et notamment de ce qui se passe au cours et en fin de course (accélération, maintien ou décélération) constituerait peut-être un élément complémentaire de discussion sur la contribution respective des deux systèmes de fourniture d'énergie et son incidence sur la performance.

Pour conclure, si la cinétique de VO_2 pour l'exercice à dominante aérobie permet d'estimer de façon relativement précise la part relative des deux systèmes (aérobie et anaérobie), elle reste néanmoins insuffisante, lors d'efforts intenses (Di PRAMPERO et al. 1999). Or, les courses de 800 m et 1500 m en demi-fond sont caractérisées par des vitesses de déplacement supérieures à la VMA. La contribution anaérobie (qui suppose l'hydrolyse des phosphagènes ainsi qu'une activité glycolytique avec formation de lactate) devient alors prédominante.

Pour estimer la part relative du métabolisme anaérobie, un certain nombre d'indicateurs ont été retenus par les chercheurs comme les mesures de la lactatémie et le calcul du déficit d'oxygène principalement. Nous présenterons ces différentes méthodes dans la partie suivante.

2. Lactatémie, déficit en Oxygène, dette d'O_2

L'évaluation quantitative de la production d'énergie par la glycolyse anaérobie au cours d'un travail supra-maximal est impossible à faire de façon directe chez l'être humain, in situ.

Pour essayer d'estimer la quantité d'énergie d'origine anaérobie, un certain nombre d'auteurs se sont intéressés à ce qui se passait au cours ou à l'issue de l'exercice.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer la capacité anaérobie en course :

Certaines sont basées sur :

- Le dosage des lactates post-exercice (LACOUR et al. 1990),
- Le calcul du déficit en oxygène (MEDBO et al. 1988),
- Les mesures post-exercice de la dette d'O_2.

a. La lactatémie

La lactatémie sanguine correspond à la concentration de lactate dans le sang [La^-]. La mesure de la concentration sanguine de lactate [La^-] ne reflète pas nécessairement la production musculaire de lactate, car l'acide lactique produit peut être éliminé dans le muscle. Il est également diffusé dans le sang pour être soit réutilisé comme substrat énergétique, soit éliminé ou pris en charge par des systèmes tampons. Néanmoins KATZ et SAHLIN (1988) ont montré que, dans le cas d'exercices brefs et intenses, la concentration d'acide lactique dans le sang était proportionnelle à l'intensité de l'effort et à la concentration d'acide lactique dans le muscle et donc, pouvait rendre compte de la production réelle d'acide lactique. Cette production dépend de deux facteurs :

- la diffusion du lactate des muscles où il a été produit, vers les autres compartiments corporels.
- la métabolisation du lactate.

« Quelles que soient les critiques émises, il semble que dans tous les cas, l'énergie correspondant au lactate accumulé remplace avec une bonne approximation celle de l'O_2 manquant » (RIEU, 1988). La lactatémie reste l'indicateur le plus souvent utilisé pour juger de l'implication des processus

anaérobies au cours de l'exercice. La concentration d'acide lactique est en effet étroitement lié à la vitesse de course soutenue pendant l'effort (SCHNABEL et KINDERMANN, 1983).

La contribution de la filière anaérobie pourrait donc être estimée à partir des valeurs de lactate sanguin, mais des divergences apparaissent entre les auteurs sur l'équivalent énergétique du lactate. Ces écarts peuvent entraîner des résultats difficiles à comparer. Une augmentation de la lactatémie de 1 $mmol.l^{-1}$ correspond à une production d'énergie équivalente à l'utilisation de 3 à 3,3 ml d'$O_2.kg^{-1}$.

- 3 ml d'$O_2.kg^{-1}$ pour DI-PRAMPERO (1981)
- 3,3 ml d'$O_2.kg^{-1}$ pour LACOUR et al. (1990) selon les données de MARGARIA et al. (1971).

Lorsqu'un athlète effectue un effort dont la puissance est supérieure à VO_2max, l'accumulation de lactate dans le sang continue après la période initiale, ce qui indique que la contribution anaérobie lactique à la resynthèse de l'énergie persiste (RIEU, 1988). MEDBO et al. (1988) ont observé que le lactate sanguin post-exercice augmentait avec l'exercice pour des durées inférieures ou égales à 2 minutes. Quel que soit le type d'exercice, [La$^-$] post-effort augmente progressivement pour atteindre une valeur maximale entre 1 et 8 min après l'arrêt de l'exercice. Plus précisément à l'issue d'efforts supra-maximaux, le lactate sanguin augmente jusqu'à un pic qui est atteint entre la **5ème et la 8ème minute** de récupération, puis décroît de façon exponentielle (Di-PRAMPERO, 1991). Ce délai est constant quelle que soit la valeur du pic, de même que la cinétique de décroissance indépendante de cette valeur (Di-PRAMPERO, 1991). Plusieurs études ont relevé des valeurs de lactatémies post-effort à l'issue d'exercices supra-maximaux effectués en laboratoire ou sur le terrain (cf. tableau 7).

Tableau 7: valeurs de lactatémie pour différents exercices supra-maximaux

Auteurs	Type d'athlètes	Nombre d'athlètes	Durée Effort Intensité max	Taux Lactate $mmol.l^{-1}$
NUMMELA et al. 1991	Sprinters	6	300 m 400 m	11,3 15,4
HERMANSEN et al. 1984	athlètes entraînés en endurance	6	60 s sur tapis roulant (10,5%) Intensité =138% de vVO_2max	12,6 ± 0,4
NUMMELA et RUSKO, 1995	Demi-fond	6	49,5 s	13,8 ± 2,1
NUMMELA et RUSKO, 1995	Sprinters	8	49,5 s	16,6 ± 2,6
HERMANSEN et al. 1984	athlètes entraînés en sprint	6	60 s sur tapis roulant (10,5%) Intensité =171% de vVO_2max	17 ± 1,2
MEDBO et al. 1988	Sujets actifs	11	2 min 4 min	16,6 ± 1,9 17,2 ± 2,5
HIRVONEN et al. 1992	400 m	6	Compétition	17,3 ± 0,9
THOMAS et al. 2001	Spécialistes de 800 m	5	120,8 ± 3,4 s	17,5 ± 1,3
LACOUR et al. 1990	400 m	4	Compétition	20,1 ± 2,2
LACOUR et al. 1990	800 m	5	Compétition	21,9 ± 2,1
LACOUR et al. 1990	**1500 m**	**2**	**Compétition**	20,8 ± 2,7
Mc KENZIE et al. 1982	coureurs de 800 m de haut niveau	6		22
KINDERMAN et KEUL, 1977	400 m en 45,5 s			24,9

En gras, figure les valeurs relevées sur 1500 m. Par la suite, tout ce qui se rapporte au 1500 m dans les tableaux sera identifié de cette façon.

Les taux les plus élevés semblent être relevés en situation de compétition et pour les épreuves de 400 m et 800 m. LACOUR et al. (1990) ont trouvé des corrélations significatives entre les taux de lactates sanguins obtenus après des courses de 400 m et 800 m et la vitesse spécifique sur ces distances. En revanche, aucune relation n'a été trouvée avec la vitesse au-delà du 1500 m.
En définitive, l'énergie produite après la période d'adaptation par le coureur pour se déplacer provient des contributions aérobie et anaérobie.

Di-PRAMPERO et al. (1999) ont proposé le modèle mathématique suivant :

$$dE/dt = (dVO_2/dt)_{max} + \beta(d[La]_b/dt)$$

où :

- dE/dt correspond à la puissance métabolique totale (en ml $O_2.min^{-1}.kg^{-1}$)
- $(dVO_2/dt)_{max}$ est la puissance maximale aérobie
- β est l'équivalent énergétique du lactate sanguin (en ml $O_2.min^{-1}.mmol^{-1}$)
- et $d[La]_b/dt$: le débit d'accumulation du lactate dans le sang ($mmol.min^{-1}$)

Ainsi, le coût énergétique de la course pourrait être estimé en divisant la dépense énergétique totale de la course par la distance de course (Di-PRAMPERO et al. 1993).

le coût énergétique de la course sur piste par unité de distance
=
(Valeur énergétique du delta Lactate /distance totale couverte)
+ coût énergétique aérobie.

Où delta Lactate est la différence entre le pic de lactate obtenu pendant la récupération et la valeur avant l'exercice.

Selon HILL (1999), la part aérobie du coût énergétique en course correspond à la somme de VO_2 mesurée au cours de l'exercice et de l'utilisation des stocks d'oxygène du muscle (2,3 $ml.kg^{-1}$ de poids de corps). Pour évaluer la part anaérobie, il est nécessaire de considérer la valeur énergétique du lactate (selon Di-PRAMPERO, 1981) auquel s'ajoutent les stocks de PC, soit 37 ml $O_2.kg^{-1}$ de masse sèche du muscle.

Cette méthode reste cependant approximative, car elle se base sur plusieurs suppositions, notamment:

- l'équivalent énergétique d'une mole de lactate, que nous avons vu fluctuante d'un auteur à l'autre,
- l'estimation de la contribution du métabolisme aérobie à partir d'un modèle mono-exponentiel de la cinétique de VO_2 présenté par PERONNET et THIEBAUT (1989). Ce modèle suppose que la courbe

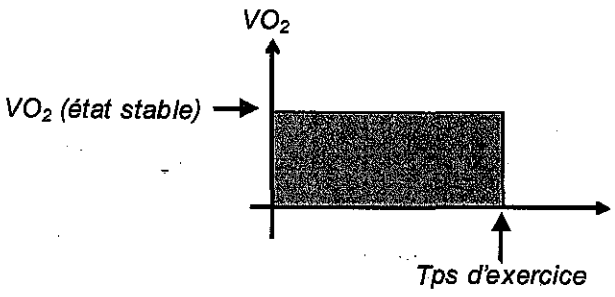
d'évolution de VO_2 tende vers une valeur asymptotique : VO_2max. Par ailleurs, il ne tient pas compte des effets probables des variations de vitesse sur la cinétique de VO_2 (THOMAS et al. 2001).

D'autres moyens indirects existent permettant d'estimer la participation des différents systèmes de fourniture de l'énergie. La méthode la plus utilisée est celle du calcul du « déficit en oxygène », préconisée par MEDBO et al. (1988).

b. Le déficit en oxygène :

Pour évaluer la part relative des processus anaérobies, le calcul du déficit en oxygène est une approche qui semble plus répandue que l'utilisation de la lactatémie post-effort, même si des critiques existent également à son sujet. MEDBO et al. (1988) proposent cette méthode comme moyen d'estimer la capacité anaérobie pour des exercices compris entre 2 et 16 min menés jusqu'à épuisement. Le calcul du déficit est basé sur l'évaluation de la **demande totale en énergie**. Celle-ci correspond pour des exercices à dominante aérobie, au produit de la valeur de VO_2 trouvée au cours de l'état stable par la durée de l'exercice (cf. figure 2).

Figure 2 : représentation schématique de la demande théorique totale en énergie

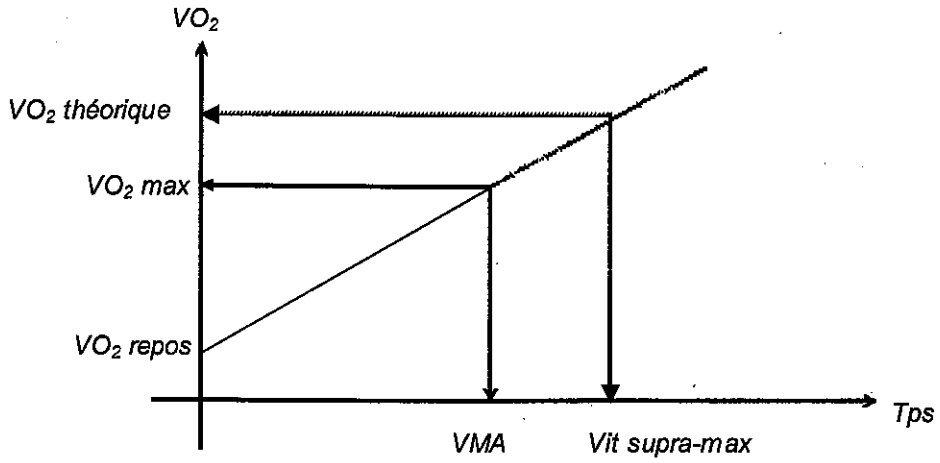


Demande totale théorique en énergie.

Pour des efforts supra-maximaux, elle est basée sur l'estimation théorique de la demande totale en oxygène (MEDBO et al. 1988). A partir de la relation linéaire qui existe entre la vitesse du tapis et la consommation d'oxygène à des intensités sous-maximales, une consommation d'oxygène théorique est extrapolée pour des vitesses supra-maximales (cf. figure 3). En d'autres termes, le coût théorique en oxygène d'un exercice supra-maximal peut être

calculé à partir de la droite de régression qui lie la consommation d'oxygène à la vitesse pour des allures sous-maximales (GASTIN et al. 1995).

Figure 3 : représentation schématique du calcul de VO_2 théorique pour des exercices supra-maximaux.



$VO_2 = f$ (vitesses sous-maximales)

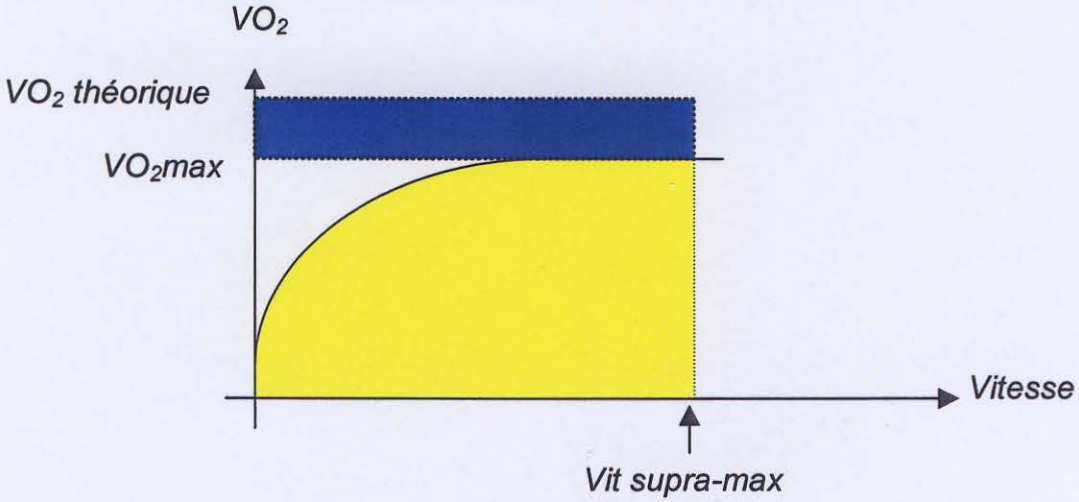
Cette relation peut être obtenue de deux manières :

- soit en mesurant la consommation d'oxygène pour au moins 10 intensités sous-maximales,
- soit par deux mesures proches de la consommation maximale d'oxygène et en utilisant une intersection commune de $5ml.kg^{-1}.min^{-1}$ sur l'axe des ordonnées.

L'utilisation de cette méthode suppose que pour estimer la part du métabolisme anaérobie, le coût énergétique soit constant.

Ainsi le Déficit en Oxygène Accumulé (DO_2 ou AOD) est représentatif du déficit cumulé pendant toute la durée de l'épreuve (cf. figure 4). Il peut être défini comme la différence entre la consommation théorique d'oxygène à des intensités supra-maximales (VO_2 requis) et l'oxygène total consommé pendant tout l'effort ou VO_2 cumulé (HEUGAS et al. 1995). L'extrapolation linéaire de la demande en oxygène est justifiée par MEDBO et al. (1988), même pour des intensités élevées. Cette méthode a pour principal intérêt de prendre en compte le coût énergétique de chaque individu.

Figure 4 : représentation schématique du déficit d'oxygène (BILLAT, 2002) :



- En jaune : l'O_2 consommé = part du système aérobie.
- En blanc : le DO_2 de début d'exercice,
- En bleu : le DO_2 accumulé tout au long de la course où la vitesse est supra-maximale.
- Le déficit total d'oxygène accumulé est la somme du déficit initial (en blanc) et du déficit accumulé tout au long de la course (Bleu) = part du système anaérobie.

Pour HERMANSEN et MEDBO (1984), le déficit total en oxygène augmenterait de 30 à 83 $ml.kg^{-1}$ d'équivalents en O_2, lorsque la durée de l'effort passe de 15 secondes à 2 minutes. Une durée supérieure de 2 à 4 minutes donne seulement une augmentation négligeable, voire pas d'augmentation du déficit d'oxygène. Il y a, semble-t-il, une limite supérieure qui peut être définie comme **le déficit maximal en oxygène accumulé (DO_2max) ou déficit total.**
Des valeurs semblables de DO_2max ont été trouvées pour des sujets entraînés et non entraînés (MEDBO et al. 1988). Cet indice ne permet pas non plus de différencier les groupes d'athlètes selon leur spécialisation sportive (BANGSBO et al. 1993). En revanche, le temps d'atteinte de DO_2max permet de différencier la spécialité ou le niveau d'expertise. L'étude de la cinétique de VO_2 lors d'exercice supra-maximal chez des athlètes entraînés sur 400 m montre l'atteinte d'un plateau de VO_2 à partir de la $44^{ème}$ seconde. Comme VO_2 théorique est constant puisque la vitesse ne varie pas, le déficit d'oxygène est considéré lui aussi constant et maximal à partir de 44 secondes. Or, chez des

sujets non entraînés ou ne suivant pas un entraînement sportif régulier, le DO_2 max n'atteint un plateau qu'au bout de 2 minutes (HEUGAS et BRISSWALTER, 1995).

Par ailleurs, la production d'énergie anaérobie au cours d'un exercice intense serait liée aux masses musculaires impliquées. En effet, pour un même sujet, des valeurs de DO_2 max plus élevées seraient obtenues en utilisant l'appareil à ramer, par rapport au tapis roulant, ou lorsque le travail des bras s'ajoute à celui des jambes, ou bien encore lorsque l'inclinaison du tapis est accentuée (BANGSBO et al. 1993).

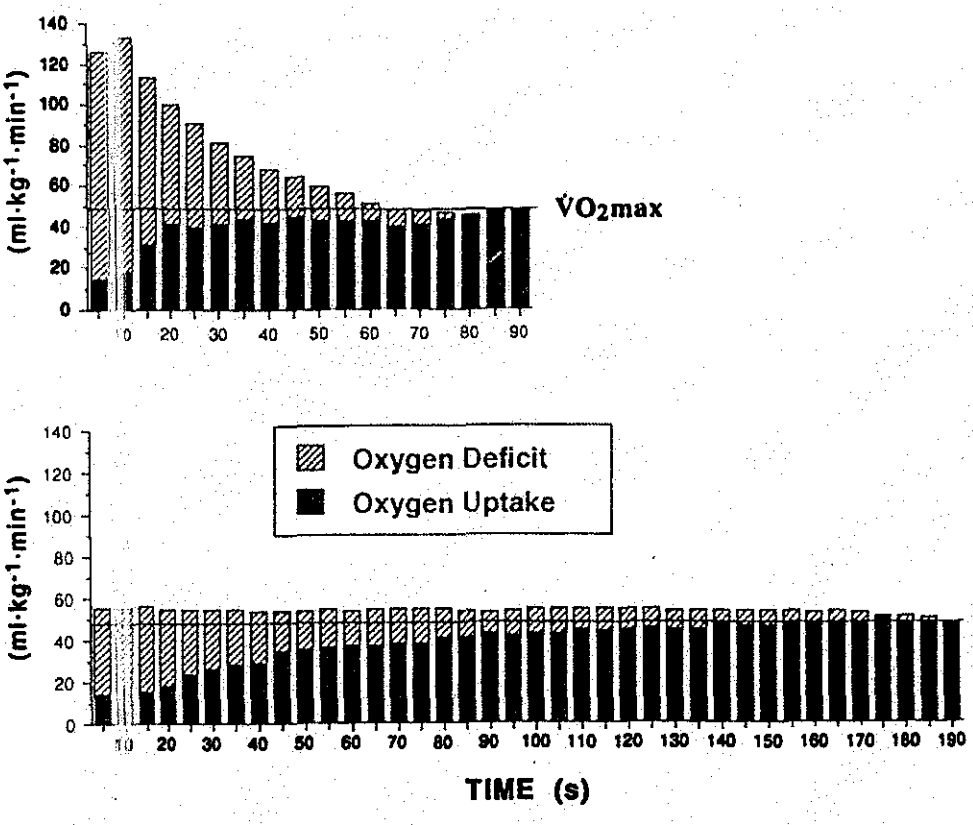
Dans le tableau 8, apparaissent les valeurs du déficit total obtenues au cours de plusieurs études menées chez des sportifs, spécialistes ou non de course à pied.

Tableau 8 : valeurs du déficit global (DO_2 accumulé) pour des exercices exhaustifs dont la durée est comprise entre 2 et 7 minutes :

DO_2 max	Sujets	Nombre de sujets	Ergomètre	VO_2 pic en $ml.min^{-1}.kg^{-1}$	DO_2 accumulé en $ml.kg^{-1}$
MEDBO et al. 1988	Sujets entraînés et non entraînés	11	Tapis (+10,5%)		52 à 90
BANGSBO et al. 1993	Footballeurs américains	15	Tapis (+5%)	58,1 ± 1,2	49,5 ± 3,0
	Coureurs	14	Tapis (+5%)	69,6 ± 1,2	51,9 ± 3,8
	Cyclistes	3	Ergocycle	62,4 ± 2,2	56,5 ± 8,4
GASTIN, 1998	800 m	Revue de littérature			49
	1500 m				**51**
	800 m femmes	2	Piste	49,4 ± 7,7	43,8± 29,6
	800 m hommes	9	Piste	55,8 ±7,9	65,8 ±18,8
	1500 m femmes	4	Piste	50,2 ± 6,3	36,1± 21,0
	1500 m hommes	**10**	**Piste**	**61,7 ± 6,7**	**71,0 ± 24,8**
	3000 m femmes	2	Piste	53,9 ± 6,0	47,5 ±18,7
	3000 m hommes	8	Piste	64,1 ± 8,1	88,1 ±25,4

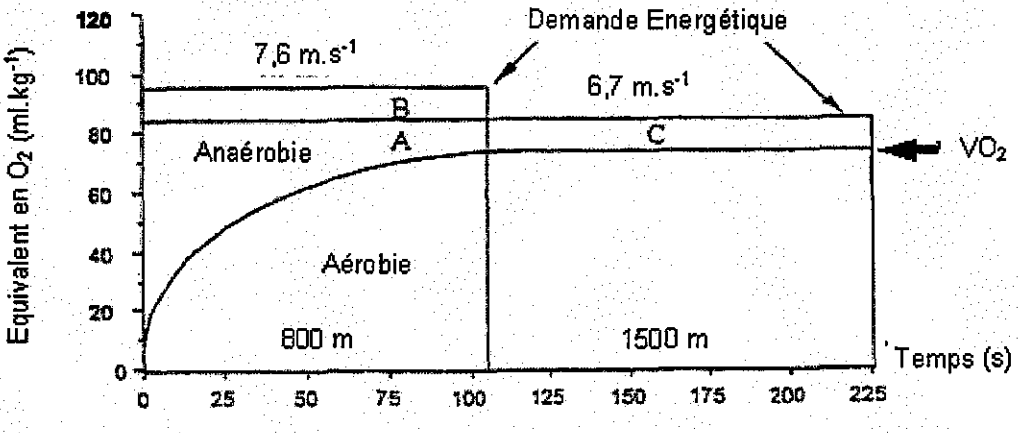
Une illustration de l'utilisation de la méthode de détermination du déficit total en O_2 est proposée ci-après sur la figure 5 :

Figure 5: déficit en oxygène et consommation d'oxygène par fraction de 10 s, pour les courses de 800 m (en haut) et 1500 m (en bas), d'après SPENCER et al.(1996).



Spencer et al. (1996) n'ont pas trouvé de différences significatives de DO_2 entre le 800 et le 1500 m : la part du système anaérobie a été estimée constante. La composante aérobie, elle, serait proportionnelle à la durée de l'effort, comme l'illustre la figure 6 ci-dessous.

Figure 6: modèle théorique pour les épreuves du 800 m et du 1500 m (d'après GASTIN, 1998). La part de l'énergie anaérobie pour le 800 m est représentée par les aires A + B qui représentent la capacité anaérobie. La vitesse moyenne plus faible sur 1500 m est le résultat d'une utilisation de cette capacité anaérobie sur un temps plus long (aire C).



Si un lien existe entre DO_2 et la performance, il n'a pas été mis en évidence par tous les auteurs. HEUGAS et BRISSWALTER (1995) n'ont trouvé aucune relation pour des coureurs de 400 m, ni CRAIG et MORGAN (1998), et OLESEN et al. (1994) pour des spécialistes de 800 m (113-123 s) d'une part, et des coureurs loisirs (153-170 s) d'autre part. En revanche, RAMSBOTTON et al. (1994) ont rapporté une corrélation significative entre DO_2 accumulé et la performance pour 14 sujets sportifs mais de niveau plus hétérogène (performance sur 800 m comprise entre 112 à 172 s).

Pour conclure, cette méthode bien que séduisante, présente cependant un risque quant à la validité des résultats. En effet, la relation entre la vitesse de course et l'énergie requise pour des vitesses sous-maximales pourrait ne pas toujours être linéaire (le coût énergétique pourrait augmenter pour des vitesses élevées). En conséquence, le calcul du déficit d'oxygène accumulé ne serait pas toujours une mesure très exacte de l'implication du système anaérobie au cours de l'exercice intense (BANGSBO et al. 1993). La valeur estimée du déficit en oxygène pourrait être inférieure à la réalité, en particulier pour les exercices courts et intenses. Néanmoins, le plateau de VO_2 trouvé pour des exercices de 2 min ou plus, pourrait être moins affecté (MEDBO et al. 1988). Ce qui rend cette méthode, a priori relativement fiable pour les épreuves de demi-fond.

Enfin la consommation d'oxygène post-exercice, communément appelée « dette d'oxygène » ou « remboursement de la dette », a également été utilisée comme moyen d'appréhender le métabolisme anaérobie.

c. Les mesures « post-exercice » de la dette d'O_2.

A la fin d'exercice d'intensité très élevée, VO_2 resterait au niveau maximal durant 10 à 35 s selon l'intensité de l'exercice (Di-PRAMPERO, 1981) et diminuerait ensuite selon une double fonction exponentielle. La cinétique post-exercice de VO_2 serait la somme d'une composante lente (composante lactique) et d'une composante rapide (composante alactique) (RIEU, 1988).

La dette d'oxygène est associée à la resynthèse des réserves énergétiques qui ont été épuisées et à l'élimination de l'acide lactique accumulé au cours de

l'exercice. La dette peut ainsi être utilisée comme indice de la quantité d'énergie fournie par le système anaérobie pendant l'exercice (FOX et MATHEWS, 1984).

le coût net en oxygène de l'exercice =
VO_2 de l'exercice + VO_2 récupération – VO_2 repos

Mais pour les exercices intenses, cette méthode ne semble pas précise (MEDBO et al. 1988). Elle ne semble pas reconnue par tous les auteurs qui s'intéressent au métabolisme anaérobie (OLESEN et al.1994 ; SPENCER et al. 1996 ; CRAIG et MORGAN, 1998 ; BILLAT et al. 2000 ; THOMAS et al. 2001), surtout depuis qu'il existe la possibilité de mesurer la consommation d'oxygène directement pendant l'effort.

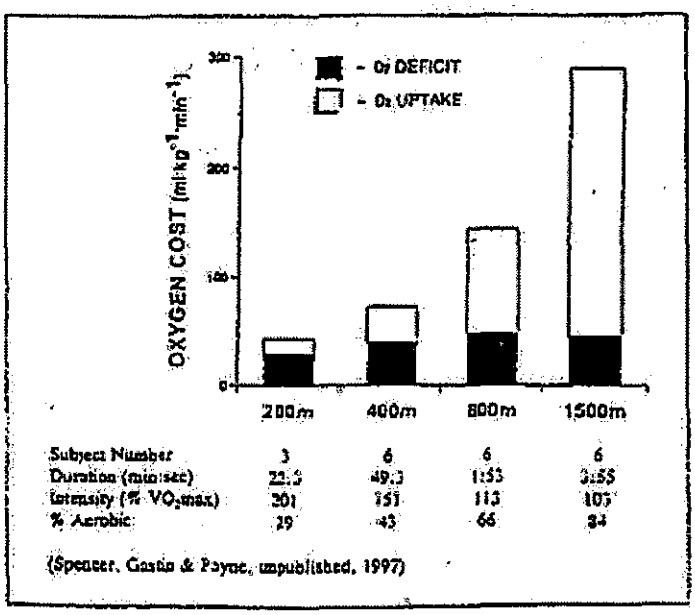
Les deux méthodes principales bien qu'indirectes permettant d'évaluer la participation du système anaérobie lors d'épreuves supra-maximales restent la mesure de la lactatémie et le calcul du déficit en oxygène. Le chapitre qui suit s'appuie sur ces deux méthodes et récapitule les parts respectives des deux systèmes en fonction de la durée des exercices supra-maximaux.

3. Contribution relative des systèmes aérobie / anaérobies lors d'exercices supra-maximaux :

Quelles sont les ressources énergétiques mobilisées par l'athlète pour un effort supra-maximal ? Cette question présente un intérêt majeur pour l'entraîneur. C'est pourquoi, il devient important d'obtenir des données de plus en plus fiables sur ce sujet. Longtemps, il a été dit que pour des exercices voisins de 2 min, la part aérobie se situait autour de 50%. Cette croyance vient probablement des méthodes de calcul basées sur la dette d'oxygène, la lactatémie ou le déficit en oxygène avec l'hypothèse que le coût énergétique est identique pour l'ensemble des athlètes. Toutes ces méthodes semblent néanmoins surestimer la part du système anaérobie.

La contribution relative des systèmes aérobie et anaérobies pour des exercices de forte intensité (du 400 au 1500 m) peut être appréhendée par le calcul du déficit en O_2 (MEDBO et al. 1989 ; GASTIN et al. 1995), avec les limites que nous avons évoquées dans la partie précédente. A ce jour, cette méthode reste à notre connaissance la plus valide et de nombreux auteurs l'utilisent (cf tableau 9). La figure 7 propose une illustration pour plusieurs épreuves athlétiques de la contribution aérobie et anaérobie calculée par SPENCER et al. (1997) grâce à cette méthode.

Figure 7 : contribution aérobie et anaérobie au coût total en énergie pour des épreuves de courses de 200, 400, 800, et 1500 m.



L'essentiel des recherches en course à pied sur la contribution respective des différents métabolismes de resynthèse d'énergie a été menée en laboratoire. Sur tapis roulant, les protocoles sont proposés à vitesse constante, hormis peut-être celui proposé par SPENCER et GASTIN (2001). A notre connaissance, seulement deux études ont essayé d'appréhender la contribution respective des deux métabolismes lors d'effort de compétition menées sur le terrain (THOMAS et al. 2001; DUFFIELD et DAWSON, 2003). Le tableau ci-après présente quelques résultats relevés dans la littérature :

Tableau 9 : Contribution aérobie estimée par différents auteurs (intensité maximale sur la durée ou la distance considérée).

Durée / Distance	Méthode	400 m	1min	800 m	2 min à 2 min 30 s	3 min	**1500 m**	**4min**
HILL, 1999	Lactate (*)	37 à 38%		58 à 62%			**80 à 83%**	
MEDBO et al. 1989	Déficit O_2				63 à 65%			
WEYAND et al. 1993	Déficit O_2	64 à 66%		76 à 81%			**84 à 87%**	
HEUGAS et BRISSWALTER, 1995	Déficit O_2	environ 45%						
SPENCER et al. 1996	Déficit O_2	46%		69%			**83%**	
GASTIN, 1998	Déficit O_2	43 à 46%	48%	66 à 69%	64%	73%		**80%**
SPENCER et GASTIN, 2001	Déficit O_2	43%		66%			**84%**	
THOMAS et al. 2003	Déficit O_2			68%				
DUFFIELD et DAWSON, 2003	Déficit O_2	41,3% à 44,5%		60,3% à 70,1%			**76,8 à** 85,5%	

(*) lactatémie post-effort.

Les principaux facteurs susceptibles d'expliquer les différences dans les résultats ci-dessus sont :

- le sexe (HILL, 1999 ; DUFFIELD et DAWSON, 2003),
- le niveau de pratique (GASTIN, 1998),
- la spécialisation des athlètes (NUMMELA et RUSKO, 1995),
- les objectifs visés et par suite la stratégie de course privilégiée : course tactique pour pouvoir finir vite ou course permettant d'établir une performance maximale.

Le tableau ci-après présente les résultats de ces différentes études.

Tableau 10 : contribution aérobie selon le sexe, le niveau d'expertise et la spécialisation.

Contribution aérobie		400 m	800 m	**1500 m**
HILL, 1999	Femmes Universitaires	37%	67%	**83%**
	Hommes Universitaires	37%	61%	**80%**
DUFFIELD et DAWSON, 2003	Femmes entraînées	44,5%	70,1%	**85,5%**
	Hommes entraînés	41,3%	60,3%	**76,8%**
WEYAND et al. 1993	Femmes	66%	81%	**87%**
	Hommes	64%	76%	**84%**
GASTIN, 1998	Bons coureurs	46%	69%	**83%**
	Athlètes élite	43%	66%	**84%**
NUMMELA et RUSKO, 1995	Sprinters	37,1%		
	Coureurs d'endurance	45,6%		

La comparaison de la contribution anaérobie sur 400 m, 800 m, 1500 m pour des athlètes des deux sexes montrent que les femmes utilisent de façon plus importante la filière aérobie (WEYAND et al. 1993 ; HILL, 1999 ; DUFFIELD et DAWSON, 2003). L'une des explications pourrait être le temps d'effort plus important chez la femme pour effectuer la même distance. Les différences les plus significatives dans la contribution aérobie sont relevées pour le 800 m (entre 6 et 10% d'écart selon les études). GASTIN (1998) en utilisant la même procédure expérimentale pour deux niveaux d'expertise distincts obtient une contribution relative du système aérobie plus importante pour le groupe de bons coureurs par-rapport à l'élite pour les distances courtes : 400 et 800 m, alors qu'elle est identique sur le 1500 m. Ces résultats laissent penser qu'au dessus du 800 m, l'importance du métabolisme aérobie dans la resynthèse de l'énergie devient prédominante, mais n'explique pas la différence dans les performances. D'autres études se sont intéressées au comportement d'athlètes en fonction de leur spécialité (sprint ou endurance) lors d'une épreuve supra-maximale dont le temps mis pour atteindre l'épuisement est de 49,5 secondes environ (NUMMELA et RUSKO, 1995). Une contribution anaérobie plus importante est observée chez les sprinters et ce, de façon significative suggérant qu'une spécialisation dans l'entraînement permet d'utiliser différemment les deux filières énergétiques. Concernant le 1500 m, la contribution aérobie se situerait

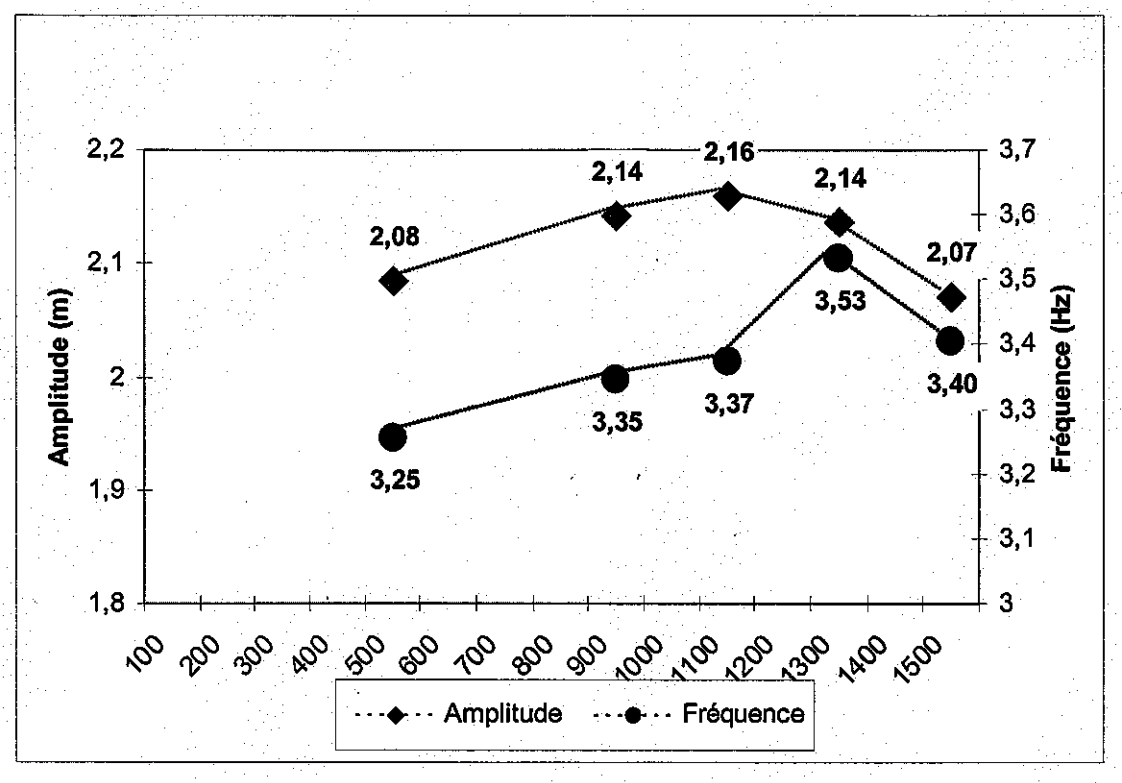
entre 76,8 et 84 % (tableau 9 et 10). Même s'il existe presque 10% d'écart entre les différentes études, ces valeurs indiquent une forte implication du métabolisme aérobie dans la performance sur 1500 m incitant entraîneurs et athlètes à lui accorder une large place dans la préparation.
Le développement du métabolisme aérobie va permettre au coureur d'aller plus vite, pour une même sollicitation du secteur anaérobie, ou bien lui donnera plus de confort pour une même vitesse de course, lui permettant ensuite de finir dans de bonnes conditions.
Si les résultats obtenus sur la contribution respective des systèmes d'énergie diffèrent selon les chercheurs, les points de vue sont également divergents pour les entraîneurs sur un plan plus pragmatique. Une « table ronde » réunissant huit scientifiques du sport et entraîneurs, a été organisée en 1996 par la fédération internationale d'athlétisme sur l'approche du 800 m. Les écarts relevés quant à la part estimée du système anaérobie pour cette épreuve, sont énormes : de 35% à 65%, avec des implications directes sur les contenus d'entraînement proposés. D'où peut-être, l'intérêt de notre étude qui visera à donner des renseignements objectifs sur l'intervention du système aérobie au cours d'une épreuve de 1500 m réalisée sur le terrain.

Nous venons de traiter de façon importante les facteurs bio-énergétiques liés aux épreuves de demi-fond et plus particulièrement le 1500 m en athlétisme. Mais si ces aspects physiologiques jouent un rôle déterminant dans la performance, nous ne pouvons pas les dissocier des paramètres bio-mécaniques. L'un et l'autre s'influencent mutuellement selon la durée et l'intensité de l'effort, et notamment avec l'apparition de la fatigue.

II. Evolution des paramètres mécaniques en course

Plusieurs études descriptives portant sur l'évolution des caractéristiques de la foulée en sprint et en demi-fond ont été menées par GAGER et al. (1995, 1999, 2004). Le rapport fréquence / amplitude dépend essentiellement de la longueur, la puissance, la souplesse des membres inférieurs de chaque athlète. L'amplitude de la foulée est déterminée par la quantité de force exprimée, tandis que la fréquence des foulées dépend principalement de la capacité du système nerveux central à émettre une succession de stimuli nerveux émis en succession rapide afin que la force soit exprimée rapidement (DONATI, 1994).
Sur 60 m ou sur 100 m, les hommes comme les femmes montrent le même « syndrome du finish » : **l'amplitude augmente et la fréquence chute** (GAJER et al. 1995). D'autres études se sont intéressées aux coureurs de 400 m (NUMMELA, 1991 ; NUMMELA et al. 1995 ; GAJER et al. 1999). Au bout de 100 m, l'athlète a fini d'acquérir sa vitesse spécifique. La fréquence est maximale dans le second 50 m, alors que l'amplitude est maximale dans le 3ème 50 m (GAJER et al. 1999). Pendant la course, la longueur de la foulée diminue en moyenne de 22 cm du 100 m au 400 m. Les changements les plus importants apparaissent au cours du dernier 100 m. Cette baisse d'amplitude est plus prononcée que la baisse de fréquence (NUMMELA et al. 1995). Le sprint nous enseigne que pour faire durer une vitesse de déplacement, malgré l'apparition de la fatigue, il faut s'attacher à ne pas dégrader la technique de la course.
En demi-fond, le coureur doit s'organiser dans un souci d'efficacité et d'économie. Au niveau technique, la vitesse de course est également influencée par les deux facteurs que sont la fréquence et l'amplitude. Il est essentiel de savoir quel est le plus important pour améliorer l'efficacité de la foulée. Selon GACON (1995), entraîneur national du demi-fond, de 1988 à 1992, le maintien de la longueur des foulées sur des allures spécifiques joue un rôle majeur dans la performance en demi-fond. L'analyse des paramètres de fréquence / amplitude pour les coureurs de 1500 m, lors de la finale des championnats du monde 2003 (figure 8) donnent les résultats suivants (GAJER et HANON, 2004) : onze athlètes étaient au départ et 6 d'entre eux ont réalisé un temps proche de moins de 3 secondes de leur meilleur temps de l'année.

Figure 8 : évolution des valeurs moyennes de l'amplitude et de la fréquence pour les 11 finalistes du 1500 m hommes.



L'amplitude maximale est obtenue au 1100 m, alors que la vitesse de course du groupe augmente jusqu'au 1300 m grâce à l'augmentation de la fréquence. La vitesse chute surtout dans les 200 derniers mètres, parallèlement à la chute d'amplitude (- 3 %) et de fréquence (- 4 %).

Pour les courses de plus longue durée, le sujet peut adapter spontanément l'amplitude de ses foulées. La locomotion humaine est un système soumis à des principes physiques d'auto-optimisation. Les sujets adoptent spontanément une fréquence et une amplitude de foulée qui minimisent le coût énergétique (HAUSSWIRTH et BRISSWALTER, 1999). Les premières recherches menées par CAVANAGH et al. (1982) sur les effets de la longueur de la foulée sur la consommation d'oxygène lors de courses prolongées ont montré un coût optimal pour une longueur de foulée choisie librement. En augmentant ou en raccourcissant l'amplitude, le coût en oxygène de la course augmentait. En d'autres termes, au plan énergétique, il existe une relation parabolique avec un minima entre la longueur de la foulée et la consommation d'oxygène. Ceci signifie que pour une vitesse donnée, il n'y aura qu'une seule combinaison

possible du rapport fréquence / amplitude pour lequel la dépense énergétique est minimale.

Pour conclure, nous présentons dans le tableau 11 ci-dessous, les caractéristiques de la foulée observées en course pour des athlètes de différentes disciplines en athlétisme.

Tableau 11 : valeurs moyennes de fréquence et d'amplitude du sprint au fond.

Auteurs	Epreuve	Athlètes	Ampl Moy (m)	Ampl Max (m)	Ampl final	Fréq moy (Hz)	Fréq Max (Hz)	Fréq Finale (Hz)
ONTANON, 1997	100 m	Niv. national	2,21			4,52		
ONTANON, 1997	100 m	Niv. national	2,16			4,42		
SCHOLICH, 1978	100 m	Niv. mondial	2,25			4,40		
GAJER et al. 1999	400 m	Niv. 46,10 s		2,61	2,17		3,76	3,16
GAJER et al. 1999	400 m	Niv. 48,63 s		2,24	1,96		4,10	3,46
MAISETTI, 1999 *	400 m	Niv. 43,18 s	2,22	2,37	2,12	4,18	4,27	4,10
SCHOLICH, 1978	400 m	Niv. : 43,8 s	2,20			4,13		
GAJER, 1995	800 m	Niv. Mondial		2,38	2,21			
GAJER, 1995	800 m	Niv. National		2,21	2,03		3,45	3,4
GAJER, 1995	800 m	Niv. interrégional		2,02	1,91		3,5	3,5
GAJER, 1995	800 m	Niv. Régional		1,90	1,75			
GAJER, 1995	800 m	Niv. 105 s					3,5	3,5
SCHOLICH, 1978	800 m	Niv. 103 s	2,10			3,67		
SCHOLICH, 1978	**1500 m**	**Niv. 212,2 s**	**2**			**3,53**		
GAJER et al. 2004	**1500 m**	**Niv. mondial**	**2,12**	**2,16**	**2,07**	**3,38**	**3,25**	**3,53**
SCHOLICH, 1978	5000 m	13 min 12 s	1,80			3,50		
PAAVOLAINEN et al. 1999	5000 m	Niv. 18 min 20 s	1,63			2,85		
PAAVOLAINEN et al. 1999,	5000 m	Niv. 17 min 30 s	1,65			2,85		
SCHOLICH, 1978	10000 m	27 min 30 s	1,75			3,46		
SCHOLICH, 1978	Marathon	2 h 08 min	1,60			3,47		

* dans GAJER et al. 1999

Les aspects physiologiques ainsi que les aspects mécaniques semblent intimement liés : la production d'acide pyruvique et la baisse du pH musculaire, lors d'efforts intenses influent sur les capacités de contraction musculaire. Des efforts de plus longue durée, entraînent des perturbations bio-mécaniques, de par l'augmentation de la température corporelle et l'utilisation des acides gras

libres comme substrats énergétiques (HAUSSWIRTH et BRISSWALTER, 1999). Inversement, des modifications volontaires de l'amplitude ou de la fréquence des foulées, ont des répercussions sur le coût énergétique de la course (BRISSWALTER et al. 1996). Une meilleure connaissance de l'évolution concomitante des paramètres physiologiques et biomécaniques, au cours d'un effort de compétition et notamment avec l'apparition de la fatigue, permettrait d'orienter l'entraînement vers un travail technique plus orienté sur le développement de la force spécifique ou plus axé sur le développement des filières énergétiques, ou une combinaison des deux.

Un des éléments souvent délaissé dans l'analyse des facteurs de la performance est celui lié au contexte de la performance. Le demi-fond se court en peloton et l'athlète concrétise avec plus ou moins de réussite son potentiel selon la stratégie choisie et la tactique mise en œuvre. La stratégie est définie à l'avance, la tactique est l'application de la stratégie en course, mais surtout son adaptation en temps réel en fonction des conditions (météo, comportement des adversaires, état de forme, etc.). Lors des courses construites pour battre un record, la tactique est très proche de la stratégie définie au préalable, et les athlètes s'organisent pour gérer leur effort de façon à optimiser leurs qualités physiologiques et bio-mécaniques. La question de savoir s'il existe un profil type ou un modèle idéal de répartition de l'effort pour courir le 1500 m, est posée.

Le chapitre suivant fait état des connaissances qui existent sur ce thème.

III. Répartition des efforts

De quelle façon les sportifs réalisent-ils leurs meilleures performances ? Les études en sciences du sport focalisent souvent leur attention sur les facteurs déterminants dans la performance athlétique comme :

- les caractéristiques physiologiques de l'athlète,
- les réponses de celui-ci aux charges d'entraînement,
- les aides ergogènes (nutrition, etc.)
- les innovations dans l'équipement (qualité du revêtement, des chaussures pour ce qui concerne la course à pied).

Le comportement des sportifs en compétition et plus spécifiquement la tactique qu'ils utilisent n'est pas objet de beaucoup d'attentions. Alors que répartir judicieusement son effort semble vital pour la performance. L'idée d'une course équilibrée comme profil idéal pour réaliser une performance en compétition lorsqu'elle dure quelques minutes, date de plusieurs générations. Elle se vérifie souvent pour des efforts de longue durée mais les observations référencées sur ce sujet restent limitées. A partir de constats faits sur le terrain, nous présenterons quelques études menées sur l'influence de la stratégie dans la performance et ses conséquences au plan physiologique :

A. Etude descriptive

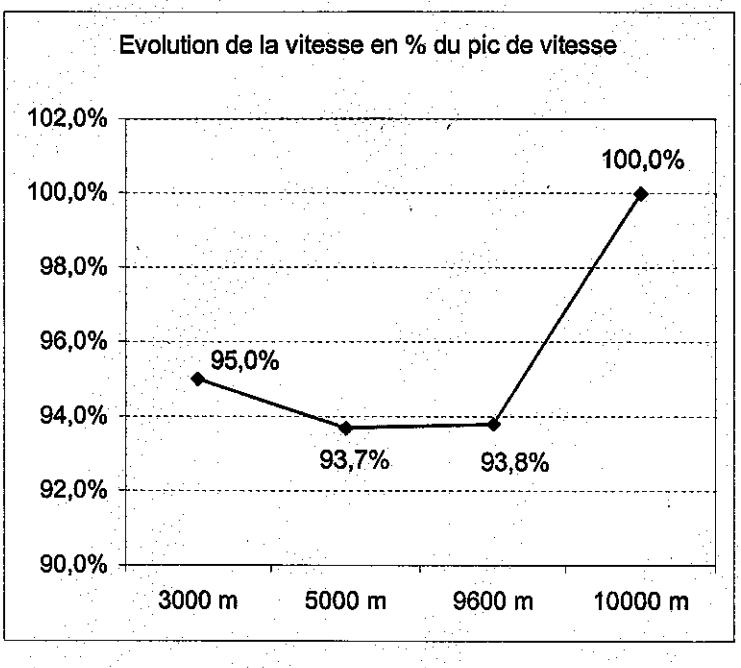
1. Observations du 3000 m au marathon :

D'un point de vue empirique, BARDY (1988), ancien Conseiller Technique à la FFA et entraîneur reconnu de demi-fond évoquait la répartition idéale pour courir un 3000 m en 9 min : il préconisait de courir successivement chaque 1000 m en 2 min 57 s, 3 min 03 s, et 3 min. Un départ trop rapide peut perturber la course et de fait la performance finale (exemple : 2 min 49 s, 3 min 03 s, et 3 min 14 s pour chaque 1000 m donne un temps de 9 min 06 s). Il semble établi que des changements de rythme dans des épreuves longues ou des départs en surrégime sont coûteux en énergie. Une distribution irrégulière de l'allure conduit à diminuer les capacités de performance et entraîne une

demande physiologique plus importante (STAAB et al. 1992). Cependant, lors d'épreuves de durée, la faculté à accélérer dans la dernière partie de course semble un point commun pour obtenir la meilleure performance.

FOSTER et al. (1994) ont fait ce constat avec Julius ONDIEKI, premier homme à passer sous les 27 min sur 10 000 m en juillet 1993. L'évolution du rythme de sa course montre une course régulière qui se termine en accélération sur les 400 derniers mètres (cf. figure 9).:

Figure 9 : profil de course du record du monde du 10000 m réalisé en 1993.



Actuellement sur 10 000 m, semi-marathon, et marathon, il semble que les meilleurs coureurs parviennent à réaliser des performances en courant plus rapidement sur la seconde partie de leur épreuve (ils courent en « negative split »).

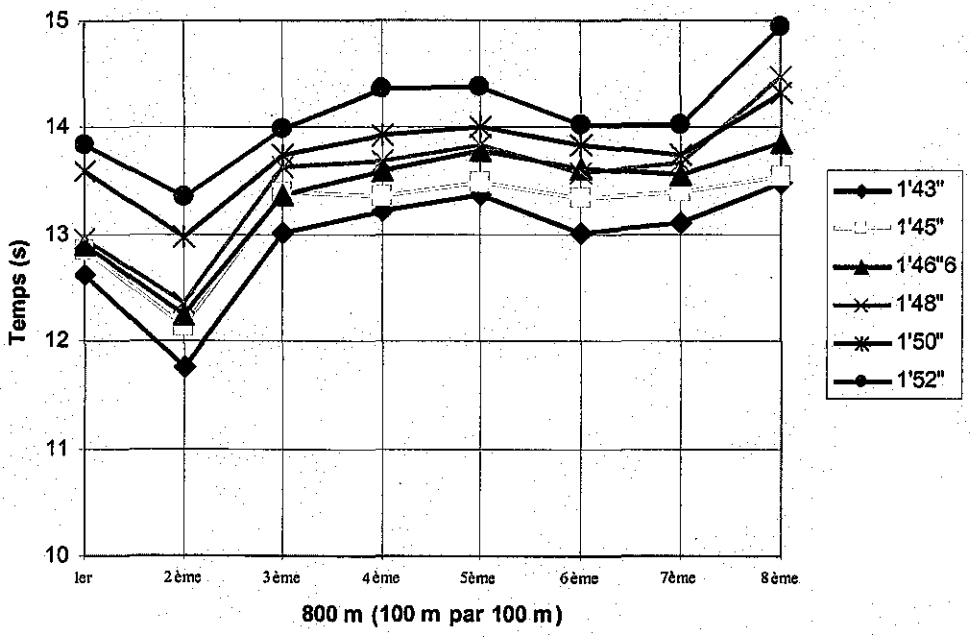
2. *Observations sur le 800 m* :

Plusieurs auteurs ont observé une chute de vitesse en fin de course parmi des athlètes des deux sexes (BUENO, 1992 ; FOSTER, 1994). En finale des championnats du monde en 1981, chez les femmes, le dernier 200 m est le plus lent du 800 m. WODARS, vainqueur à l'époque, est l'athlète qui est parvenue à limiter au mieux la chute de vitesse (BUENO, 1992). Aux Jeux Olympiques de 1988, le second tour des 8 finalistes hommes était plus lent que

le premier (50,32 s vs. 55,21 s, respectivement). Le vainqueur a eu le plus faible ralentissement au cours du second tour (seulement 1,3 s de différence). Chez les femmes, le constat était identique (56,83 s vs. 61,28 s).

Ces observations sont largement confirmées par GAJER et al. (2000). Ces auteurs ont étudié de façon exhaustive une centaine de courses de 800 m de niveau régional à international. Le nombre de course relevé permet de généraliser les simples constats réalisés auparavant : 100% des performances des records sur 800 m sont effectués sur le mode présenté ci-dessous (cf. figure 10).

Figure 10 : comparaison du profil de course sur 800 m, 100 m par 100 m pour différents niveaux de coureurs.



La vitesse est maximale sur le second 100 m, puis un plateau est maintenu du 300 au 700 m. Une chute de vitesse est constatée de façon systématique sur le dernier 100 m de course.

3. Observations sur le 1500 m:

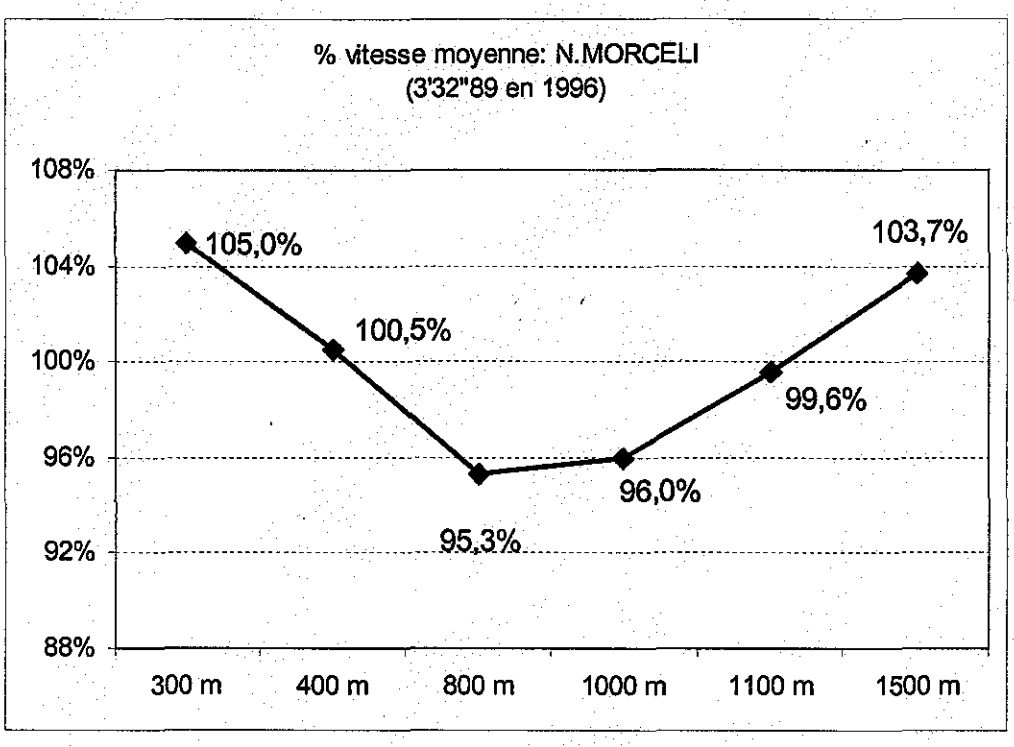
Les graphiques qui permettent d'analyser la vitesse de course, par fractions de 100 m, des épreuves de 400 m jusqu'au 5000 m sont riches d'enseignements et permettent d'objectiver ce qui se passe réellement sur le

terrain. Malheureusement, les seules données exploitables pour un grand nombre de niveau de performance ne concernent que le 800 m (GAJER et al. 2000). Pour le 400 m et le 1500 m, des observations ont été faites, mais elles concernent exclusivement le haut niveau (GAJER, 1999 et 2004). Un profil de course identique semble exister entre le 400 et le 800 m, mais est différent de ce qui apparaît sur 1500 m et a fortiori sur les distances supérieures. De très grands coureurs de 1500 m (AOUITA, MORCELLI) ont subi des revers sur 800 m. Ce ne sont peut-être pas leurs qualités de sprinters qui doivent être mises en cause, mais leur capacité à gérer une fin de course très différente des distances supérieures. Par exemple, Saïd AOUITA pouvait finir le dernier 100 m d'un 1500 m en 12 s, alors qu'il peinait pour accomplir la dernière ligne d'un 800 m en moins de 13 s (GAJER et HANON, 1995). Selon DIRRINGER, entraîneur du recordman de France du 800 et du 1500 m (Medhi BAALA), « les fins de course apparaissent plus rapides sur 1500 m que sur 800 m. Cette impression n'est pas vérifiée car le dernier 200 m d'un 1500 m reste toujours plus lent que le dernier 200 m d'un 800 m du même niveau (qui est lui le plus lent de la course) ». L'observation des meilleurs athlètes de ces dernières décennies donne un éclairage intéressant. Au niveau international, le déroulement des courses est souvent le même : un dernier 800 m souvent de plus en plus rapide. Quel que soit le type de course et l'allure initiale, il faut être capable de finir vite les 300 derniers mètres. Dans le registre des qualités indispensables au plus haut niveau, la vitesse en fin de course s'avère un facteur décisif. MORCELI par exemple terminait son 1500 m, par un 800 m en 1 min 47 s, soit 26,9 $km.h^{-1}$ (VOLLMER, 1996). Mais là encore, la prudence est de mise et toute généralisation doit être évitée. En effet, Hicham EL-GUERROUJ, l'actuel détenteur du record du monde, semble avoir un profil différent d'autres athlètes performants sur cette distance (MORCELI, BAALA). Il mène souvent un train rapide tout au long de la course, avec une fin de course plus lente sur les 200 derniers mètres (Equipe Nationale Demi-fond, 2003).

Pour illustrer, voici quelques répartitions d'effort observées par les entraîneurs nationaux pour quelques athlètes confirmés. Parmi les entraîneurs, il n'y a pas de règles établies dans le choix des temps de passage intermédiaires, ce qui explique la diversité des relevés présentés.

Les jeux olympiques d'Atlanta nous ont offert des courses de haut niveau, notamment lors des demi-finales (VOLLMER, 1996). MORCELI s'est imposé en 3 min 32 s (vitesse moyenne = 25,4 km.h^{-1}). Le profil de sa course est proposé ci-dessous :

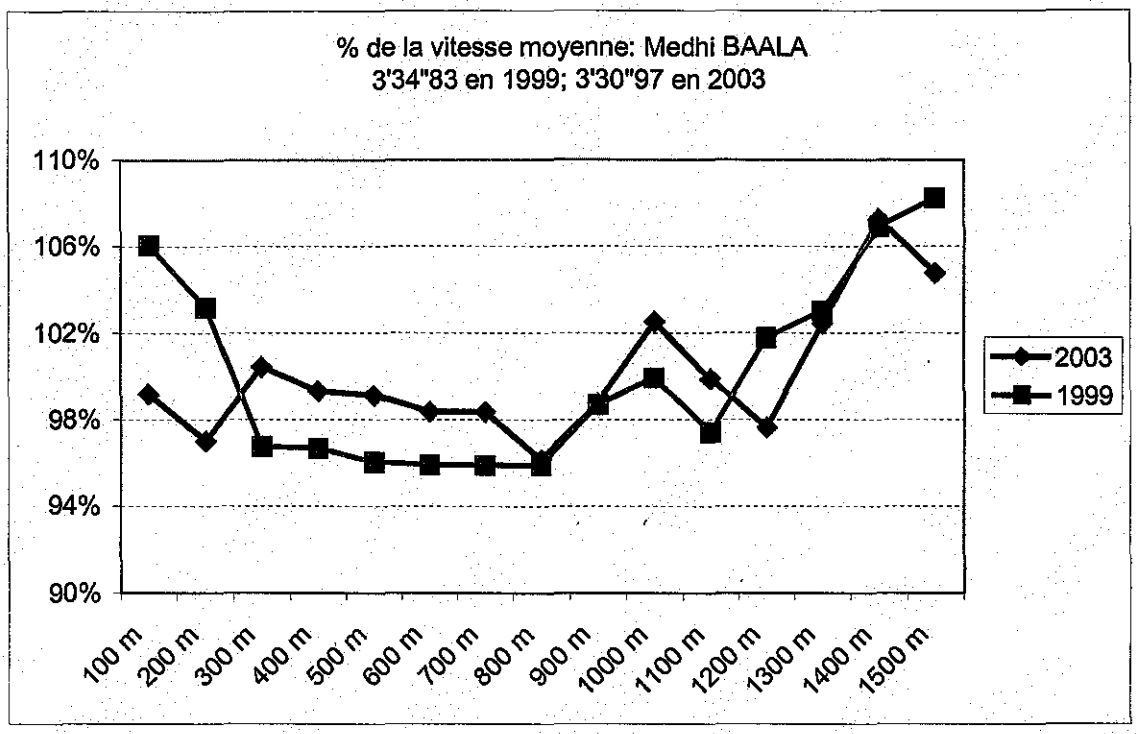
Figure 11 : profil du 1500 m pour N.MORCELI vainqueur des JO d'Atlanta.



La vitesse la plus élevée est obtenue dans les 300 premiers mètres (soit 26,7 km.h^{-1}) et la plus faible entre 800 et 1000 m (24,3 km.h^{-1}). Le dernier 400 m est rapide et l'athlète termine en 54,8 s (soit une vitesse de 26,3 km.h^{-1}).

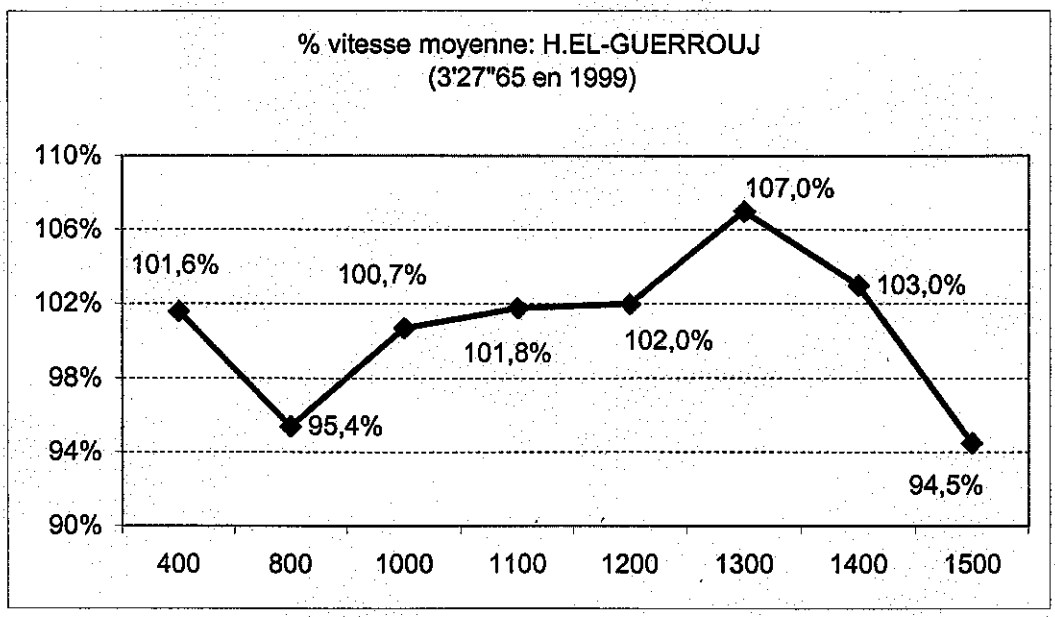
Medhi BAALA, le meilleur coureur de 1500 m français du moment présente un profil similaire, avec un départ rapide, puis le maintien d'un plateau et enfin une accélération terminale. Deux courses sont présentées pour cet athlète (cf. figure 12) : la première date de 1999 et correspond au record d'époque de Medhi BAALA, qui franchissait pour la première fois la barrière des 3 min 35 s. La seconde course équivaut à la deuxième meilleure performance de tous les temps pour cet athlète, réalisée 4 ans plus tard en 2003 : 3 min 30 s à Paris.

Figure 12: comparaison des profils de course de Medhi BAALA, lors de sa meilleure performance en 1999 et lors de sa seconde meilleure performance réalisée en 2004.



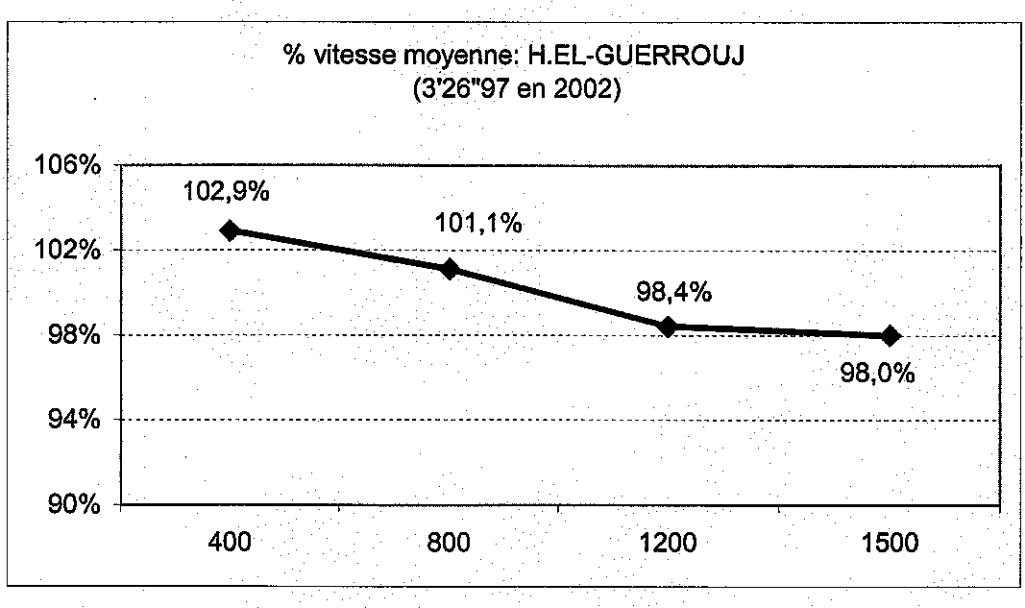
En 1999, les 400 premiers mètres sont courus globalement à 100,7% de la vitesse moyenne, et les 300 derniers mètres, à 106,1%. En comparaison, nous retrouvons le même athlète, 4 ans plus tard parmi les meilleurs coureurs mondiaux de 1500 m. Par rapport à son record de 1999, les 400 premiers mètres sont courus à une allure plus soutenue, globalement 104,4% de la vitesse moyenne. Par contre, les 300 derniers mètres sont toujours au dessus de la vitesse moyenne mais de façon moins marquée (101,7%). Ce profil semble actuellement observé chez la très grande majorité des coureurs de 1500 m. Cependant, à l'instar de la plupart des athlètes, un second type de stratégie se dégage plus proche de ce que nous avons vu précédemment pour le 800 m. Cette stratégie est utilisée par l'actuel détenteur du record du monde, Hicham EL-GUERROUJ lors de ses courses de record du monde (cf. figures 13 et 14).

Figure 13: profil du 1500 m pour Hicham ELGUERROUJ lors des championnats du monde à Séville (1999).



Cette première course est caractérisée par un départ moyennement rapide (26,5 $km.h^{-1}$) avec une chute de vitesse importante dans le second 400 m (24,9 $km.h^{-1}$). Ensuite l'allure s'accélère progressivement pour atteindre un pic entre 1200 et 1300 m (27,9 $km.h^{-1}$). La dernière ligne droite est laborieuse. L'athlète réalise un dernier 100 m en 14,6 s (soit une vitesse de 24,7 $km.h^{-1}$).

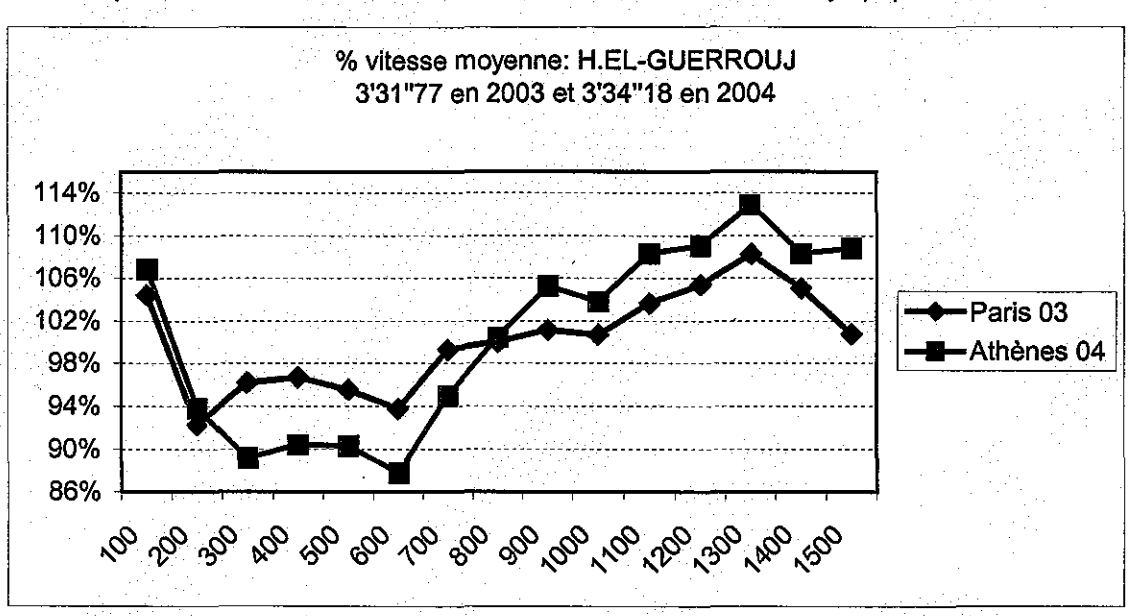
Figure 14: profil du 1500 m pour Hicham EL-GUERROUJ lors de son record du monde (2002).



Lors de son record du monde à RIETI en 2002, la chute de vitesse de Hicham EL-GUERROUJ est régulière entre le début et la fin de course.

A titre de comparaison, lorsque cet athlète court pour la meilleure place possible, la gestion de course apparaît nettement différente, comme illustré lors des championnats du monde 2003 à Paris ou lors des jeux olympiques d'ATHENES en 2004 (figure 15).

Figure 15: profil de courses tactiques sur 1500 m : Hicham EL-GUERROUJ lors de sa victoire aux championnats du monde à Paris et lors de sa victoire aux Jeux Olympiques à Athènes.



Pour conclure ce chapitre, nous reprendrons les propos de GASTIN (1998) au sujet de la stratégie : « la clef est peut-être de savoir quand ralentir, pour que le corps puisse récupérer de l'augmentation transitoire de l'acidité et de la baisse de l'ATP-CP » pour être en mesure de réagir dans la dernière phase de course (300 derniers mètres, voire dans les 100 derniers mètres).

Intéressons nous à présent aux études qui ont comparé plusieurs stratégies et leurs relations avec la performance.

B. Stratégie et performance

Peu d'études existent à notre connaissance sur l'utilisation de stratégies variées et leurs influences sur les résultats en compétition, surtout dans les efforts où la production de lactate et des métabolites intermédiaires est l'une des causes de fatigue vécue par l'athlète.

Des études comparatives existent en kayak (BISHOP et al. 2002) et cyclisme (FOSTER et al. 1993) pour des efforts supra-maximaux d'une durée proche de celles rencontrées en demi-fond sur 800 m et 1500 m. L'impact de stratégies variées sur la performance a été mesuré par ces auteurs mais les résultats de ces études divergent. En effet, un départ « all-out » standardisé (10-12 s à fond puis 5 s de transition avant de retrouver une allure régulière) permet d'obtenir de meilleurs résultats en kayak sur une distance de 500 m (durée comprise entre 115 et 125 s) par rapport à l'utilisation d'une vitesse régulière sur la même distance (BISHOP et al. 2002). Ce résultat propre à cette stratégie, a été confirmé par des modélisations faites pour des épreuves cyclistes sur piste, de courtes (90 s) et moyenne durée (supérieure à 4 min) (DE KONING et al. 1999).

Inversement sur ergocycle, FOSTER et al. (1993) obtiennent de meilleurs résultats pour des durées similaires (150 – 180 s), lorsque l'allure est régulière (51% du temps total pour la première partie de course) par rapport aux courses dont la première partie est imposée plus rapide (ou moins rapide) que l'allure moyenne (48 à 55% du temps total durant la première partie de course). Contrairement au kayak ou aux simulations faites pour le cyclisme, l'intensité imposée dans l'étude de FOSTER et al. (1993) dans les premiers instants de l'exercice est plus faible mais maintenue sur une durée plus longue.

En conséquence, en utilisant la stratégie « all-out », la puissance moyenne développée est plus importante en début d'épreuve, et même si cette puissance diminue dans la seconde partie en comparaison de la stratégie régulière, le résultat reste meilleur à l'arrivée. Des résultats similaires ont été mis en évidence pour des épreuves plus longues (260-280 s) en cyclisme (DE KONING et al. 1999 ; VAN INGEN SCHENAU et al. 1990). Une scission plus importante de créatine phosphate (CP) est invoquée par les auteurs pour expliquer ce pic de puissance plus élevé.

C. Stratégie et paramètres physiologiques :

La cinétique de VO_2 varie selon les stratégies : un départ « all-out » sur quelques secondes, entraîne une augmentation de VO_2 plus rapide en début d'effort et une consommation d'oxygène totale plus importante si cette stratégie est comparée à celle utilisant d'une allure régulière (GASTIN et al. 1995 ; BISHOP et al. 2002). En revanche, lorsque c'est la première partie de course qui est globalement plus lente ou plus rapide (FOSTER et al. 1993), il n'y a pas de différences significatives sur la performance.

Il n'y aurait pas de différence également concernant DO_2 accumulé entre les épreuves « all-out » et régulière. DO_2 accumulé est supérieur dans les 15 premières secondes d'une épreuve avec un départ all-out imposé par rapport à une épreuve avec une vitesse régulière. Mais ensuite c'est l'inverse qui se produit à partir de 45 s (GASTIN et al. 1995 ; BISHOP et al. 2002). En revanche, FOSTER et al. (1993) ont trouvé des valeurs de DO_2 accumulé plus élevées lors de l'épreuve conduite à allure régulière comparée à celle dont l'allure était plus élevée sur la première moitié de course ; Notons que la contribution aérobie a été estimée plus faible dans la première modalité d'épreuve.

Quelques soient les stratégies mises en œuvre, les taux de lactate ou le pH relevés à l'issue des épreuves ne présentaient pas de différence significative (FOSTER et al. 1993).

Ces études ont l'avantage d'avoir pu mesurer des paramètres physiologiques, mais elles sont encore loin de mettre en évidence la meilleure stratégie à utiliser sur le terrain pour obtenir la meilleure performance possible dans des épreuves supra-maximales. D'autant, que chaque activité possède sa spécificité.

D. Stratégie et Sports

Pour des sports portés comme le vélo ou le patinage, l'apparition de la fatigue a des conséquences moindres que dans certaines activités à dominante

énergétique. Seules les forces de frottement ou la résistance de l'air peuvent induire les petites chutes de vitesse. En revanche, pour les épreuves de course, de kayak ou de natation, une diminution de la puissance développée, peut avoir des répercussions bien plus importantes (FOSTER et al. 1993).

La notion de répartition de l'effort en course est pour l'entraîneur et son athlète, une donnée capitale en compétition tant pour la performance que pour le gain de l'épreuve. De simples petites variations de vitesse, ou des erreurs de répartition peuvent avoir des effets importants sur la performance.

IV. Objectifs de notre étude

Pour réussir en demi-fond, il est souhaitable que les athlètes disposent des qualités suivantes (BRANDON et BOILEAU, 1992):

- un VO_2max et une VMA élevée,
- une faible inertie du métabolisme aérobie ($\mathscr{T}$e plus faible possible),
- une grande capacité lactique : créer et supporter un grand déficit d'O_2 puisque les besoins en énergie par unité de temps sont supérieurs à VO_2max.

Si les deux premiers paramètres sont optimaux, la capacité lactique sera moins mise à contribution, la fin de course pouvant alors être plus rapide (BILLAT, 2002). De façon plus spécifique, les variables qui limitent la performance sur 1500 m et 3000 m ne sont pas les mêmes que pour le 800 m.

Parmi ces facteurs, la vitesse au seuil anaérobie et plus particulièrement VMA semblent corrélées à la performance sur 1500 m et 3000 m (LACOUR et al. 1990).

Pour le 800 m, un haut niveau de VMA est requis, mais des capacités importantes dans le domaine anaérobie lactique sont nécessaires. Elles vont permettre à l'athlète de maintenir une vitesse élevée sur la durée de l'épreuve (BRANDON, 1995).

Ces résultats sont issus des études centrées sur la recherche des paramètres sous-jacents à la performance en demi-fond, études qui nécessitent d'évaluer les athlètes dans différents secteurs et non de tester l'activité elle-même.

En effet, l'étude des efforts supra-maximaux en situation compétitive reste difficile en laboratoire. L'utilisation du tapis roulant pose notamment des problèmes dans la gestion des paramètres mécaniques liés à la vitesse de course. Par ailleurs, la motivation n'est pas toujours optimale comparativement au terrain. Ces facteurs ont des répercussions inévitables sur les variables physiologiques associées à ce type d'effort. Néanmoins SPENCER et al. (1996), SPENCER et GASTIN (2001) ont tenté d'appréhender l'effort de compétition en simulant sur tapis roulant des vitesses de course estimées notamment sur 800 et 1500 m. C'est une première étape dans l'étude des paramètres physiologiques liés aux efforts supra-maximaux. Dans le contexte de notre travail, leurs résultats constituent des éléments de comparaison intéressants.

La miniaturisation des appareils de mesure offre de nouvelles perspectives : tester les athlètes en situation de compétition et ainsi : «Mieux comprendre, pour mieux entraîner ».

Aussi, THOMAS et al. (2001) et DUFFIELD et DAWSON (2003) semblent être des précurseurs dans l'évaluation des efforts supra-maximaux sur le terrain. Préalablement à l'étude de THOMAS et al. (2001), personne n'avait pu montrer le fait qu'il était possible d'atteindre VO_2max sur 800 m. Une répartition de l'effort, basée sur le modèle de la compétition (lié notamment au départ rapide) a permis de mettre en évidence l'atteinte de VO_2max sur ce type d'épreuve.

Sur 1500 m, les études réalisées à ce jour concluent que les athlètes n'atteignent pas VO_2max (SPENCER et al. 1996; SPENCER et GASTIN, 2001). Même si dans la seconde étude, les vitesses ont été modulées, les schémas de course restent contrôlés par l'expérimentateur et non par l'athlète, et les protocoles proposés sont encore loin de représenter la réalité de la compétition. L'étude menée sur le terrain par DUFFIELD et DAWSON (2003) semble plus proche de nos préoccupations, même si le niveau des sujets restent faibles : 4 min 23 ± 8,3 s. Malheureusement, cette étude ne nous renseigne pas suffisamment sur la cinétique de VO_2 au cours de l'effort.

Il s'avère donc encore délicat de tirer des conclusions d'entraînement sur ces bases actuelles. La mise en place de protocoles simulant les conditions de la compétition, permettrait une meilleure approche des processus physiologiques et de leurs interventions en début, au cours et en fin d'effort. Ces connaissances aideraient les entraîneurs et les scientifiques du sport, à concevoir et mettre en œuvre des programmes d'entraînement plus en adéquation avec la réalité physiologique de la compétition. C'est un des objectifs que nous nous sommes fixés au travers de l'expérimentation qui sera présentée plus loin.

Le but de ce travail sera d'essayer de répondre aux questions suivantes :

- Sur 1500 m, quelle est pour un groupe d'athlètes entraînés et spécialistes de demi-fond, la contribution respective des métabolismes aérobie et anaérobies ? L'athlète atteint-il sa consommation d'oxygène maximale sur ce type d'effort ?
- Existe-t-il des différences selon les stratégies de course employée ?
- Que se passe-t-il en fin d'effort avec l'apparition de la fatigue, sur un plan physiologique et sur un plan biomécanique ?

Finalement, les réponses apportées par notre étude à ces différentes questions permettront éventuellement d'apporter des éléments objectifs de discussion pouvant orienter, confirmer, voire remettre en questions les procédés d'entraînement ?

Pour tenter d'apporter des réponses significatives à la spécialité du 1500 m, il s'avère nécessaire dans un premier temps, d'analyser le modèle de la répartition de l'effort du 1500 m en compétition. Cette étape préalable et indispensable fait l'objet de l'étude A qui va suivre.

Deux études vont s'enchaîner de façon chronologique :

- Etude A : analyse des temps de passage de courses de 1500 m, où les athlètes réalisent une performance chronométrique.
  Cette analyse nous permettra d'établir un modèle de répartition de l'effort.

- Etude B: Etude de l'évolution des paramètres physiologiques et biomécaniques au cours du 1500 m.
  Cette seconde étude s'appuie sur des expérimentations de terrain qui comprennent :
  - un test d'évaluation de la vitesse maximale aérobie (VMA),
  - puis une course de 1500 m simulant la compétition en vue de réaliser une performance chez des athlètes de niveau national.

Partie 2 : Etude Préalable

Etude chronométrique : Etude du profil de course pour des épreuves de 1500 m réalisée dans un objectif de performance.

Cette étape est un préalable indispensable avant la mise en œuvre sur le terrain de l'étude B. En effet, aucune étude à notre connaissance n'ayant été réalisée sur la stratégie utilisée par les coureurs de 1500 m pour réaliser une performance, nous avons commencé par réaliser une analyse de profils de courses pour des athlètes de niveau régional à national.

A partir d'un certain nombre d'épreuves observées lors de meetings, avec ou sans « lièvre », mais où l'athlète réalise une performance égale ou très proche de sa meilleure performance de l'année, nous tenterons de proposer un modèle de répartition de l'effort pour le 1500 m masculin à haut niveau.

I. Méthodologie :

A. Population étudiée.

Plusieurs types de populations ont été étudiés :

- Les athlètes qui courent sur 1500 m dans les grands meetings et qui peuvent être vus lors de retransmissions télévisées.
- Des athlètes qui courent sur 1500 m, au niveau régional, jusqu'au niveau national et qui peuvent être observés sur le terrain, à l'occasion de meetings ou de championnats.

Seuls les coureurs réalisant un temps inférieur à 3 s de leur record de l'année ont été pris en compte.

49 athlètes ont été observés en situation compétitive, soit 30 courses différentes, et ont été répartis par groupe en fonction de leur niveau de performance (voir résultats).

B. Matériels et méthodes :

1. Caméra, images télévisées, et documents vidéos

La grande majorité des cas ont été étudiés à partir d'images vidéos enregistrées issues de retransmissions télévisées de meetings pour des athlètes de haut niveau ou d'images issues de documents filmés de façon amateur, à l'aide d'un caméscope numérique. Quelques temps de passage ont été relevés en direct par des entraîneurs suivant leur propre athlète. Mais très vite, il est devenu une nécessité de filmer l'ensemble des déroulements des épreuves pour pouvoir obtenir des données réellement fiables et plus importantes en nombre. En effet, hormis pour le haut niveau, celui qui va réaliser ou s'approcher de son meilleur temps sur la distance, n'est pas toujours celui sur lequel on focalise toute son attention, c'est-à-dire sur la tête de la course. Dans une même course, plusieurs athlètes peuvent battre ou être proche de leur meilleur temps de l'année.

2. Magnétoscope :

Le magnétoscope utilisé (Sony®, SLV-SE 840) permet un déroulement de la bande au ralenti soit images par images. Un relevé des temps de passage tous les 100 m parcourus a pu être réalisé grâce au « time-code ». Le time-code correspond à l'affichage numérique des images enregistrées. A vitesse normale, la vitesse de déroulement de la bande est de 25 images par seconde.

3. Chronomètre :

Un chronomètre manuel relevant les temps au centième (Casio®, Module n°2038, 50 laps) et pouvant mémoriser 50 temps de passage a été utilisé conjointement à l'analyse vidéo.

4. Outil Internet :

La Fédération Française d'Athlétisme, ainsi que la Fédération Internationale d'Athlétisme disposent chacune, d'un site « internet » riche en informations. Ceci nous a permis :

- de retrouver les résultats de l'ensemble des courses enregistrées, avec le nom des athlètes, leur place et leur performance.
- de trouver ensuite, en fin de saison, pour chaque athlète observé, son meilleur temps réalisé dans la saison grâce au « Top-performance », c'est-à-dire le bilan des performances de l'année consultable par épreuves.

5. Balisage :

Sur les épreuves filmées en direct, des plots ont été placés en accord avec l'organisateur, tous les 100 m le long de la piste de 400 m. Cela n'a pas pu se faire lors des grands championnats.

6. Mode de recueil :

Pour les courses vécues en direct, que ce soit au niveau régional ou national, le recueil d'images vidéos a nécessité un investissement important. Plusieurs possibilités ont été envisagées pour obtenir un maximum de données :

- Se rendre sur le site pour filmer une compétition ciblée (championnats / meetings) où les conditions présupposent qu'un ou plusieurs athlètes va ou vont s'approcher de leur meilleur performance de l'année, voire l'améliorer. Mais rien ne peut garantir en amont la qualité de la course : le risque d'assister à une course tactique existe et les conditions météorologiques peuvent être plus ou moins favorables.
- Déléguer le recueil des images à des personnes de confiance. A ce titre, j'ai sollicité l'ensemble des cadres techniques FFA s'intéressant au demi-fond, y compris l'équipe nationale qui suit généralement l'ensemble des meetings nationaux et internationaux organisés sur le territoire.

La personne qui filmait s'est placée :

- soit au centre de la piste, lorsqu'il y avait peu de monde sur le stade, et surtout en absence d'aucun danger (venant des lancers notamment). Ce fût le cas pour les meetings de demi-fond.

- soit à l'extérieur de la piste en contre-haut, de façon à bien suivre l'ensemble de la course.

La caméra était déclenchée avant le commandement « à vos marques », et suivait les athlètes en plan suffisamment large. Lorsque le premier athlète arrivait au plot (repère placé à chaque 100 m), le manipulateur fixait quelques instants l'objectif, de façon à voir passer un maximum de coureur devant ce repère. Ensuite la caméra rattrapait le premier coureur qu'elle suivait jusqu'au plot suivant. Ainsi, lors du dépouillement il est possible d'avoir le profil de course d'un maximum de coureurs ayant pris part à l'épreuve.
Les images vidéos issues de meetings ou championnats télévisées sont des enregistrements stockés sur cassettes « VHS ».

7. Problèmes rencontrés :

Les données peuvent être perturbées par plusieurs facteurs :

- La particularité des courses :

Dans les meetings (et plus particulièrement les meetings nationaux et internationaux), les courses effectuées pour battre un record se déroulent très souvent avec un « lièvre ». Cet athlète choisit par l'organisateur, voire par les athlètes a pour mission de mener et de rythmer l'allure sur la première partie de la course. De ce fait, la course est rapide dés le début et il y a peu de bousculade. En revanche, pour des courses effectuées en championnat, les conditions ne sont pas toujours aussi limpides. Et derrière le ou les athlètes qui mènent, il y a souvent matière à bousculade ou petite gêne, même si à l'arrivée certains améliorent leur record ou réalisent des performances qui en sont proches.

- Les conditions météorologiques :

Un certain nombre de variables ne sont pas maîtrisées, parfois jusqu'au dernier moment comme la température, l'hygrométrie et surtout la force du vent.

- La qualité des images retransmises par la télévision :

Celles-ci ne sont pas toujours utilisables. En effet, au cours de la course, des images de lancer ou de saut peuvent venir s'intercaler et perturber le relevé des temps de passage.

Les athlètes filmés en « paysage », peuvent l'être quelques secondes plus tard en gros plan ou plan large, avec des changements aléatoires, ce qui ne permet plus de voir les repères sur la piste, etc.

C. Variables mesurées :

Les temps de passage ont été recueillis à l'aide du chronomètre (sauf pour quelques courses où le time-code de l'enregistrement vidéo a été utilisé) tous les 100 m d'une course de 1500 m, soit 15 valeurs : T1 à T15 (s).

D. Variables calculées :

1. Temps moyen par 100 m :

Le temps moyen par 100 m a été obtenu en additionnant le temps réalisé sur chaque 100 m et en divisant ce total par les 15 périodes :

TM (s) = (T1 + T2 + T3 + ... + T14 + T15) / 15

2. Pourcentage de la vitesse moyenne par fraction de 100 m :

Sur chaque portion de 100 m, nous avons calculé à quel pourcentage se situait l'athlète par rapport au TM.

% = T1 / TM

.....

% = T15 / TM

E. Analyses statistiques

Une analyse de variance par mesures répétées à un facteur (vitesse) a été réalisée grâce au logiciel « statview ® » (version 5). Les résultats ont été traités globalement, puis analysés par groupe de niveau. $p < 0,05$ est le seuil retenu comme indice de significativité.

II. Résultats de l'étude A :

Quatre groupes d'athlètes ont été constitués en fonction des niveaux de performance observés:

- Groupe M : niveau Mondial < 3 min 35 s, soit les minima pour les JO 2004.
- Groupe N : niveau National < 3 min 45 s, soit les minima pour les championnats de France élite.
- Groupe I : niveau Interrégional 3 min 45 s < performance < 3 min 51 s, soit les minima pour les championnats de France de Nationale.
- Groupe R : niveau Régional < 3 min 59 s, soit une performance de niveau national 3 (niveau défini par la table de cotation des performances établi au plan fédéral).

Le tableau 12 ci-dessous présente le nombre d'athlètes observés par niveau ainsi que le nombre de compétitions que cela représente ; le nombre de 30 nous a paru suffisamment élevé pour éviter que le profil de courses analysé par la suite soit le résultat de la tactique d'une seule épreuve.

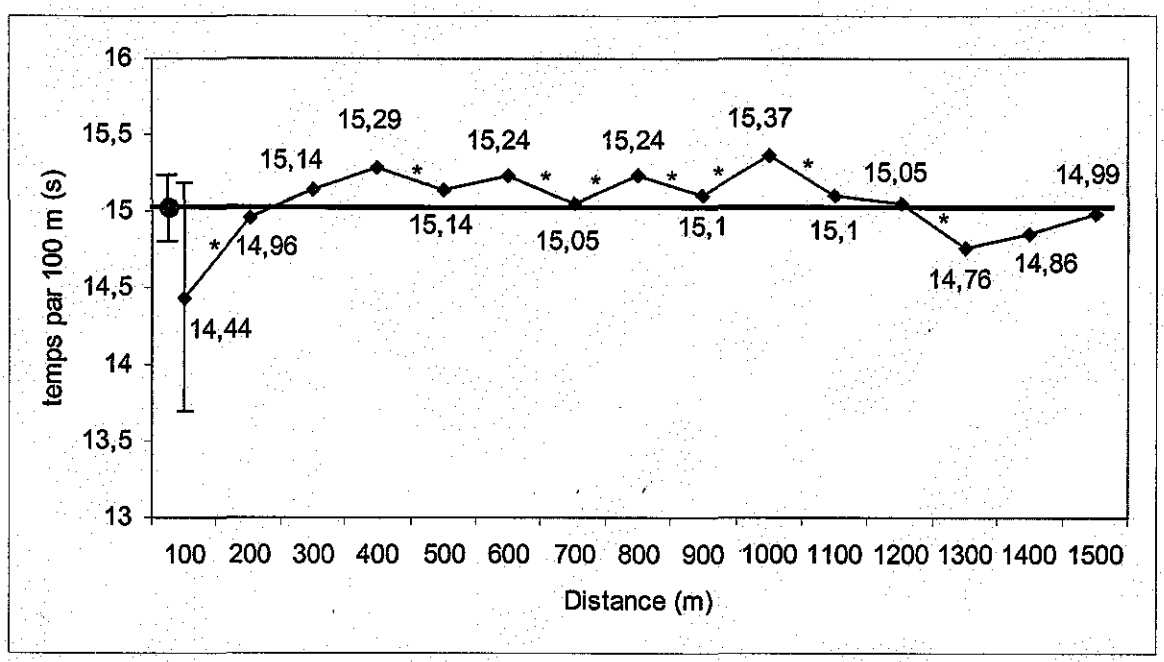
Tableau 12 : nombre d'athlètes et de course observés selon le niveau de pratique.

Niveau	International	National	Interrégional	Régional	TOTAL
Nombre d'athlètes observés	14	9	9	17	49
Nombre de compétitions observées	8	5	7	10	30

A. Analyse globale

Les moyennes 100 m par 100 m ont été calculées pour l'ensemble des 49 courses observées. Le graphique 16 ci-dessous donne le profil général des courses de 1500 m quel que soit le niveau. Les différences significatives qui existent entre deux 100 m consécutifs ont été mises en évidence par un traitement statistique.

Figure 16 : profil général du 1500 m pour tous les niveaux de pratique (vitesse moyenne = 15 s au 100 m).



* : les différences entre deux 100 m consécutifs sont significatives à $p < 0,05$.

Par souci de clarté, seul le premier écart-type a été mentionné. Il est le reflet sur ce graphique de l'hétérogénéité du groupe observé.

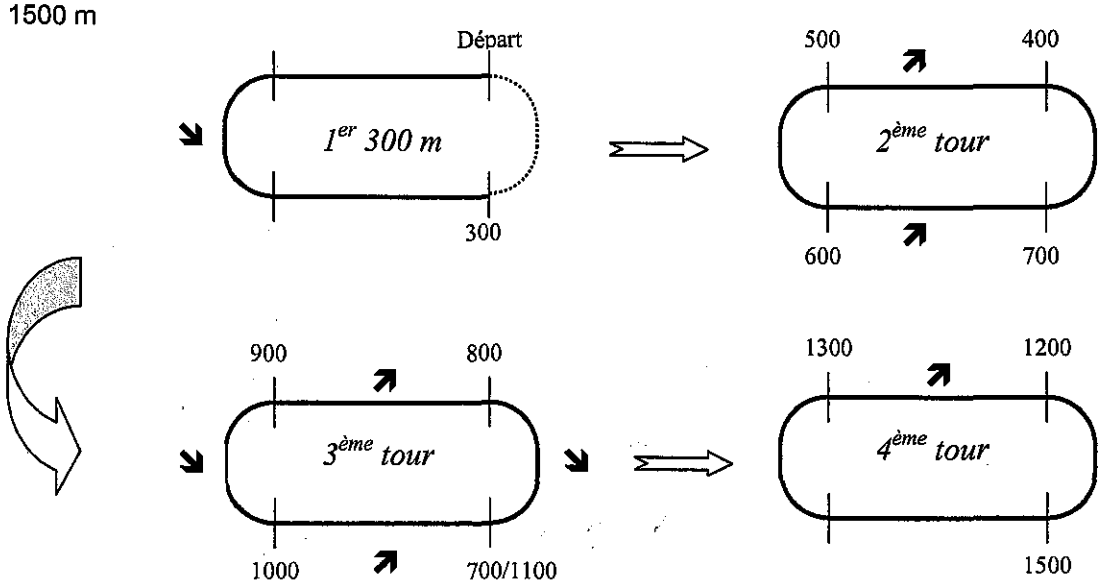
Lorsque l'ensemble des courses est regroupé, l'analyse montre un certain nombre de phases où les athlètes accélèrent et décélèrent (figure 17).

- une chute de vitesse du 100 au 200 m (1er virage), puis du 700 au 800 m (virage), du 900 au 1000 m (virage).
- des accélérations, à des moments clefs, globalement dans les lignes droites :
  - ➔ du 400 au 500 m (dans la ligne droite opposée au bout d'un tour de course),
  - ➔ du 600 au 700 m (dans la ligne droite principale)
  - ➔ du 800 au 900 m (dans la ligne droite opposée)
  - ➔ du 1000 au 1100 m (dans la ligne droite principale)
  - ➔ du 1200 au 1300 m (ligne droite opposée)

Une chute de vitesse significative apparaît entre le premier 100 m et le deuxième 100 m, entre 700 et 800 m, ainsi qu'entre 900 et 1000 m.

Une accélération significative existe entre 400 et 500 m, 600 et 700 m, 1000 et 1100 m, et enfin entre 1200 et 1300 m.

Figure 17 : représentation schématique des changements significatifs de vitesse au cours du 1500 m



↗ : accélération significative ↘ : décélération significative

B. Analyse par niveau :

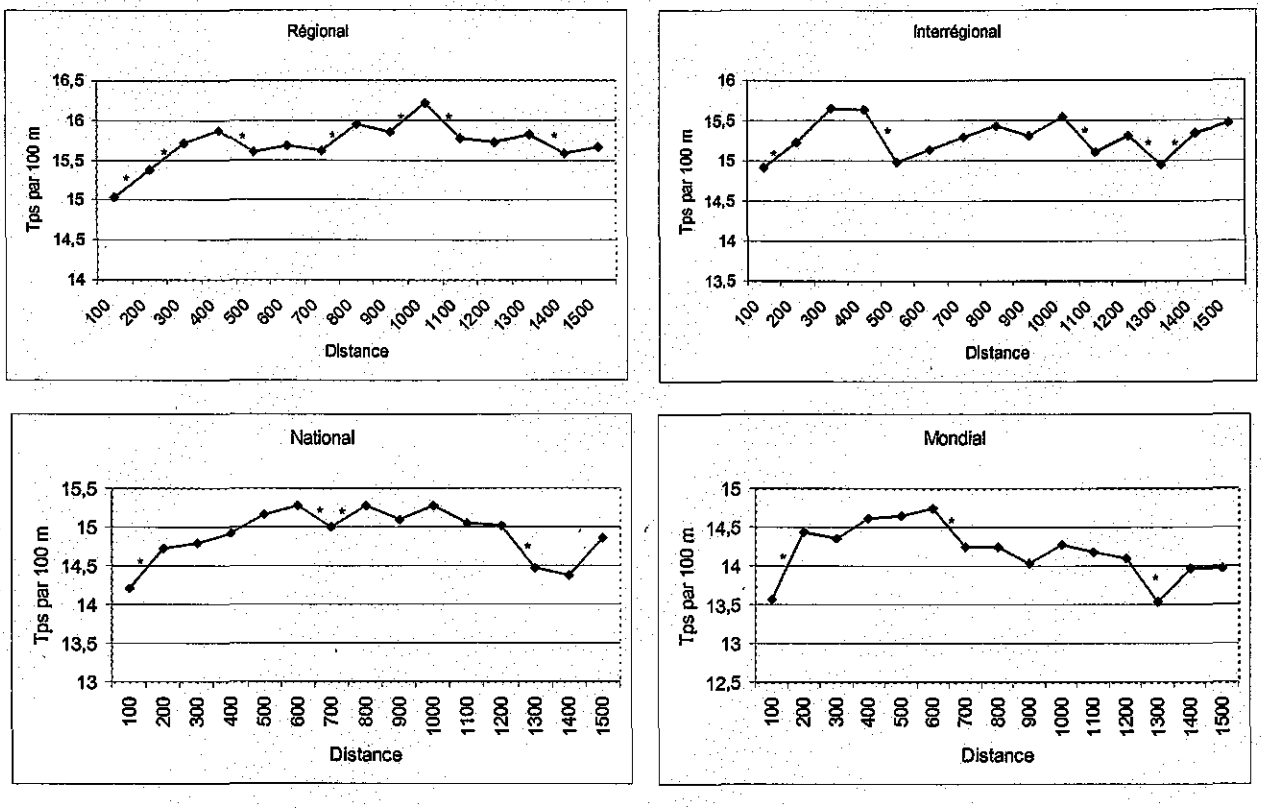
Le tableau 13 ci-après donne pour les quatre groupes définis à partir des courses observées, les moyennes des temps de passage 100 m par 100 m. L'analyse statistique portait sur la différence de vitesse entre deux 100 m consécutifs.

Tableau 13 : différentiel des temps de passage, 100 m par 100 m pour chaque groupe de niveau.

Niveau	Mondial	Vit	National	Vit	Interrégional	Vit	Régional	Vit
0-100 / 100-200	13"56-14"43	↘	14"21-14"73	↘	14"92-15"23	↘	15"03-15"38	↘
100-200 / 200-300	14"43-14"35		14"73-14"79		15"23-15"65		15"38-15"72	↘
200-300 / 300-400	14"35-14"62		14"79-14"92		15"65-15"64		15"72-15"87	
300-400 / 400-500	14"62-14"65		14"92-15"16		15"64-14"98	↗	15"87-15"61	↗
400-500 / 500-600	14"65-14"74		15"16-15"28		14"98-15"14		15"61-15"68	
500-600 / 600-700	14"74-14"24	↗	15"28-15"0	↗	15"14-15"29		15"68-15"62	
600-700 / 700-800	14"24-14"24		15"00-15"27	↘	15"29-15"44		15"62-15"95	↘
700-800 / 800-900	14"24-14"04		15"27-15"09		15"44-15"32		15"95-15"86	
800-900 / 900-1000	14"04-14"28		15"09-15"27		15"32-15"54		15"86-16"21	↘
900-1000 / 1000-1100	14"28-14"18		15"27-15"05		15"54-15"11	↗	16"21-15"77	↗
1000-1100 / 1100-1200	14"18-14"10		15"05-15"01		15"11-15"31		15"77-15"73	
1100-1200 / 1200-1300	14"10-13"54	↗	15"01-14"47	↗	15"31-14"95	↗	15"73-15"82	
1200-1300 / 1300-1400	13"54-13"96		14"47-14"37		14"95-15"35	↘	15"82-15"59	↗
1300-1400 / 1400-1500	13"96-13"97		14"37-14"85		15"35-15"47		15"59-15"66	

Vit : vitesse. ↗ : accélération significative ↘ : décélération significative.

Figure 18 : profil de course du 1500 m du niveau régional au niveau international.



* : la différence est significative à $p < 0,05$. idem que sur figure 16

Lorsque l'étude des résultats est faite par groupe de niveaux, l'analyse des différences 100 m par 100 m montrent des points communs et des divergences selon l'expertise des athlètes (figure 18).

Les principaux points divergents concernent :

- Le premier changement de rythme qui apparaît après le départ :
  Aux niveaux national et mondial, une accélération significative a lieu du 600 au 700 m, soit dans la ligne droite principale. En revanche, pour le niveau régional et interrégional, l'accélération s'opère plus tôt dans la course, entre 400 et 500 m, soit dans la ligne droite opposée, après un tour de course.

- La régularité de la course : au niveau régional, la course est moins stable, des chutes de vitesses significatives peuvent être observées à plusieurs moments dans la course.

➔ Un départ rapide sur 100 m puis une décélération marquée dans les 200 m qui suivent.

➔ Une chute de vitesse significative, du 700 au 800 m, dans le virage (chute observée également au niveau national), puis du 900 au 1000 m dans le virage suivant.

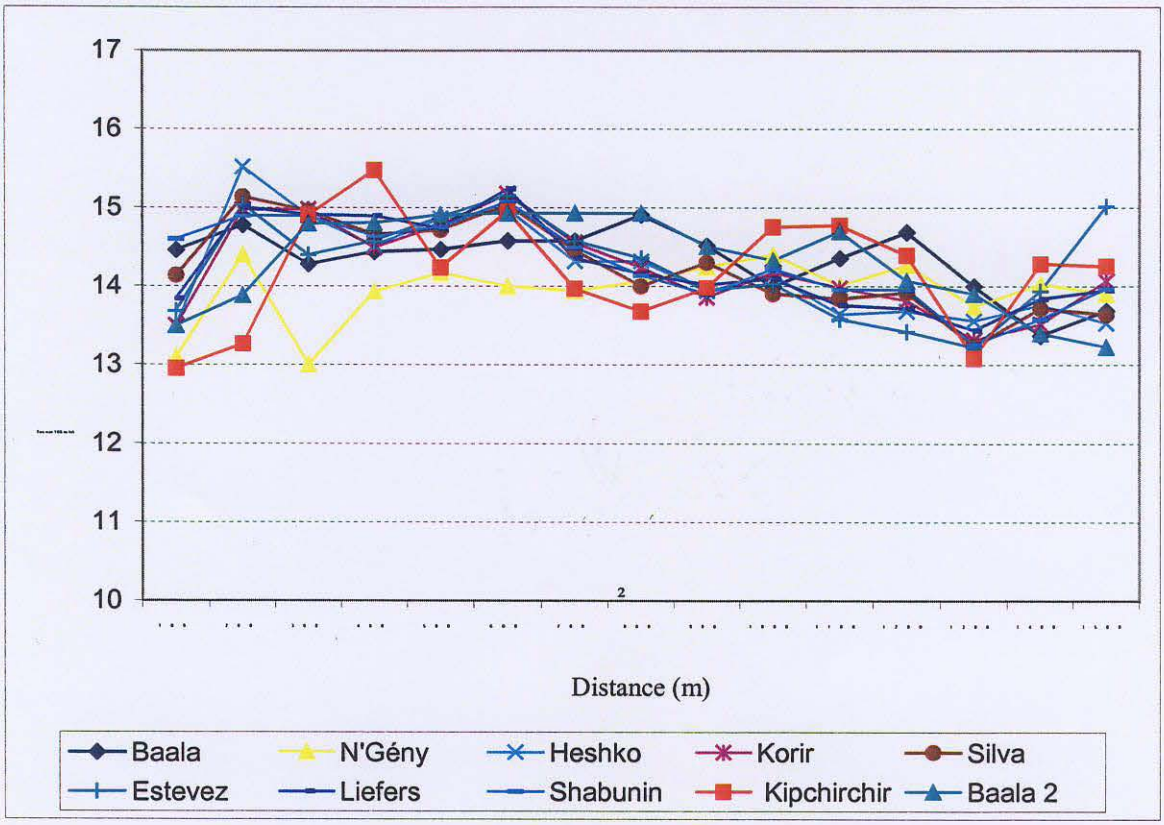
➔ Le niveau régional tend à relancer du 1300 au 1400 m, c'est-à-dire dans le dernier virage, alors que pour le niveau interrégional, la vitesse chute à ce moment.

Quant aux points communs, ils sont résumés ci-dessous :

- Le premier 100 m est toujours le plus rapide et ce, de façon significative, quel que soit le groupe considéré.
- Une décélération dans le second 100 m est ensuite observée, et ce pour tous les niveaux.
- Ensuite, les athlètes retrouvent un rythme relativement régulier.
- Une accélération est notée du 1200 au 1300 m, c'est-à-dire dans la ligne droite opposée (sauf pour le niveau régional, où l'accélération apparaît plus tard). Au niveau mondial, cette accélération était hautement significative ($p < .0001$).
- Puis, lors du dernier 300 m, l'allure se maintient.
- Enfin, globalement, il n'y a pas d'accélération dans la dernière ligne droite, quel que soit le niveau. Ce résultat peut paraître paradoxal à l'impression visuelle laissée par les athlètes, notamment à Haut Niveau. Mais dans ce cas, ce sont souvent des courses de championnats où le déroulement tactique permet la victoire dans l'accélération terminale.

Nous souhaitions néanmoins vérifier dans le groupe d'athlètes de niveau mondial, si les profils individuels de course confirmait la tendance générale du groupe (maintien de la vitesse). La figure 19 ci-dessous illustre quelques données en notre possession concernant le niveau mondial.

Figure 19 : profil de course pour 10 athlètes courant le 1500 m en moins de 3 min 35 s.



L'observation des courbes individuelles permet de mettre en évidence un profil de course relativement similaire : la majorité des athlètes accélèrent à partir de 1100 m ou de 1200 m, puis maintiennent leur vitesse jusqu'à la fin de course avec néanmoins des nuances.

III. Discussion et conclusion :

L'étude des profils de course avait pour but de définir une répartition de l'effort à préconiser aux athlètes qui courent le 1500 m en vue d'obtenir la meilleure performance possible. Il ressort de ces observations que plus le niveau est faible, plus le modèle de répartition de l'effort est variable. La répartition de l'effort est plus stable au niveau national et international. La présence d'un lièvre, ainsi que l'expertise sur la distance rendent probablement la course plus fluide. De ce constat, nous avons pris la décision pour la suite de notre étude de nous appuyer sur le profil des athlètes de niveau mondial et national, soit sur 23 athlètes. Aussi, les pourcentages par rapport à la vitesse moyenne de course ont été calculés 100 m par 100 m, pour chaque athlète.
La moyenne des valeurs obtenues a été faite et figure ci-après :

Tableau 14 : Répartition de l'effort par rapport à la vitesse moyenne pour les 23 sujets de niveau mondial et national.

100 m	104,6 %
200 m	99,5 %
300 m	99,4 %
400 m	97,9 %
500 m	97,3 %
600 m	96,8 %
700 m	99,6 %
800 m	99 %
900 m	100 %
1000 m	99 %
1100 m	100,6 %
1200 m	100,5 %
1300 m	104,6 %
1400 m	102,6 %
1500 m	101,2 %

Mais donner des repères 100 m par 100 m, apparaît bien trop rigide et manque de cohérence par rapport aux réalités de terrain. Aux vues des résultats de nos observations sur le 1500 m à tous les niveaux, un point remarquable et commun à tous, est sans conteste le premier 100 m, qui reste le plus rapide de

toute l'épreuve. C'est pourquoi, il semble important de le distinguer. Le 1500 m peut alors découper en 5 phases : 100 + 200 + 400 + 400 + 400 ou plus simplement en 3 : 100 + 1000 + 400.

Le modèle de répartition de l'effort préconisé peut se résumer au plan des intentions, de la façon suivante :

- un départ soutenu sur 100 m,
- puis une allure stable pendant 1000 m
- une accélération du 1200 au 1300 m
- puis résister.

Pour résumé, le tableau 15 ci-dessous donne la répartition de l'effort préconisée en fonction de la vitesse moyenne selon les deux découpages cités précédemment.

Tableau 15 : répartition théorique de l'effort sur 1500 m.

Découpage du 1500 m	Pourcentage par rapport à la vitesse moyenne	Fraction du 1500 m	Pourcentage par rapport à la vitesse moyenne
100 m	105 %	100 m	105 %
200 m	99 %	1000 m	98 %
400 m	97 %		
400 m	99 %		
400 m	102 %	400 m	102 %

Ainsi, par exemple, si le niveau de l'athlète au 1500 m est estimé à 4 minutes, le tableau de marche qui lui sera proposé s'appuiera sur ces pourcentages et sur la vitesse moyenne (soit 16 s au 100 m et 6,25 m/s) :

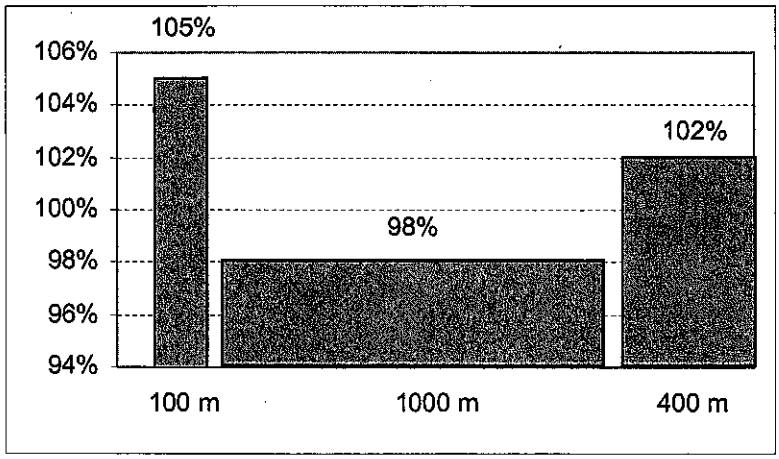
Tableau 16 : illustration du modèle pour un athlète d'une valeur de 4 minutes au 1500 m.

Fraction du 1500 m	Pourcentage par rapport à la vitesse moyenne	Temps à réaliser
100 m	105 %	15 s
1000 m	98 %	2 min 42 s
400 m	102 %	63 s

Il faudra bien rappeler que dans le dernier 400 m à 102 %, l'accélération se fait notamment du 1200 au 1300 m. Bien entendu, ces chiffres ne sont que des points de repères pour l'athlète et la bicyclette qui imposera l'allure.

En conclusion, l'analyse de 1500 m du niveau régional au niveau mondial, nous a permis de souligner que le contexte des courses régionales et interrégionales et/ou la moindre expertise des athlètes donnent des profils de course plus fluctuants d'un athlète à l'autre. En revanche, les athlètes d'un niveau plus confirmé semblent pouvoir nous offrir une répartition plus homogène. Nous nous sommes appuyés sur ces données pour proposer un modèle de répartition de l'effort pour l'étude qui va suivre.

Figure 20 : représentation graphique du profil de course proposé pour des athlètes de haut niveau.



Partie 3 : Etude des paramètres physiologiques et biomécaniques au cours du 1500 m

I. Méthodologie

A. Population étudiée

1. Caractéristiques biométriques :

11 athlètes volontaires (22,6 ± 4,7 ans) ont participé à cette étude. Ces jeunes sportifs ayant accepté le principe de l'évaluation, ont été choisis parmi les meilleurs athlètes régionaux de Provence. Un seul d'entre eux habitant en Ile de France a été testé sur Paris. Ces athlètes s'entraînaient tous régulièrement au moment de l'étude (5 à 10 fois par semaine).

Le poids de chaque athlète a été recueilli à l'aide d'un pèse-personne (TFX 30, Terraillon), placé sur support dur, type béton.

Les caractéristiques moyennes des sujets figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 17 : caractéristiques biométriques des sujets testés.

	Age (an)	Taille (cm)	Poids (kg)
Moyenne et Ecart-Type	22,6 ± 4,7	175,3 ± 4,5	64,8 ± 4,3

Ils ont été préalablement informés ainsi que leur entraîneur du contenu de l'évaluation. Sur place, ils ont reçu un descriptif du protocole des deux tests auxquels ils ont été soumis. Suite à cette information, tous nous ont donné leur consentement par écrit. Deux sessions expérimentales ont dû être mises en place et un des athlètes (ED) a accepté de réaliser sur ces deux périodes le test sur 1500 m.

2. Caractéristiques sportives :

Le niveau des athlètes participant à notre étude apparaît au travers de leurs meilleures performances réalisées en compétition (tableau 18) :

Tableau 18 : caractéristiques individuelles et principaux records des sujets de l'étude.

				Records				
Sujets	Age	Taille (cm)	Poids (kg)	800 m	1000 m	1500 m	3000 m	5000 m
G N	25	177	63	1min55s	2min27s	3min47s	8min08s	14min07s
N Z	19	173	65			4min08s		
K M	19	178	70	1min52s	2min32s	4min05s		
M D	20	168	58	1min53s	2min28s	4min11s		15min20s
K A	32	172	61	1min50s		3min50s		
L K	19	174	68	1min52s		3min47s		
A A	20	176	63	1min52s		3min43s	8min04s	13min53s
E D	20	181	67	1min56s	2min32s	3min56s	8min45s	
B K	22	181	66	1min53s		3min58s		
B H	31	169	60		2min37s	4min08s	8min28s	
DN	22	179	72	1min49s		3min52s		

B. Matériels et techniques de mesures.

1. Appareil de mesure portable des gaz expirés :

Les mesures ont été réalisées par l'intermédiaire du système K4 RQ (Cosmed, Rome, Italie). Cet appareil portatif pèse environ 700 g. Il permet de mesurer par télémétrie, les paramètres ventilatoires sur le terrain.

Le débit ventilatoire (VE), la fréquence respiratoire (FR), le volume courant (VT), la consommation d'oxygène (VO_2), et la production de gaz carbonique (VCO_2) ont été enregistrés en continu au cours des différents tests.

Les valeurs obtenues sont des valeurs moyennées toutes les 5 secondes. Avant chaque expérimentation, les analyseurs de gaz étaient étalonnés et calibrés à partir de l'air ambiant et de valeurs de références (pour l'O_2 : 20,93% et pour le CO_2 : 0,03%). La pression barométrique ainsi que l'humidité ambiante ont été prises en compte.

Pour déterminer la concentration en oxygène, une électrode polarographique mesure la fraction en oxygène (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 de la fraction en dioxyde de carbone (CO_2) dans l'air expiré ($FECO_2$), le K4 utilise une électrode à infrarouge. Ces deux gaz étaient mesurés dans des conditions

Tableau 18 : caractéristiques individuelles et principaux records des sujets de l'étude.

				Records				
Sujets	Age	Taille (cm)	Poids (kg)	800 m	1000 m	1500 m	3000 m	5000 m
G N	25	177	63	1min55s	2min27s	3min47s	8min08s	14min07s
N Z	19	173	65			4min08s		
K M	19	178	70	1min52s	2min32s	4min05s		
M D	20	168	58	1min53s	2min28s	4min11s		15min20s
K A	32	172	61	1min50s		3min50s		
L K	19	174	68	1min52s		3min47s		
A A	20	176	63	1min52s		3min43s	8min04s	13min53s
E D	20	181	67	1min56s	2min32s	3min56s	8min45s	
B K	22	181	66	1min53s		3min58s		
B H	31	169	60		2min37s	4min08s	8min28s	
DN	22	179	72	1min49s		3min52s		

B. Matériels et techniques de mesures.

1. Appareil de mesure portable des gaz expirés :

Les mesures ont été réalisées par l'intermédiaire du système K4 RQ (Cosmed, Rome, Italie). Cet appareil portatif pèse environ 700 g. Il permet de mesurer par télémétrie, les paramètres ventilatoires sur le terrain.

Le débit ventilatoire (VE), la fréquence respiratoire (FR), le volume courant (VT), la consommation d'oxygène (VO_2), et la production de gaz carbonique (VCO_2) ont été enregistrés en continu au cours des différents tests.

Les valeurs obtenues sont des valeurs moyennées toutes les 5 secondes. Avant chaque expérimentation, les analyseurs de gaz étaient étalonnés et calibrés à partir de l'air ambiant et de valeurs de références (pour l'O_2 : 20,93% et pour le CO_2 : 0,03%). La pression barométrique ainsi que l'humidité ambiante ont été prises en compte.

Pour déterminer la concentration en oxygène, une électrode polarographique mesure la fraction en oxygène (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 de la fraction en dioxyde de carbone (CO_2) dans l'air expiré ($FECO_2$), le K4 utilise une électrode à infrarouge. Ces deux gaz étaient mesurés dans des conditions

standards de température et de pression atmosphérique (STPD). Le prélèvement d'oxygène est alors calculé selon la formule suivante :

$$VO_2 (STPD) = VE (STPD) \times \{[((1- (FEO_2+FECO_2))/(1-FIO_2)) \times FIO_2] - FEO_2\}$$

Les masques sont équipés d'une turbine de 28 mm de diamètre. Cette turbine était calibrée avant chaque expérience grâce à une seringue de 3 l (Hans Rudolph, Inc). La rotation de la turbine est mesurée par un système opto-électronique qui compte le nombre de révolutions par seconde. Selon le constructeur, cet appareil peut mesurer des débits ventilatoires compris entre 4 et 250 $l.min^{-1}$. Les masques employés actuellement limitent les risques de fuite d'air et permettent de respirer avec la bouche. Il existe trois tailles de masque, ce qui permet à chaque athlète d'effectuer le test dans de bonnes conditions.

2. Cardiofréquencemètre

La fréquence cardiaque (FC) a été enregistrée en utilisant une unité Polar (X-trainer +, polar Vantage, Kempele, Finlande).
FC a été mesurée en continu toutes les 5 secondes. A la fin de chaque test, les informations stockées sur le rythme cardiaque ont été transférées sur ordinateur. Un logiciel spécifique a permis de récupérer les données pour y être analysées, puis de les présenter sous forme de graphes dans les résultats.

3. Appareil de mesure de la lactatémie.

L'analyseur de lactate (lactate pro, Inceltech, SGI, Toulouse) utilisé est un appareil de type Microzym-L. Il permet de déterminer en direct la concentration sanguine de lactate par dosage enzymatique.

4. Camescope et magnétoscope :

Deux camescopes numériques (Sony, DCR PC) ont été utilisés. Les images ont ensuite été copiées sur une cassette VHS, pour être ensuite analysées sur un magnétoscope (Sony, SLV-SE 840) possédant les fonctions « ralenti » et « image par image ».

C. Protocole expérimental

Deux évaluations ont été réalisées à quelques jours d'intervalle.

- Une épreuve réalisée sur piste, destinée à déterminer VO_2 max, la vitesse maximale aérobie (VMA) et l'évolution de la lactatémie.
- Une épreuve spécifique réalisée également sur la piste : un 1500 m

Les valeurs moyennes de températures étaient de 20,2 ± 2,3° et 17,0 ± 3,0° pour le test TUB2 et le test sur 1500 m, respectivement.

Et l'hygrométrie a été mesurée à 27,3 ± 7,8 % et 70,3 ± 16,2 % pour le test TUB2 et le test sur 1500 m respectivement.

1. L'épreuve de détermination de VO_2max :

Le test utilisé est le TUB2 validé par l'université de Bordeaux II (CAZORLA et LEGER, 1993). Les paliers sont de 3 minutes, séparés par 1 minute de récupération. La piste de 400 m est étalonnée tous les 25 m par des plots. A chaque palier, l'allure est imposée par un appareil émettant des bips sonores. Le départ est toujours donné d'un plot, et à chaque bip le coureur doit se trouver au niveau du plot suivant. La fréquence des signaux sonores augmente à chaque palier avec l'augmentation de la vitesse. Le début du test a été fixé en accord avec les athlètes à 14 $km.h^{-1}$. L'incrémentation était de 2 $km.h^{-1}$ jusqu'à 20 $km.h^{-1}$, puis de 1 $km.h^{-1}$ au delà. Lorsque l'athlète n'était plus capable de suivre l'allure imposée, l'épreuve était terminée. La valeur de VO_2max obtenue sur ce test sera appelée : « VO_2maxTUB2 ».

Les critères utilisés pour déterminer VO_2max étaient ceux retenus par LACOUR et FLANDROIS (1977) et présentés dans la littérature par MAC MIKEN et DANIELS (1976) :

- Un plateau de VO_2 malgré l'augmentation de la vitesse de course.
- Un quotient respiratoire (QR) > à 1,1.
- Une FC > 90% de la FC maximale théorique (220 – âge).
- Une concentration sanguine de lactate supérieure à 8 $mmol.l^{-1}$ (JOUSSELIN et LEGROS, 1990).

Nous avons retenu comme valeur finale de VO_2max, la moyenne des 3 valeurs les plus élevées de VO_2 et enregistrées de façon consécutive (15 s). VO_2max a été obtenue dans la plupart des cas lors du dernier palier, mais parfois lors de

l'avant-dernier (n = 1). La VMA correspondait au 1er palier où VO_2max était atteint. C'était souvent la vitesse maintenue lors du dernier palier effectué en totalité par le coureur. Cette VMA a été utilisée dans l'expression relative de la vitesse au cours du 1500 m (% VMA).

Par ailleurs, le test TUB2 a permis de relever un échantillon de sang à chaque palier au cours des périodes de récupération de 1 min. Ainsi des indications de lactatémie peuvent être données pour chaque vitesse sous-maximale. Le seuil anaérobie a pu être estimé et donné en retour aux entraîneurs.

2. L'épreuve du 1500 m.

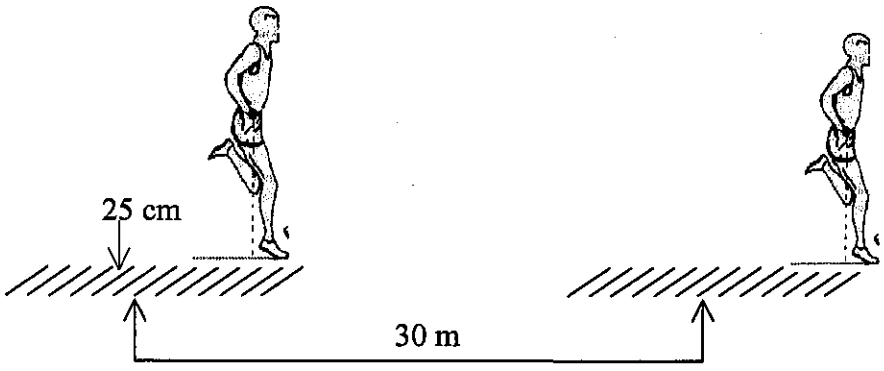
Il s'agissait d'une course de 1500 m courue dans un objectif de performance, soit une simulation individuelle de ce qui se passe en compétition.

a. Marquage au sol

Des plots répartis tous les 50 m ont servi de repères à l'athlète pendant la course où les temps intermédiaires étaient donnés, et pour l'exploitation des images à postériori.

Des lattes ont été mises en place sur le sol dans les couloirs voisins, afin de pouvoir ensuite étudier la fréquence et l'amplitude des foulées dans un intervalle choisi de 30 m dans la ligne droite d'arrivée.

Deux zones ont ainsi été étalonnées : 13 lattes étaient disposées à 25 cm d'écart (délimitant 12 intervalles), de part et d'autres (6 + 6) des 2 points délimitant la zone de 30 m. Le schéma ci-dessous illustre l'installation.



b. Organisation et réglage des caméras

Deux personnes placées sur le terrain central ont été en charge des deux camescopes :

- La première personne a filmé les athlètes sur une distance de 50 m, délimitée dans la ligne droite d'arrivée et encadrant les 30 m balisés.
- La seconde personne a suivi les athlètes en vision panoramique sur l'intégralité de leur 1500 m.

Le premier camescope positionné sur un pied pour plus de stabilité était configuré en mode manuel. La mise au point a été faite en position téléobjectif maximale. Le « shutter » ou vitesse d'obturation était réglé à 1/120ème de seconde pour filmer des scènes rapides image par image, et donnait des enregistrements stables à la lecture au ralenti.
Le second camescope était configuré pour filmer le 1500 m en mode automatique et le zoom a été utilisé pour agrandir l'image.
Dans les deux cas, le « time code » a été déclenché. Le time-code est un repérage numérique qui donne le nombre d'images enregistrées au cours d'une séquence. L'affichage est sous la forme : « 12 : 34 : 15 »

- 12 minutes,
- 34 secondes,
- 15 images.

Sachant qu'il y a 25 images par secondes, il est facile ensuite de calculer le temps entre deux séquences lors du dépouillement. Dans notre exemple, si le départ est à 0 : 00 : 00, et l'arrivée à 12 : 34 : 15, il y a (12 x 60 s + 34 s) X 25 + 15 = 2650 images ; 2650 / 25 s = 18865 s soit 12 minutes 34 secondes 61 centièmes. Lorsque le code d'entrée est différent de 0, il suffit de faire la différence entre le nombre d'images.

c. Procédure expérimentale

L'échauffement a été globalement standardisé. Une certaine liberté quant aux allures et aux exercices choisis a cependant été laissée aux athlètes. Ceux-ci avaient pour consigne de réaliser 20-25 minutes de course à allure libre, puis de s'étirer et de faire des gammes spécifiques de courses,

avant de terminer sur 3 x 150 m sur l'allure spécifique du 1500 m. Une période de repos de 4 minutes entre la dernière accélération et le départ du 1500 m a été imposée aux athlètes.

Pour chaque athlète un projet de course a été établi en tenant compte de deux paramètres majeurs :

- le niveau du moment évalué par l'athlète et son entraîneur.
- une répartition de l'effort jugée optimale au vue des résultats obtenus et du modèle proposé dans l'étude A préalable.

Le contrôle de la vitesse :

La vitesse de course choisie a été contrôlée à la fois par des coups de sifflets calés sur un tableau de marche 100 m par 100 m, ainsi que par un expérimentateur sur bicyclette, placé devant l'athlète dans les virages et à côté dans les lignes droites. Par ailleurs, celui-ci, outre sa mission de rythmer l'effort, encourageait et motivait l'athlète afin que la simulation soit la plus proche possible de l'effort du 1500 m produit en compétition, et ce jusqu'à la ligne d'arrivée franchie. Par rapport à ce projet théorique, nous pouvions nous attendre à deux types de comportement en fin de course. En effet, suivant la forme et la motivation du jour, et les erreurs dans l'estimation du niveau, certains athlètes ont été capables d'accélérer en fin de course, alors que d'autres ont seulement résisté à la chute de vitesse, voire même ont ralenti dans les derniers mètres. Le constat fait au cours de la première session expérimentale nous a conduit à orienter légèrement les prévisions chronométriques de notre seconde session pour composer deux groupes équilibrés que nous pourrons comparer :

- des athlètes capables d'accélérer formant arbitrairement le groupe A
- et des athlètes qui maintiennent leur vitesse ou qui ralentissent, constituant le groupe B.

Les paramètres mécaniques :

Toutes les épreuves ont été filmées pour observer et mesurer ultérieurement l'évolution de la vitesse au fil de la course, et analyser l'amplitude et la fréquence des foulées à chaque tour.

Les paramètres physiologiques :

Les échanges gazeux ont été enregistrés pendant la totalité de l'épreuve. Quelques gouttes de sang ont été prélevées au lobe de l'oreille, juste avant le départ du 1500 m, à la fin de celui-ci, puis aux 3, 5, 7, 10 minutes de récupération, ceci dans le but d'obtenir le pic de lactatémie. Le sujet n'a effectué sa récupération qu'à l'issue de ces prélèvements.

D. Variables mesurées

1. *Variables physiologiques :*

- VMA,
- VO_2max,
- évolution de FC,
- évolution des échanges gazeux (VO_2, VCO_2, VE, VT, FR),
- évolution de la lactatémie à l'issue du 1500 m.

2. *Variables biomécaniques :*

Les images filmées ont été enregistrées sur une cassette VHS, pour être ensuite analysées sur le magnétoscope. Le time-code a pu être relevé sur chaque passage important. Le ralenti a été utilisé pour compter le nombre de foulées. La fonction image par image a permis d'établir de façon précise les temps de passage tous les 50 m.

a. L'amplitude (Ampl) :

Le nombre de foulées dans l'intervalle de 30 m a été comptabilisé. Une distance plus précise (d) entre la pose d'appui de la première foulée, en entrée de zone et la pose d'appui de la dernière foulée a pu être appréciée grâce aux repères posés au sol. L'amplitude était ensuite calculée de la manière suivante :

➔ **Ampl (m) = d / nombre de foulées**

Ainsi si l'athlète effectue 31 m et 15 foulées, son amplitude moyenne dans l'intervalle considéré est de 31 / 15 = 2,07 m (le résultat est arrondi à 2 chiffres après la virgule).

b. La vitesse (V) :

La vitesse moyenne dans cet intervalle a été calculée grâce aux valeurs du time-code. Celui-ci a été relevé au moment où le pied prend appui au sol en entrée de zone, puis au moment où il prend appui au sol en sortie de zone. Le nombre d'images a été déterminé entre ces deux poses d'appui. Sachant que l'appareil enregistre 25 images par seconde, nous avons pu déterminer le temps (T) pour effectuer la distance d. La vitesse était alors calculée de la manière suivante :

➔ **Vitesse ($m.s^{-1}$) = d / T**

c. La fréquence (Fréq) :

La fréquence est un nombre de foulées par unité de temps. Elle résulte du calcul suivant : V ($m.s^{-1}$) = Ampl (m) X Fréq (Hz)

Connaissant les 2 facteurs V et Ampl, nous avons déterminé la fréquence.

➔ **Fréq (Hz) = V ($m.s^{-1}$) / Ampl (m)**

E. Expression des résultats et variables calculées :

1. Expression des résultats obtenus lors du 1500 m :

- Les valeurs des différentes variables pour l'ensemble du groupe sont exprimées par la moyenne ± l'erreur standard sur la moyenne ou écart-type (ET).

- Les performances chronométriques des 12 athlètes lors du 1500 m étant sensiblement différentes (comprises entre 235 à 270 s), les résultats ont été normalisés en fonction de la distance ; ceci afin d'obtenir le même nombre de mesures par athlète pour toutes les variables mesurées (vitesse, VO_2, FR, VE, VT, FC).

- Les variables physiologiques ont également été exprimées en pourcentage de leur valeur maximale, de façon à faciliter les comparaisons concernant leur évolution.

- La vitesse sur 1500 m a été exprimée en pourcentage de la vitesse moyenne de l'épreuve, mais également en pourcentage de la VMA des athlètes.

2. *La constante de temps du métabolisme aérobie (τ) :*

Pour chaque sujet, nous avons modélisé sous « excel ® », la cinétique de VO_2 par une courbe exponentielle simple de type :

$VO_2(t) = VO_{2\,base} + A.(1-e^{-(t/\tau)})$

où :

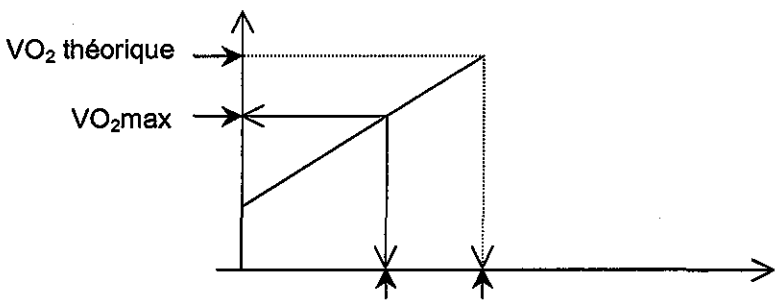
- $VO_2(t)$ est la VO_2 au temps t,
- $VO_{2\,base}$ correspond à VO_2 en fin d'échauffement,
- A est l'amplitude asymptotique de la cinétique de VO_2 ($VO_2 - VO_{2\,base}$),
- τ est la constante de temps.

Cette modélisation nous a permis de déterminer pour chaque sujet, une constante de temps τ et un $T_{1/2}$ égal à 0,693 x τ.

Pour éviter une erreur dans l'estimation de τ pour les sujets dont VO_2 chute en fin d'exercice (ce qui entraîne un changement dans l'asymptote), la modélisation a été réalisée après observation des profils individuels en enlevant les 30 dernières secondes de l'exercice (Temps d'exercice – 30").

3. *Le déficit en O_2 :*

Le calcul a été réalisé selon la méthode préconisée par MEDBO et al. (1988). Dans le cadre de cette expérimentation, ce calcul a consisté à effectuer la différence entre VO_2 théorique (détermination du VO_2 requis) à chaque vitesse supra-maximale et VO_2 consommé, et ce, tous les 50 m. VO_2 théorique requis est déterminée à partir de la droite de régression VO_2 / vitesses sous-maximales.



VMA Vmoy1500

VO_2 requis = VO_2 théorique à la vitesse moyenne du 1500 m (Vmoy1500).

F. Traitement statistique

Les différentes évolutions des valeurs de VO_2, VE, VT, FR et FC au cours du 1500 m ainsi que les évolutions par tour de la fréquence et de l'amplitude des foulées ont été étudiées par une analyse de variance à mesures répétées à un facteur (ANOVA, logiciel Stat View 5.0, SPSS, USA).

Un test t de student a permis de comparer le groupe des bons et des mauvais finisseurs sur chacun de ces paramètres. Par ailleurs, une étude de corrélation linéaire (Bravais-Pearson) a été faite entre la vitesse sur 1500 m et la performance des sujets, puis entre les delta vitesse et les delta VO_2 à des moments distincts du 1500 m.

$p < 0,05$ a été retenu comme seuil de significativité.

II. Résultats de l'étude B

A. Test triangulaire TUB2 :

1. *Caractéristiques physiologiques des athlètes :*

Les principaux résultats obtenus à l'issue du test de détermination de VO_2max figurent ci-dessous.

Tableau 19 : moyennes ± ET des paramètres déterminés au cours du test progressif.

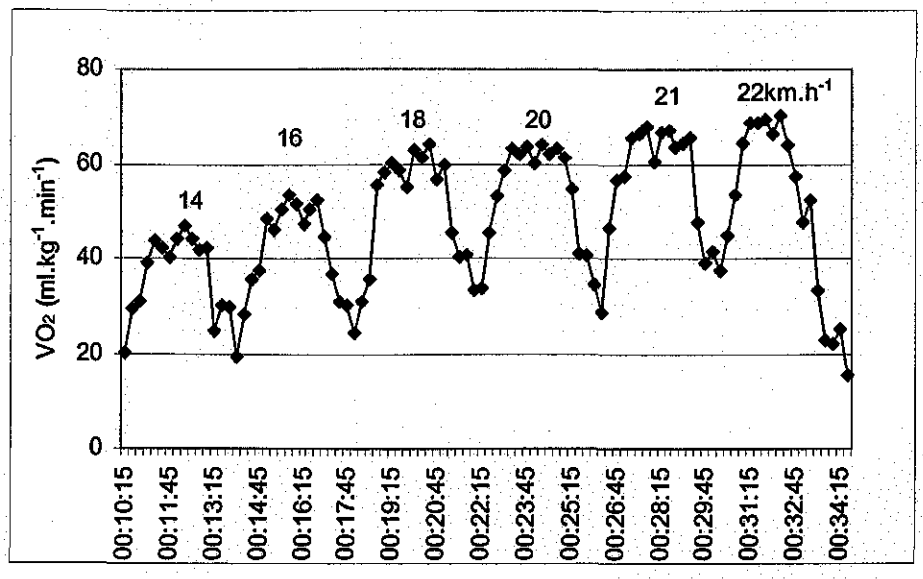
Vitesse au seuil ($km.h^{-1}$)	Seuil anaérobie (en % VMA)	FC au seuil ($batt.min^{-1}$)	$VO_2maxTUB2$ ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	VMA ($km.h^{-1}$)	FC à VMA ($batt.min^{-1}$)	Lact max ($mmol.l^{-1}$)
17,0 ± 0,9	85,4 ± 4,3	175,3 ± 11,2	64,2 ± 7,5	20,3 ± 0,6	195,3 ± 6,5	12,4 ± 1,6

Les critères d'atteinte de VO_2max ont été respectés. Le niveau des caractéristiques physiologiques de ce groupe est représentatif d'une population de coureurs de demi-fond entraînés (BRANDON et al. 1995).

Pour chaque athlète, l'évolution de VO_2 en fonction de la vitesse a été enregistrée. Parallèlement, l'évolution de la lactatémie en fonction de la vitesse a été tracée pour chaque athlète, afin de déterminer la vitesse correspondante au seuil anaérobie.

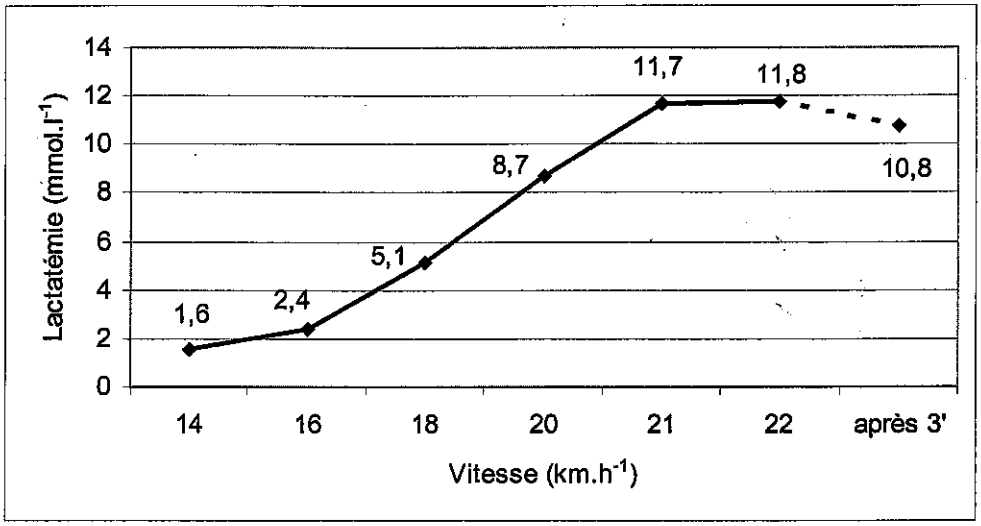
Ci-après (cf. figure 21), le résultat du test est présenté pour un des athlètes du groupe.

Figure 21 : Illustration de la cinétique de VO_2 ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$) pour un des athlètes (DN).



La VMA correspond au premier palier où VO_2max est atteint (moyenne des 3 valeurs consécutives les plus élevées). Dans le cas présent, elle a été évaluée à 22 $km.h^{-1}$. Parallèlement, l'évolution de la lactatémie a été tracée pour chaque athlète permettant de repérer la vitesse au seuil anaérobie.
Pour le même sujet, nous présentons l'évolution de la lactatémie.

Figure 22 : Evolution de la lactatémie au cours du TUB2, pour le même sujet qu'en figure 21.



B. Le 1500 mètres

1. *Performances réalisées et profil de course*

a. Observations concernant l'ensemble du groupe

Les résultats chronométriques obtenus au cours du 1500 m sur piste figurent ci-dessous (cf. tableau 20):

Tableau 20 : Moyennes ± ET des performances et vitesses réalisées sur le 1500 m.

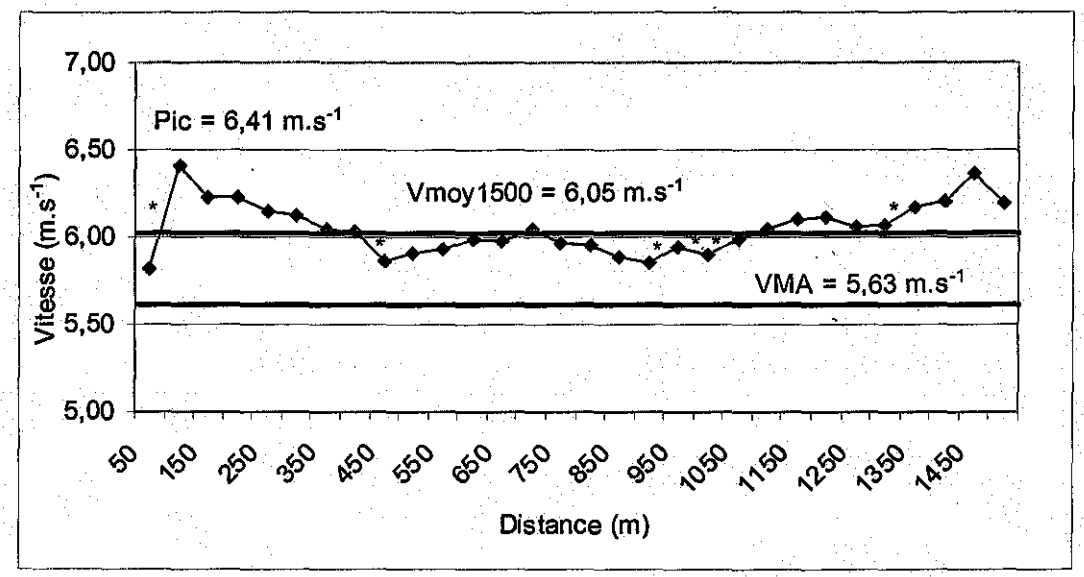
Record des sujets sur 1500 m (s)	Performance chronométrique du 1500 m (s)	Vitesse moyenne du 1500 m test		Vitesse du 1500 test en % de VMA
		(en $m.s^{-1}$)	(en $km.h^{-1}$)	
236,8 ± 9,9	248,6 ± 9,2	6,0 ± 0,2	21,8 ± 0,8	**107,6 ± 2,0**

L'écart moyen au record est de 11,5 ± 8,9 s. Il s'agissait bien d'une épreuve supra-maximale car la vitesse moyenne de ce test (21,8 ± 0,8 $km.h^{-1}$) correspond à 107,6 ± 2,0 % de VMA (20,3 $km.h^{-1}$).

Pour ce groupe de sujets, la performance sur 1500 m était fortement corrélée avec VMA ($r^2 = 0,73$; $p < .0001$).

L'évolution moyenne de la vitesse au cours de l'épreuve du 1500 m est illustrée ci-dessous (cf. figure 23).

Figure 23 : évolution de la vitesse 50 m par 50 m au cours du 1500 m pour l'ensemble du groupe.



* : la variation de vitesse entre deux 50 m consécutifs est significative à $p < 0,05$

L'observation de ce profil montre que la vitesse sur 1500 m n'était pas régulière. Un pic de vitesse était atteint au bout de 100 m (soit la fin de la première ligne droite), et était nettement supérieur à la vitesse moyenne de l'épreuve ; puis la vitesse chutait progressivement, mais restait en permanence au dessus de VMA, même en fin d'épreuve.

Des moments statistiquement significatifs de décélération apparaissaient du 300 au 500 m. Ainsi que des moments d'accélération, du 900 au 1000 m et du 1300 au 1400 m.

L'analyse pour l'ensemble du groupe des trois phases définies lors de notre étude A préalable, montre la répartition suivante :

- un premier 100 m couru à **100,7 ± 3,7 %** de la vitesse moyenne de course.
- le 1000 m suivant à **99,2 ± 1,5 %**
- le dernier 400 m à **101,7 ± 3,9 %**

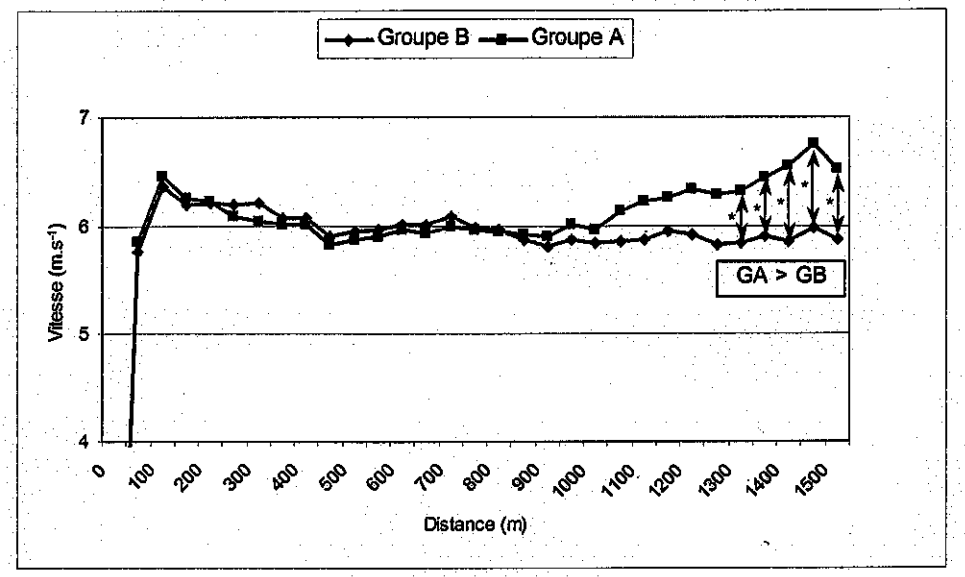
- Pour l'ensemble du groupe, le premier 100 m est un peu lent : 100,7% pour 104,6 % prévu dans notre modèle. Trois athlètes (BH, KM, et NZ) seulement ont respecté l'allure dans le premier 100 m, un seul (GN) est parti trop vite, et les autres plus ou moins lentement. Il est possible que le stress du test et le port du système de mesure K4 soit en partie responsable d'un départ plus prudent que celui qui était préconisé sur les 100 premiers mètres. Quatre athlètes (ED, LK, DN, et EDbis) ont réagi plus tard, réalisant les 200 m suivants à une allure soutenue (105,8%).
- L'allure du 1000 m intermédiaire était prévue autour de 98% de l'allure moyenne du 1500 m. La moyenne sur l'ensemble des athlètes s'en approche. Sept athlètes ont couru cette seconde portion entre 98 et 100% de la vitesse moyenne sur la distance.
- Quant à la fin de course, elle était très fluctuante d'un sujet à l'autre (95,8% à 107,3%), même si la moyenne du groupe se rapproche de notre modèle : 101,7% pour 102,2% prévu.

Ces résultats nous ont permis de distinguer *a postériori* deux groupes de sujets, selon leur comportement en fin de course :

- **un groupe A** composé des athlètes qui finissent vite (KA, MD, BK, LK, DN, EDbis).
- **un groupe B** composé des athlètes qui ralentissent ou maintiennent leur vitesse (AA, ED, BH, KM, GN, NZ).

b. Comparaison des deux groupes de sujets.

Figure 24 : évolution de la vitesse sur 1500 m pour les deux groupes.

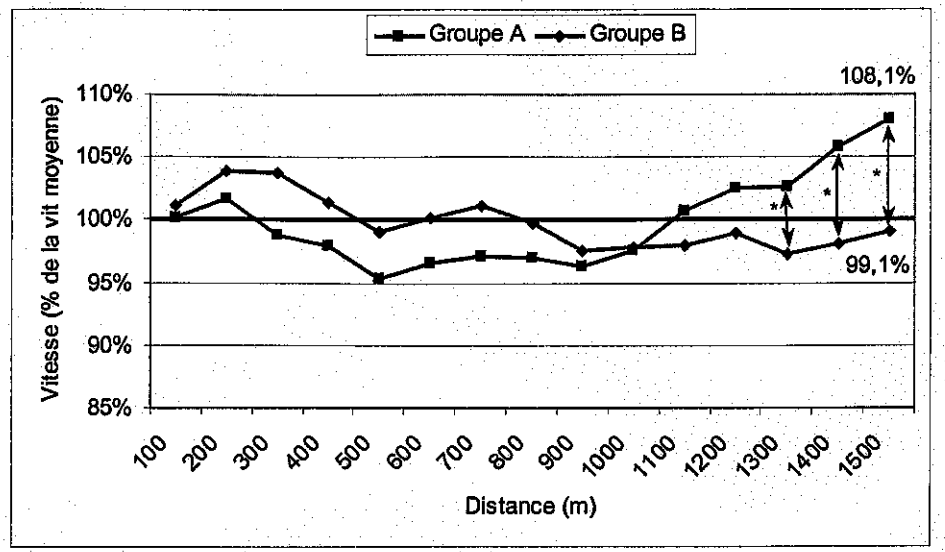


* ↕ : la différence entre les deux groupes est significative à p < 0,05.

L'évolution de la vitesse devenait différente à partir de 1000 m de course, et de façon significative à partir de 1300 m de course, soit à 200 m de l'arrivée.

Nous présentons ci-dessous pour ces deux groupes de sujets, l'évolution de la vitesse en pourcentage de la vitesse moyenne (figure 26), et en pourcentage de la VMA (figure 27).

Figure 25 : Evolution de la vitesse (en pourcentage de la vitesse moyenne) pour les groupes A et B.

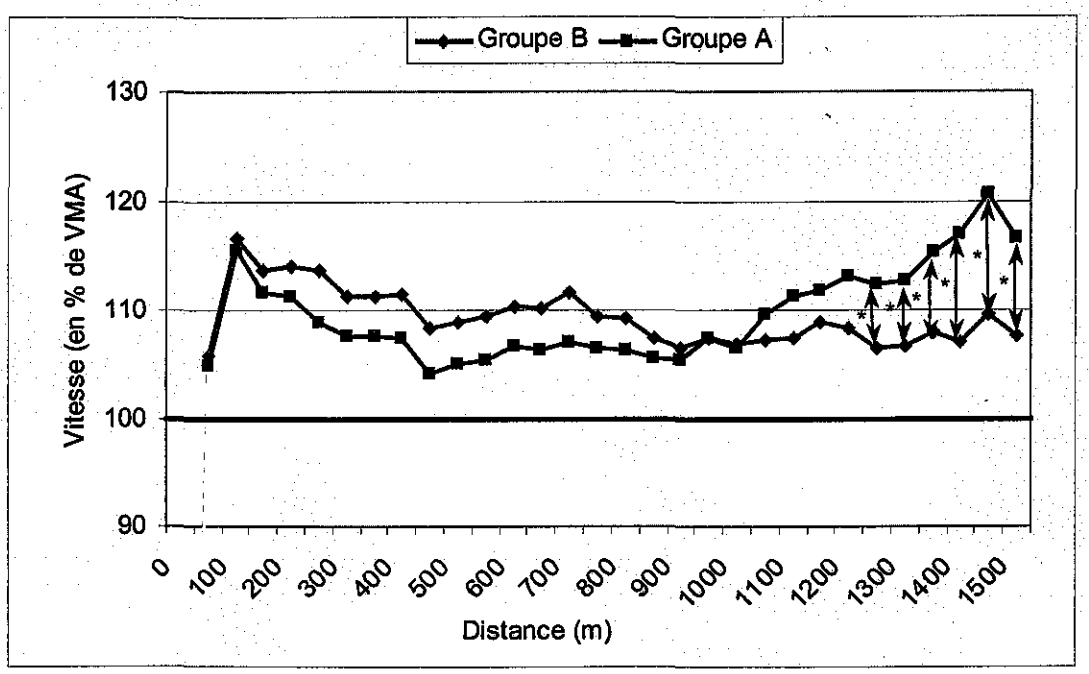


* ↕ : la différence entre les deux groupes est significative à p < 0,05.

Les athlètes du groupe B évoluent à des vitesses proportionnellement plus élevées de leur vitesse moyenne sur 800 m de course. En revanche, la première partie de course du groupe A (à l'issue de la période du départ) reste en deça de la vitesse moyenne jusqu'au 1100 m.

Des différences significatives apparaissent en fin de course sur les 200 derniers mètres. Le groupe A a été capable d'accélérer pour terminer le dernier 400 m à plus de 100% (108,2% en fin d'épreuve), alors que le groupe B a terminé l'épreuve à peine sur les bases de la vitesse moyenne (99,1%).

Figure 26 : évolution de la vitesse en pourcentage de la vitesse maximale aérobie, pour les deux groupes d'athlètes.



* ↕ : la différence entre les deux groupes est significative à $p < 0,05$.

L'observation de ce second graphique, montrent la similitude qui existe entre les deux groupes, au niveau du départ, jusqu'au 150 m.

Puis les sujets du groupe B ont maintenu un pourcentage plus élevé de VMA que le groupe A. A partir du 1000 m, la tendance s'est inversée, et les sujets du groupe A ont été capables de terminer à 116,6 ± 8,2% de leur VMA, alors que les sujets du groupe B étaient à 105,3 ± 4,9 %. La différence entre les deux groupes était significative à partir de 1250 m.

Quel que soit le groupe, la vitesse restait toujours supérieure à 100% de VMA.

Tableau 21 : évolution de la vitesse en pourcentage de VMA pour chaque groupe.

1500 m	1er 100 m	1000 m intermédiaire	dernier 400 m
Groupe A	110,2 ± 7,6 %	107,1 ± 2,1 %	114,1 ± 3,0 %
Groupe B	111,1 ± 7,7 %	110,1 ± 2,4 %	107,7 ± 1,1 %

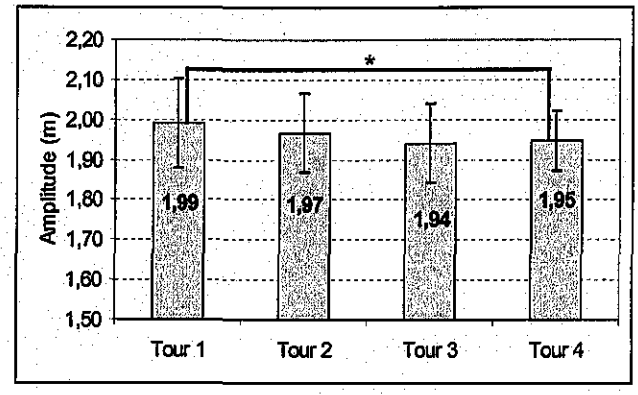
2. *Evolution des paramètres mécaniques :*

La fréquence et l'amplitude des foulées ont été mesurées sur les quatre tours du 1500 m dans la ligne droite principale. Une comparaison dans l'évolution de ces paramètres a été faite et l'analyse statistique a permis de mettre en évidence les changements significatifs.

a. Evolution tour par tour pour l'ensemble des sujets.

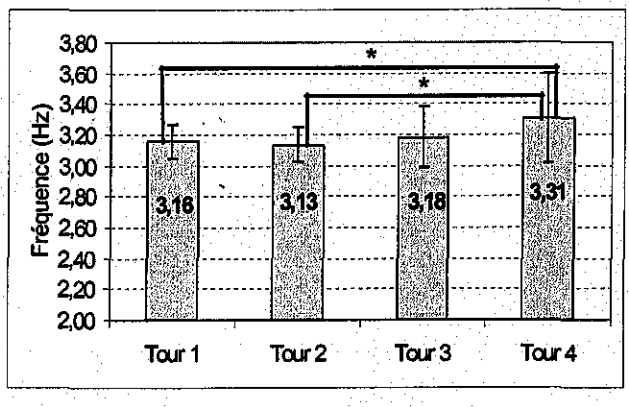
L'amplitude :

Figure 27 : Evolution de l'amplitude



La fréquence :

Figure 28 : Evolution de la fréquence



* : différence significative entre deux tours non consécutifs, à $p < 0,05$

L'amplitude chutait entre le premier et le dernier tour (- 2%). La fréquence en revanche, augmentait de façon significative entre le premier et le quatrième tour, puis entre le deuxième et le quatrième tour (+ 5%).

b. Evolution de l'amplitude et de la fréquence pour chacun des groupes de sujets :

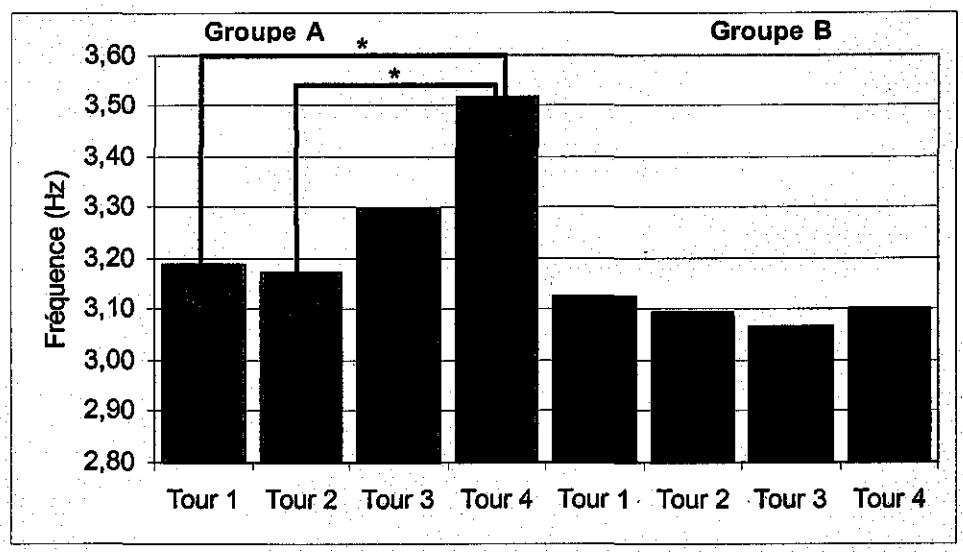
L'amplitude :

Pour le groupe A, nous n'avons pas relevé de différences significatives concernant l'amplitude entre les différents tours (- 1% entre le second et le dernier tour).

Pour le groupe B, l'amplitude chutait entre le premier et le dernier tour (2,05 m à 1,97 m, soit – 4%), mais la différence n'était pas significative.

La Fréquence :

Figure 29 : évolution de la fréquence pour le groupe A et le groupe B.



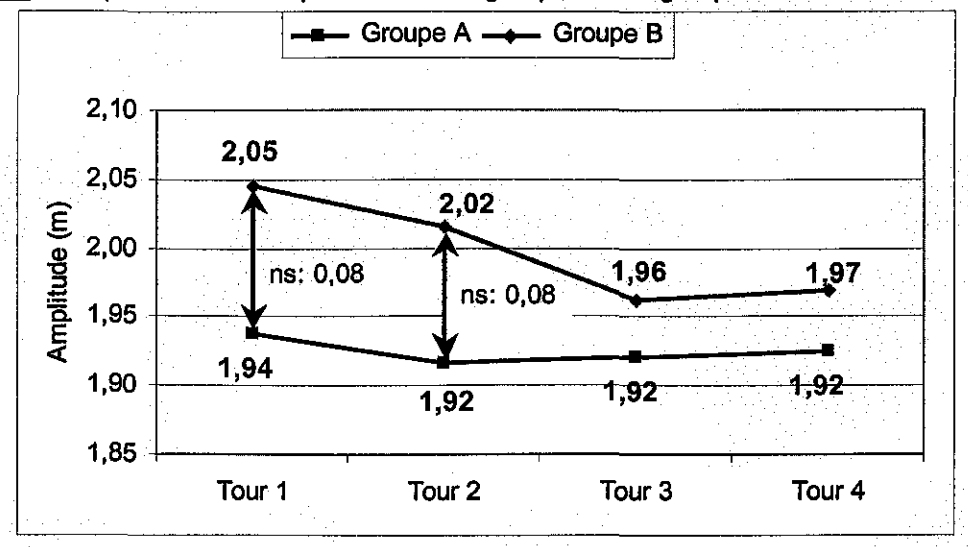
* : différence significative entre les tours à $p < 0,05$

Pour le groupe A, la fréquence augmentait de façon significative entre le premier et le dernier tour et entre le second et le dernier tour (+ 10%).
Pour le groupe B, il n'y avait pas de différence entre les différents tours.

c. Comparaison des deux groupes de sujets :

L'amplitude :

Figure 30 : comparaison de l'amplitude entre le groupe A et le groupe B

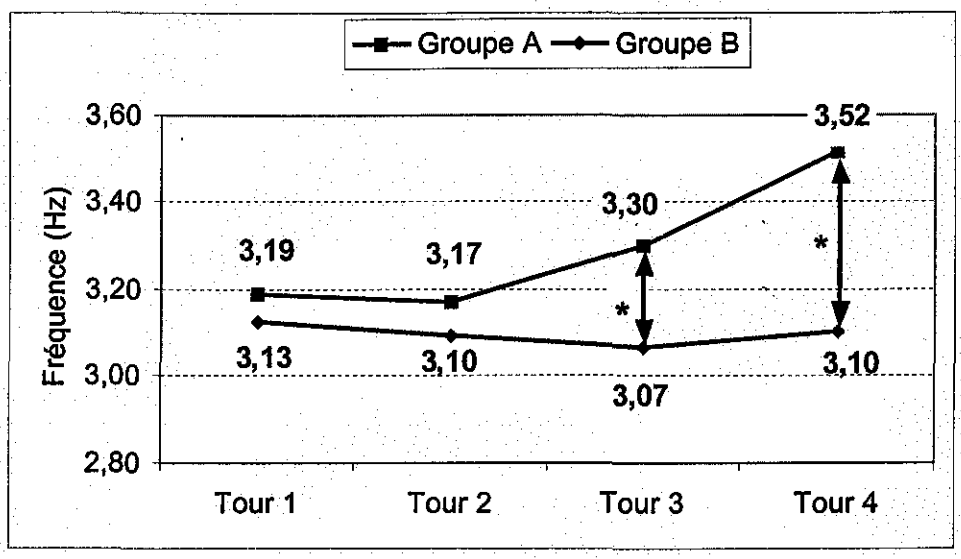


ns : non significatif.

L'amplitude des foulées était plus élevée lors des premiers tours pour le groupe B, même si la différence n'était pas significative. En fin de course, les écarts étaient moins marqués.

La fréquence :

Figure 31 : comparaison de la fréquence entre le groupe A et le groupe B



* : la différence est significative entre les deux groupes à $p < 0,05$

Les athlètes qui finissaient vite (groupe A) possèdaient une fréquence plus élevée en fin de course. Le groupe A tendait à augmenter sa fréquence d'un tour à l'autre à partir du second tour, par rapport au groupe B qui maintenait une fréquence relativement constante.

3. *Evolution des paramètres physiologiques.*

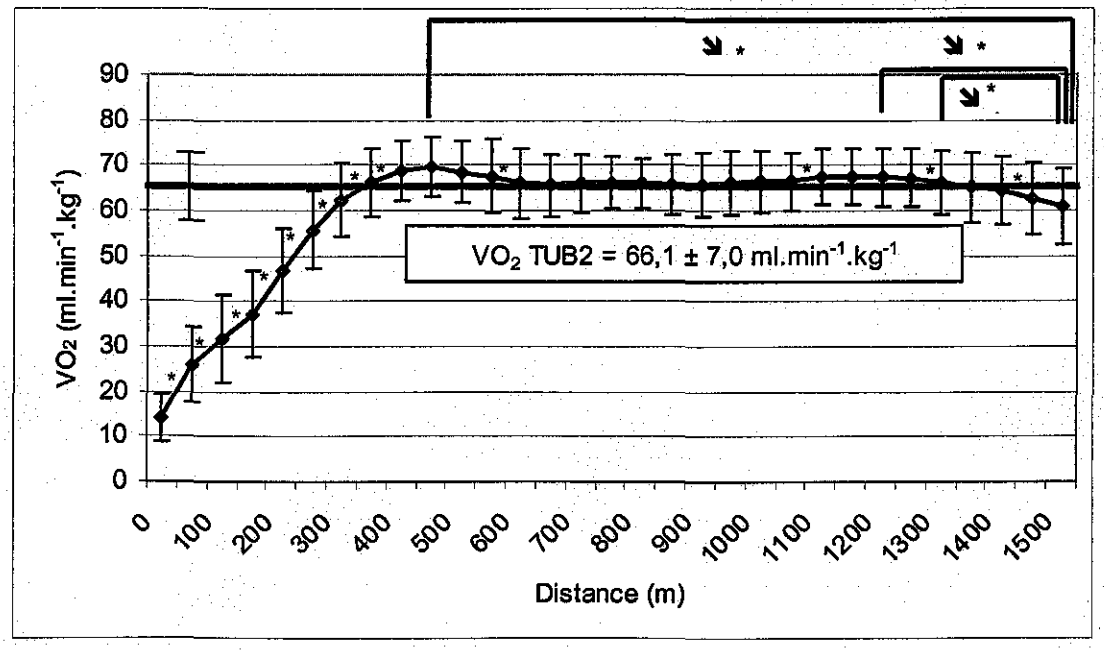
a. Etude de la cinétique de VO_2.

Trois athlètes ont dû être retirés de l'analyse qui concerne l'atteinte ou non de VO_2max. Les VO_2 obtenues lors du test sur 1500 m se sont révélées bien supérieures à celles obtenues lors du test TUB2 pour pouvoir être comparées. Ces trois athlètes n'avaient pas réalisé les deux tests lors de la même session expérimentale en raison d'une défaillance du matériel d'enregistrement des gaz.

En revanche, l'évolution pour ces athlètes de la cinétique de VO_2 (en pourcentage du pic de VO_2) a pu être prise en compte pour les analyses suivantes.

La figure 33 ci-dessous illustre donc l'évolution de VO_2 ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$) au cours du 1500 m pour les 9 sujets qui ont passé VO_2maxTUB2 et le 1500 m au cours de la même session expérimentale.

Figure 32 : moyenne et ET de l'évolution de VO_2 (en $ml.min^{-1}.kg^{-1}$) au cours du 1500 m (n = 9).



* : l'augmentation ou la baisse de VO_2 est significative à $p < 0,05$

——— : VO_2max TUB2

I : écart-type pour VO_2max TUB2

⌜↘⌟ : baisse significative entre deux distances non consécutives.

1) Atteint-on VO_2max ?

En considérant la moyenne du groupe, VO_2 atteint un pic au 450 m (69,5 ± 6,6 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$). Ce pic était supérieur à la valeur moyenne de VO_2 trouvé lors du test TUB2 (VO_2max = 66,08 ± 6,97 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$).

Tableau 22 : Différences entre $VO_2maxTUB2$ et VO_2max 1500 m, pour le groupe (n = 9).

N = 9	$VO_2maxTUB2$ (en $ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	Pic de VO_2 1500 m ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	Différence
Moyenne et ET	66,1 ± 6,9	69,5 ± 6,6	-3,5

La moyenne du groupe montre l'atteinte de $VO_2maxTUB2$. En revanche, l'analyse individuelle a révélé deux sujets pour qui $VO_2maxTUB2$ était légèrement supérieure au pic de VO_2 atteint au cours du 1500 m (la différence moyenne était égale à 1,94 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ soit une différence de 2,5%). Cet écart étant inférieur à l'erreur de mesure estimée à 3,3 ml O_2 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ par Mc FARLANE (2001) à partir des données de HAUSSWIRTH et al. (1997), nous avons considéré que tous les athlètes avaient atteint VO_2max.

2) Quel est le délai d'atteinte du pic de VO_2 ?

La moyenne des distances et délais de l'ensemble des athlètes pour atteindre VO_2 pic était respectivement de 459,1 ± 59,6 m et 55,9 ± 7,5 s.

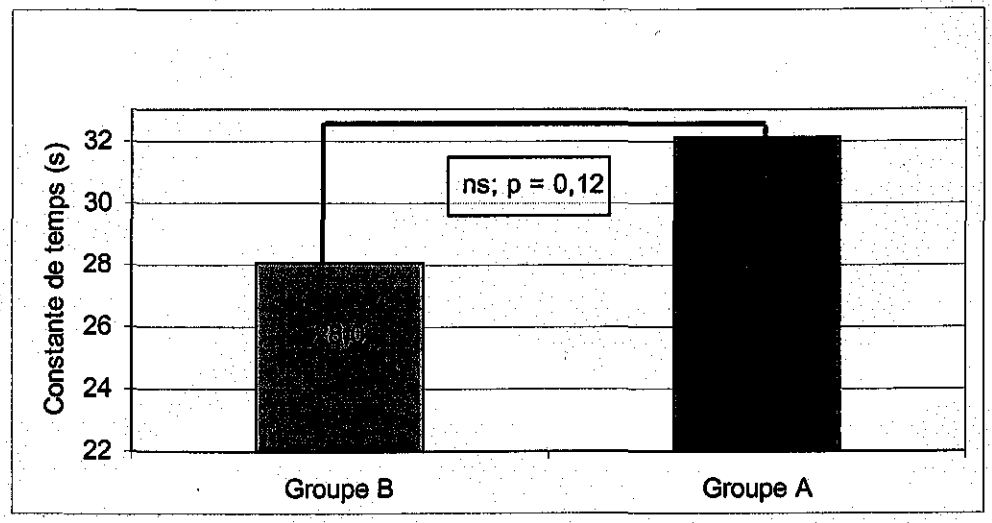
En outre, pour caractériser la cinétique de VO_2 en début d'effort, plusieurs indicateurs peuvent être utilisés : notamment, la constante de temps et le temps nécessaire à l'atteinte du pic de VO_2.

Le tableau ci-dessous présente simultanément les résultats pour l'ensemble des athlètes et pour chacun des deux groupes constitués.

Tableau 23 : Paramètres définissant l'atteinte de VO_2 pic au cours du 1500 m pour l'ensemble du groupe et pour les deux groupes A et B.

	Constante de temps = $\mathscr{T}$(s)	T½ (s) = 0,63 x $\mathscr{T}$(s)
Groupe TOTAL	30,1 ± 4,4	18,9 ± 2,8
Groupe A	**32,1 ± 4,4**	20,2 ± 2,8
Groupe B	**28,0 ± 3,4**	17,7 ± 2,2

Figure 33 : comparaison des délais d'inertie pour le groupe A et le groupe B.



ns : différence non significative.

Le délai d'inertie pour le groupe A (bons finisseurs) était plus long que le groupe B (+ 3 s) sans que cette différence ne soit significative.

Les athlètes du groupe B atteignaient leur VO_2 pic au bout de 425 ± 38 m, soit 53 ± 6 s, alors que pour le groupe A, cette distance était plus longue : 500 ± 54,7 m, soit 60,7 ± 6,7 s.

3) Evolution de VO_2 après l'atteinte du pic ?

- Evolution de VO_2 pour chaque sujet

L'observation des courbes individuelles montre une première chute qui suit l'atteinte du pic de VO_2, mais tous les sujets se sont maintenus ensuite à 92,6 ± 3,5 % de VO_2 pic relevée sur la distance. Une seconde chute est intervenue plus tard, en fin de course pour 11 sujets sur 12 mais 2 sujets sur les 11 présentaient une baisse de VO_2 inférieure à 1%. La moyenne de la chute observée pour chaque sujet entre la valeur du plateau et la valeur finale était égale à 5,3 ± 8 %. Un seul sujet augmentait VO_2 entre la valeur du plateau et la valeur finale (+ 3,6 %), sans que sa stratégie de course ne se soit révélée différente de celles des autres membres de son groupe. Cette augmentation étant inférieure à 3 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$, elle pourrait être imputable à une erreur dans la mesure.

- Evolution moyenne de VO_2 pour le groupe après l'atteinte du pic de VO_2 :

La figure 33 placée en introduction de ce chapitre (p 90) illustre cette phase de la cinétique de VO_2. Après la phase d'inertie, VO_2 atteint un pic qui ne se maintient que très peu de temps. Une petite chute, néanmoins significative, intervient rapidement. Ainsi, c'est seulement à partir de 550 m de course, que nous pouvons observer un état semi-stationnaire de VO_2 avec des valeurs inférieures à VO_2 pic. Il se dégage ensuite, au cours de notre étude, une troisième phase dans la cinétique de VO_2 qui se caractérise par une chute de VO_2. La baisse de VO_2 pour le groupe a été mise en évidence par deux traitements statistiques différents :

- analyse par séquence de 50 m de l'évolution de VO_2 sur la fin de l'épreuve,
- comparaison des valeurs maximale et finale relevées lors du 1500 m.

Entre le 1200 et le 1500 m, VO_2 diminue de façon significative et passe d'une valeur de **67,4 ± 6,2** $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ à **60,9 ± 8,6** $ml.kg^{-1}.min^{-1}$. Cette baisse se fait en deux temps : à partir du 1200 m et s'amplifie à partir du 1300 m, et ce, de manière également significative (cf. figure 33, p 90).

La baisse de VO_2 entre le pic (69,5 ± 6,6 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$) et la valeur finale était de 8,7 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$, ce qui représente une diminution de 12,5 %. Cette chute était surtout marquée dans les 200 derniers mètres où VO_2 chutait de 7,9 ± 7,6 %.

La différence de vitesse entre la vitesse pic et la vitesse au 1300 m était corrélée à la variation de VO_2 (entre VO_2 pic et VO_2 final). Cette différence n'est pas vérifiée si l'on considère le delta entre la vitesse pic et la vitesse finale.

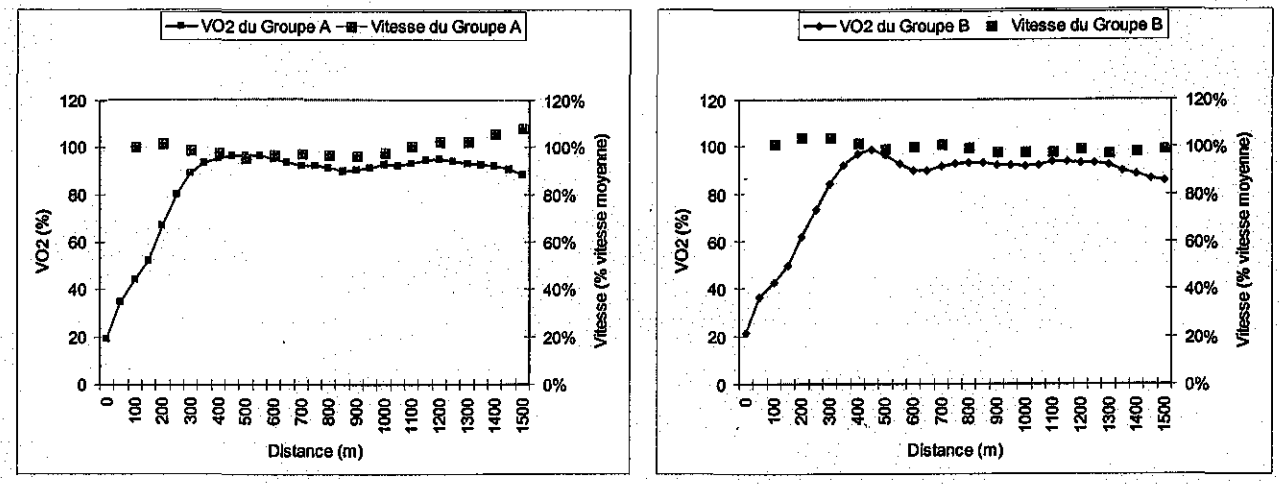
- Evolution de VO_2 pour les groupes A et B.

La comparaison des deux groupes montre quelques différences.

Le groupe B affichait une chute marquée de VO_2 au 600 m. La différence avec le groupe A était significative aux 600 et 650 m. Au 1300 m, VO_2 du groupe B

chutait de façon plus importante que celle du groupe A, mais la différence entre les deux groupes n'était pas significative.

Figure 34 : Evolution de la vitesse et de VO_2 pour les groupes A et B



En résumé :

La cinétique de VO_2 lors du 1500 m pour l'ensemble du groupe peut être décrite par plusieurs phases :

- *au cours des 450 premiers mètres, VO_2 augmente progressivement pour atteindre un pic de VO_2 > VO_2 max,*
- *de 550 à 600 m, VO_2 chute,*
- *du 600 au 1200 mètres qui suivent, VO_2 est maintenue,*
- *puis une baisse de VO_2 est constatée dans les 300 derniers mètres pour atteindre 87,5 % de VO_2 pic à la fin de l'épreuve.*

La comparaison des deux groupes d'athlètes montre une baisse de VO_2 significativement plus importante pour le groupe B (mauvais finisseurs) par rapport au groupe A (bons finisseurs).

b. Etude des paramètres cardio-respiratoires au cours de l'épreuve du 1500 m

Un certain nombre de paramètres cardio-respiratoires (FC, VT, FR et VE) montraient également des adaptations au cours du 1500 m.

1) Valeurs maximales :

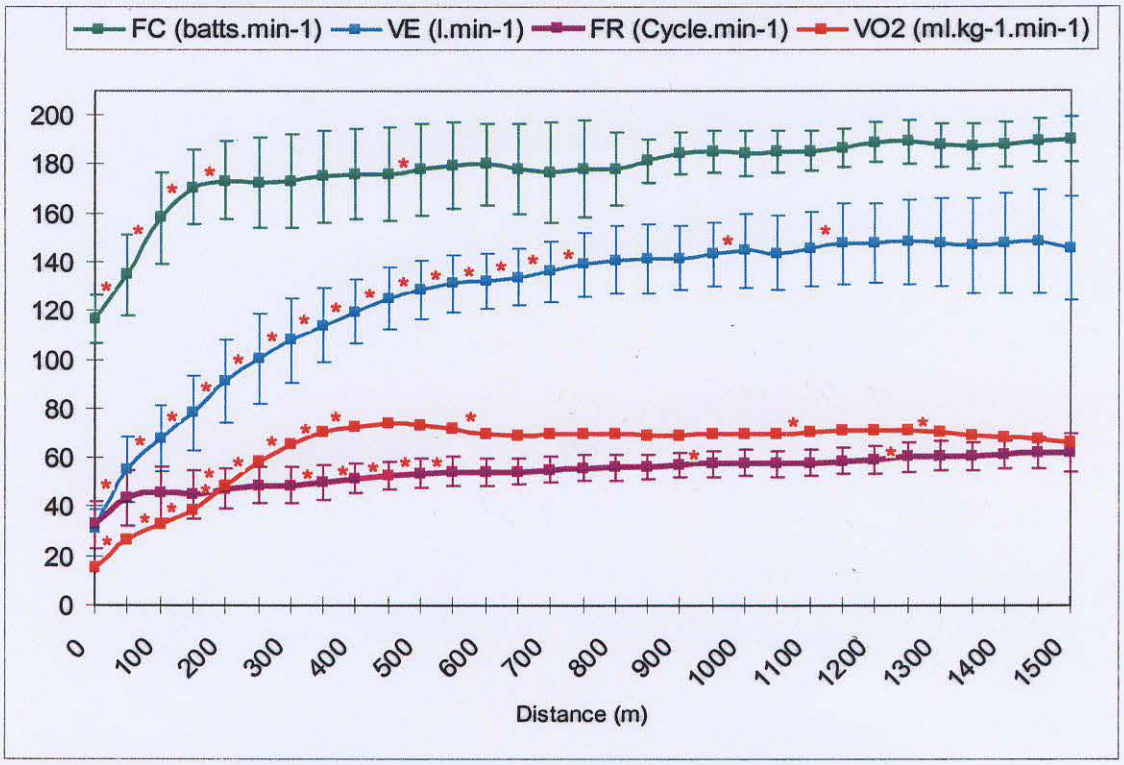
Tableau 24 : moyennes et ET des paramètres relevés au cours du 1500 m pour tout le groupe et pour chacun des deux groupes.

	VT (l)	FCmax (batt. min^{-1})	VE max (l. min^{-1})	FR max (cycle.min^{-1})	Lact max (mmol.l^{-1})
TOTAL	2,65 ± 0,33	192,25 ± 7,45	155,51 ± 19,78	63,82 ± 6,93	14,98 ± 0,89
Groupe A	**2,52 ± 0,34**	**190,83 ± 9,27**	**160,55 ± 22,45**	**65,04 ± 7,46**	**14,98 ± 1,14**
Groupe B	**2,78 ± 0,29**	**193,67 ± 9,27**	**146,36 ± 16,99**	**62,44 ± 6,74**	**14,98 ± 0,67**

2) Evolution des paramètres cardio-respiratoires avec la distance.

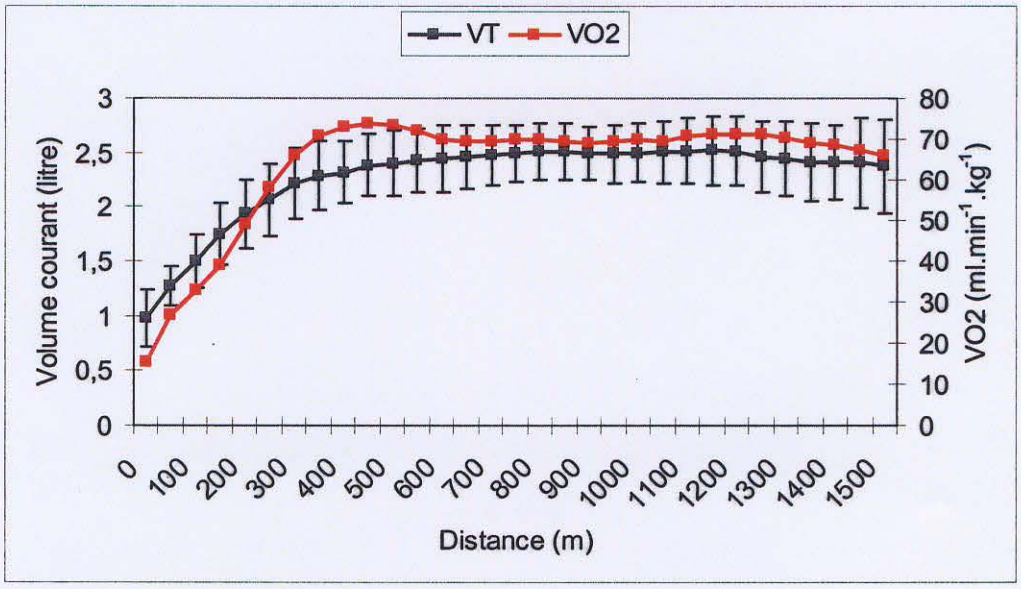
- Pour l'ensemble du groupe.

Figure 35 : évolution parallèle de FC, VE, FR et VO_2 mesurés au cours du 1500 m



* : la différence était significative par rapport au palier précédent à $p < 0,05$.

Figure 36 : évolution parallèle de VT et de VO_2 mesurés au cours du 1500 m

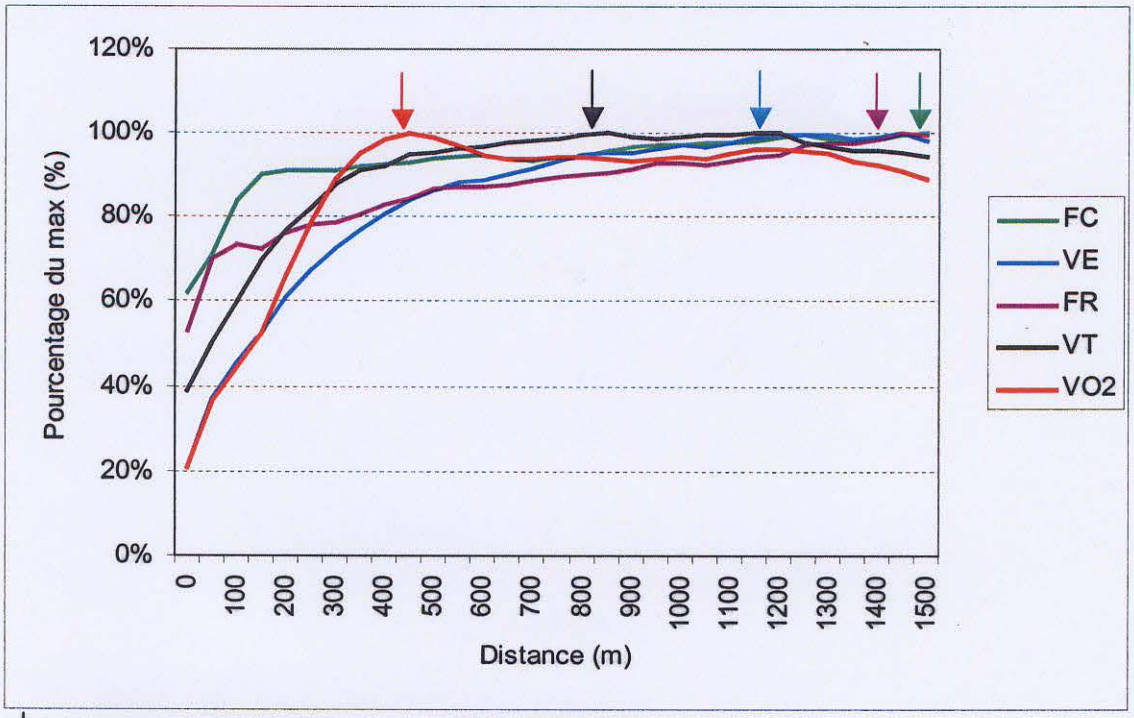


* : la différence était significative par rapport au palier précédent à $p < 0,05$

La figure 37 montrait une augmentation rapide et significative des fréquences cardiaque (FC) et respiratoire (FR), dans la première partie de l'effort (au cours des 100 premiers mètres). VT et VE augmentaient également de façon significative mais de manière plus progressive, parallèlement à l'évolution de VO_2. Lorsque le pic de VO_2 était atteint, les différents paramètres continuaient à augmenter progressivement sans réellement se stabiliser.

Les évolutions de VO_2 et VT étaient fortement corrélées ($p<.0001$). Ainsi, parallèlement à la chute de VO_2, VT chutait en fin de course, alors que VE, FC et FR tendaient à se stabiliser à un niveau élevé (proche des 100%).

Figure 37 : évolution parallèle des différents paramètres physiologiques mesurés au cours du 1500 m (en % de leur valeur maximale).



Moment d'apparition du pic pour chaque variable.

En résumé, pour l'ensemble du groupe, sachant que le pic de vitesse était atteint après 150 m de course :

1/ FC atteignait un pic au bout de 200 m, puis augmentait jusqu'à la fin de la course pour atteindre sa valeur maximale.

2/ le pic de VO_2 était atteint au bout de 450 m, à partir de 600 m, un plateau était observé. Une chute intervenait à partir de 1300 m

3/ Le pic pour VT était atteint au bout de 800 m, puis VT se maintenait en plateau jusqu'au 1250 m où une chute était observée.

3/ le pic de VE était atteint au bout de 1250 m, puis VE continuait d'augmenter jusqu'à la fin.

4/ FR augmentait brutalement dans les premiers mètres de course, puis jusqu'aux 550 m de façon significative et atteignait un pic seulement en fin de course à 1450 m.

- Comparaison des deux groupes A et B.

Pour FC et VE, les deux groupes ne se distinguent pas de façon significative. En revanche, la comparaison des 2 groupes sur l'évolution du volume courant et de la fréquence respiratoire montre quelques différences au cours de l'épreuve. Ainsi, de façon chronologique, le premier paramètre qui différenciait les deux groupes était FR, qui au bout de 450 m de course était significativement plus importante pour le groupe qui termine moins bien : groupe B (55,6 vs 48,1 cycles.min^{-1}, respectivement).

Entre 550 et 750 m, puis au 1000 m, VT était plus élevé pour le groupe A mais les différences n'étaient pas significatives (p=.07 ; p=.08 ; p=.07, respectivement), même en fin de course où VT restait inférieur pour les athlètes du groupe B.

b. Contribution respective des métabolismes aérobie et anaérobie à la resynthèse de l'ATP ?

Le calcul du déficit total en oxygène (DO_2max) permet de caractériser la participation du système anaérobie lors de l'épreuve du 1500 m. Dans notre étude, la moyenne de DO_2max pour le groupe était égal à 66,0 ± 10,4 ml.kg^{-1} (n = 9). La contribution du système anaérobie à la resynthèse de l'ATP a été calculée pour chaque sujet lors de cette épreuve. Elle est présentée parallèlement aux valeurs de lactatémie relevées en fin d'épreuve (tableau 25).

Il est à noter qu'aucun athlète n'a atteint son pic de lactatémie au-delà de 3 minutes. Les relevés post-exercice à 5 min, 7min, 10 min n'ont donc pas été utilisés.

Tableau 25 : contribution anaérobie et pic de lactatémie post-exercice lors du 1500 m.

	DO_2 max accumulé ($l.min^{-1}$)	Participation anaérobie (%)	Lactatémie post-exercice ($mmo.l^{-1}$)
Groupe A	62,9 ± 9,4	21,0 ± 3,4	14,9 ± 1,1
Groupe B	68,4 ± 11,6	22,0 ± 4	14,9 ± 0,7
TOTAL	66,0 ± 10,4	21,5 ± 3,6	14,9 ± 0,9

Les valeurs ci-dessus des deux groupes ne présentaient pas de différences significatives, même s'il est possible de noter un déficit d'O_2 légèrement supérieur pour le groupe B.

Partie 4 : Discussion

Les résultats enregistrés lors de cette étude du 1500 m sur le terrain vont à présent pouvoir être discutés au regard des connaissances physiologiques qui existent sur l'exercice supra-maximal, mais également au niveau des contenus d'entraînement proposés pour cette discipline.

I. Analyse physiologique

Le début de l'épreuve supra-maximale qu'est le 1500 m, peut être caractérisé grâce à un modèle mono-exponentiel, tel que l'ont défini BARSTOW et MOLE (1991). Ce modèle permet de décrire la cinétique de VO_2 lors des premiers instants de l'exercice. Il caractérise par une fonction mathématique les adaptations des capacités de transport et l'utilisation de l'oxygène.
Les constantes de temps obtenues dans notre étude pour l'ensemble du groupe (30,1 ± 4,4 s) sont sensiblement identiques à celles relevées dans l'étude de THOMAS et al. (2001) pour des coureurs de 800 m de niveaux similaires (28,0 ± 5,7 s). Mais si les athlètes de notre groupe A (bons finisseurs) présentent effectivement des constantes de temps plus longues (32,1 ± 4,4 s), en revanche, les athlètes du groupe B (partis plus vite) se rapprochent fortement des valeurs obtenues sur 800 m (28,0 ± 3,4 s). Ceci tend à confirmer que l'intensité en début d'exercice intense influe sur la réponse du système aérobie (BILLAT et al. 2000). Dés 1961, ASTRAND et SALTIN avaient constaté que la consommation d'oxygène augmentait plus rapidement pour un exercice supra-maximal (150% de VO_2max) que pour un exercice à 100% de VO_2max. GASTIN (1998) met en évidence des consommations d'oxygène supérieures sur les 30 premières secondes d'un 400 m, par rapport au 800 et au 1500 m où les intensités sont intrinsèquement plus faibles. Au cours des 20 premières secondes de course, VO_2 serait plus élevée dans une course de 200 m comparée au 400 et au 800 m. Les réserves de créatine phosphate (CP) se dégraderaient plus rapidement, stimulant ainsi le métabolisme aérobie et donc la cinétique de VO_2 (MEDBO et TABATA, 1989). Une cinétique de VO_2 plus

rapide pourrait améliorer les performances lors d'un exercice supra-maximal en augmentant la quantité d'ATP apportée par la voie aérobie (BISHOP et al. 2002 ; HIRVONEN et al. 1992).
Un départ rapide est nécessaire en demi-fond pour se placer en début de course. Mais au-delà de ces aspects tactiques propres à la course de demi-fond, des disciplines tels que le kayak (BISHOP et al. 2002) et le cyclisme sur piste (FOSTER et al. 1993 ; 1994) présentent le même type de départ « all-out » sur quelques secondes, suivi d'une phase d'allure plus régulière. Il semble donc, qu'il y ait un intérêt physiologique, notamment lié à la cinétique de VO_2 (et ses évènements sous-jacents), à prendre un départ rapide.

Nous devons souligner que l'utilisation du K4 (RQ) peut entraîner des erreurs dans l'estimation de la constante de temps de la cinétique de VO_2. En effet, un enregistrement toutes les 5 secondes ne permet pas de déterminer avec certitude le début de l'exercice (VO_2 avant l'exercice = VO_{2base}), ni le moment précis d'atteinte du pic de VO_2. Des erreurs dans le calcul de la constante de temps peuvent être générées par le fait que ce calcul prend en compte le délai séparant le début de l'effort et l'atteinte du pic de VO_2. L'utilisation d'un autre type de K4 (type B2) est beaucoup plus fiable pour définir la phase cardiodynamique et conditionne une bonne détermination de τ. Ce dernier appareil est en effet bien plus précis car il effectue des enregistrements « cycle à cycle ». Il est utilisé entres autres, sur le terrain par DUFFIELD et DAWSON (2003); BILLAT et al. (2000). Ayant à notre disposition uniquement le K4 de type RQ, nous sommes obligés d'admettre des imprécisions liées à la mesure, sachant que la constante de temps n'est pas l'objet premier de notre travail.

Pour d'autres raisons, l'appareil d'enregistrement des gaz n'a pas été sans poser de problèmes bien que la calibration du K4 ait été scrupuleusement faite avant chaque évaluation (prise en compte des conditions de température et de pression).Trois athlètes ont dû être retirés de l'analyse qui concerne l'atteinte ou non de VO_2max. Les consommations d'oxygène obtenues lors du test sur 1500 m nous sont apparues bien supérieures à celles obtenues lors du test TUB2 pour pouvoir être comparées. L'une des raisons que nous pouvons invoquer dans le cadre de notre recherche est le temps séparant les deux tests.

En effet, une panne de l'appareil lors de la première session, nous a conduit à reporter l'évaluation sur 1500 m pour les 3 sujets en question sur une deuxième session proposée quelques mois plus tard. De meilleures prestations à l'entraînement et des performances en compétitions d'un niveau supérieur pour ces trois athlètes dans la période qui a suivi la seconde session peuvent expliquer pour une part des valeurs de VO_2 pic sur 1500 m plus élevées. THOMAS et al. (2001) lors de l'étude sur les coureurs de 800 m avaient obtenus pour certains sujets (écartés par la suite des analyses) des valeurs pics de VO_2 apparemment surestimées. Les auteurs invoquaient des fréquences respiratoires élevées comme étant susceptibles de perturber le fonctionnement de l'appareil et responsables de surestimations des valeurs de VO_2 enregistrées. Ce qui pourrait être le cas des autres sujets de notre étude pour qui le pic de VO_2 obtenu sur 1500 m s'est révélé supérieur à VO_2max TUB2 (7 athlètes sur 9). Mais l'obtention de pics de VO_2 sur 1500 m supérieurs à ceux atteints lors du test TUB2 n'implique pas forcément un problème inhérent au matériel utilisé. Nous pouvons également envisager que le protocole triangulaire mis en place pour déterminer VO_2max ne permet pas de solliciter les possibilités maximales aérobies du sujet ; l'athlète pouvant être déjà fatigué à l'amorce du dernier palier atteint plus de 30 minutes après le début du test. Une autre explication pourrait être liée à l'incrémentation de 1 $km.h^{-1}$. Certains sujets ayant leur VMA entre deux paliers (exple : 20,5 $km.h^{-1}$) pourraient ne pas atteindre VO_2max au palier inférieur et ne pas tenir suffisamment longtemps au palier supérieur pour atteindre des valeurs maximales.

Nous avons utilisé le même protocole que THOMAS et al. (2001) qui obtiennent également des valeurs pics supérieures sur l'épreuve spécifique (800 m). Le même constat est fait par BISHOP et al. (2002) où les valeurs pic sur une épreuve de kayak de 2 min. étaient supérieures aux valeurs de VO_2max trouvées au cours d'un test progressif dont les paliers étaient de 5 min. séparés par 1 min. de récupération.

Lors du 1500 m, la valeur moyenne de VO_2 pic obtenue pour nos sujets était de **69,5 ± 6,6** $ml.kg^{-1}.min^{-1}$. Elle était supérieure à celle trouvée par DUFFIELD et DAWSON (2003) : 61,7 ± 6,7 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$. La population de cette dernière étude était de niveau moindre : 263,0 ± 8,3 s au 1500 m vs. 248,6 ± 9,2 s dans

notre expérimentation. En revanche, nos résultats étaient très proches de ceux de SPENCER et GASTIN (2001) qui rapportent des VO_2max sur 1500 m de 72 ± 2 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$. Les athlètes testés sont sensiblement du même âge, un peu plus lourds, et d'un niveau plus homogène et plus élevé que les sujets de notre étude : 235,0 ± 0,0 s vs. 248,6 ± 9,2 s.

Nos résultats ont montré que sur 1500 m, VO_2max était atteint par l'ensemble des 9 sujets. Lors de son étude sur 800 m, THOMAS et al. (2001) ont également observé l'atteinte de VO_2max pour tous leurs sujets, confirmant en cela l'influence du départ rapide sur l'atteinte de VO_2max. Nos résultats obtenus sur 1500 m, avec une stratégie de course conforme à la compétition, semblent conforter l'importance d'une forme de départ spécifique sur la sollicitation du système aérobie. Les mêmes résultats ont été obtenus dans d'autres activités comme le kayak où la stratégie de course est similaire pour des épreuves d'une durée proche des 2 minutes, (BISHOP et al. 2002). En revanche sur tapis roulant pour des durées d'efforts proches de celles de notre étude, les résultats obtenus sont toutefois différents. En effet, les sujets de SPENCER et al. (2001) n'atteignaient que 94% et 88% de VO_2max respectivement sur 1500 m et 800 m. Pourtant le protocole mis en place par ces auteurs en 2001, cherchait également à simuler l'épreuve compétitive du 1500 m. Mais contrairement à notre étude, les sujets semblaient avoir choisi soit une vitesse régulière (sujets à profil endurance), soit un départ plus lent que la vitesse moyenne (sujets à profil vitesse) pour pouvoir accélérer dans les 400 derniers mètres. Les athlètes de DRAPER et WOOD (2004) ont également simulé un 800 m sur tapis roulant. Aucun des 8 sujets de l'étude n'ont atteint VO_2max et la moyenne de VO_2 pic atteint par le groupe se situait seulement à 85% de VO_2max.
Peu d'études menées en laboratoire (MEDBO et TABATA, 1989 ; SERESSE et al. 1988) rendent compte d'un pic de VO_2 égal à VO_2max pour des épreuves supra-maximales. Sur tapis roulant, les sujets de DRAPER et FALLOWFIELD (1999) n'atteignaient pas VO_2max lors d'une épreuve de 2 minutes, mais y parvenaient lorsque la durée de l'effort était de 5 minutes. Les protocoles sur tapis ont souvent été réalisés à allure constante, ou bien dans le cas de SPENCER et GASTIN (2001) à des vitesses initiales inférieures à la vitesse moyenne et permettant à l'athlète d'accélérer sur la fin. Cette accélération reste

toutefois sous la responsabilité de l'expérimentateur. HILL (1999) confirme que les athlètes ne peuvent pas faire de subtils changements de rythme sur le tapis, comme ils le pourraient en compétition.

Ainsi, ces différents constats laissent supposer qu'une vitesse plus élevée au départ permettrait de stimuler plus intensément le système aérobie et d'atteindre VO_2max (CRAIG, 1972 ; BISHOP et al. 2002). Les valeurs de VO_2 pic obtenues par les sujets de SPENCER et al. (1996 ; 2001) étaient d'ailleurs plus élevées pour le 400 m (98% de VO_2max) comparées à celles obtenues sur 800 et 1500 m. Le coût métabolique plus élevé au départ semble donc contribuer à accélérer la cinétique de VO_2, ainsi que le rapportaient déjà les travaux d'ASTRAND et SALTIN (1961), ou MARGARIA et al. (1965). L'énergie cinétique nécessaire pour accélérer est plus importante si le pic de vitesse atteint est plus élevé (THOMAS et al. 2001). Elle serait également plus élevée sur la piste du fait d'une résistance de l'air supérieure par rapport au tapis (LEGER et MERCIER, 1983).

Les résultats obtenus par SPENCER et al. (1996 ; 2001) ou DRAPER et al. (1999, 2004) laissent supposer en définitive que :

1/ l'intensité requise au départ n'était pas suffisante pour stimuler suffisamment les processus oxydatifs. La durée de l'effort s'avérait ensuite insuffisante pour amener les athlètes à VO_2max.

2/ les athlètes n'étaient peut-être pas au maximum de leurs capacités physiques sur un protocole où l'allure imposée peut être sous-estimée par rapport à leur possibilité du moment. En effet, le 1500 m sur tapis est couru à seulement 103 ± 6% de VMA pour les sujets de SPENCER et GASTIN (2001), vs. 108 ± 2% dans notre étude. Mais le mode de détermination de VMA étant différent d'un protocole à l'autre, nous devons rester prudent dans ces comparaisons qui ne sont peut-être pas très fiables ; en effet, les pourcentages peuvent varier de façon non négligeable, suite à une estimation différente de VMA.

Outre l'inertie du métabolisme aérobie selon le type de protocole choisi, THOMAS et al. (2001) développent d'autres raisons possibles de divergences entre les différentes études menées pour des épreuves sous-maximales:

- L'ergomètre utilisée et les masses musculaires mises en jeu,

- L'expertise des sujets,
- Les méthodes de mesures.

Par la suite, nous pouvions nous attendre au maintien de VO_2max jusqu'au bout de l'épreuve du 1500 m, puisque la vitesse de course reste supérieure à la vitesse maximale aérobie du début à la fin de course pour tous nos sujets. Or, après la phase d'inertie et une fois le pic de VO_2 atteint, nous avons constaté parmi tous les athlètes de notre étude, une première chute de VO_2 de courte durée. A l'issue de cette période, et pour tous les sujets, VO_2 se maintient en plateau à 92,6 ± 3,5% de VO_2 pic jusqu'au 1200 mètres. L'origine de cette chute qui suit immédiatement l'atteinte de VO_2 (- 7,4% entre le pic de VO_2 et le plateau) n'est pas aisée à expliquer au plan physiologique. Elle pourrait être une adaptation différée consécutive à la chute de vitesse observée (- 9%) entre le premier 100 m et 450 m de course (moment où le pic de VO_2 est atteint).
Néanmoins, il reste difficile de déterminer si cette élévation initiale de VO_2 est à considérer :
1) comme un artefact « extra- physiologique » imputable au K4 RQ notamment Le pic de VO_2 est alors égal à 105% de VO_2 max TUB2.
ou
2) comme une réalité physiologique.
De ce fait, le plateau qui suit est également difficile à interpréter. Dans le premier cas, les athlètes courraient à 100% de VO_2 max TUB2 alors que dans le second, ils maintiendraient seulement 93 % du pic de VO_2.
Au vu de l'intensité de cette phase supérieure à 106% de VMA et des valeurs de VO_2 relevées (très proches de VO_2max TUB2), nous avons pris le parti de considérer que les athlètes réalisaient cette phase de plateau intermédiaire à 100% de VO_2max (cf. figure 33).

Par ailleurs, il se dégage également dans notre étude, pour le groupe en général et pour 9 sujets sur 12, une seconde chute de VO_2 plus ou moins conséquente en fin de course (dans les 300 derniers mètres), indépendamment de l'appartenance à l'un ou l'autre des deux groupes, que nous avons défini. Dans les études menées sur tapis roulant, SPENCER et al (1996 ; 2001), ont constaté un plateau observé à partir de 60 s de course, mais VO_2 passait de

94% dans la première minute à 91% de VO_2max sur la fin de l'épreuve. PERREY et al. (2002) ont observé pour 7 sujets sur 13, une 4ème phase dans la cinétique de VO_2 où VO_2 chutait de façon significative. Pour des exercices plus intenses, NUMMELA et RUSKO (1995) et THOMAS et al. (2001) ont constaté également une baisse significative de VO_2 en fin d'exercice. Par ailleurs, THOMAS et al. (2001) font état de plusieurs études sur les efforts supra-maximaux, où les figures présentées par les auteurs illustrent le même phénomène de décroissance de VO_2 en fin d'exercice (ASTRAND et SALTIN, 1961 ; GASTIN et LAWSON, 1994 ; YAMAMOTO et KANEHISA, 1995 ; ZAMPARO et al. 1999).

Cette chute est-elle d'origine physiologique ou liée aux appareils d'enregistrement des gaz ? Le K4 utilisé actuellement par un nombre croissant de chercheurs a fait l'objet d'une validation par HAUSSWIRTH et al. (1997) pour des exercices sous-maximaux et maximaux. Cependant en raison de la possibilité de surestimation évoquée précédemment concernant le pic de VO_2 atteint sur 1500 m et la baisse de VO_2 constatée en fin d'effort, la validité de l'appareil peut effectivement être mise en cause. Une évaluation du K4 RQ a été effectuée grâce à un système mécanique (GESS : Gas Exchange Simulation System) permettant de simuler différentes consommations d'oxygène en modifiant le volume courant et/ou la fréquence respiratoire et/ou en modifiant la composition des gaz expirés (THOMAS et al. 2001). Les résultats indiquent que le K4 dysfonctionnerait pour de hautes valeurs de FR (60 cycles.min^{-1}) en sous-estimant les valeurs de VO_2. Mais les auteurs n'ont pas trouvé de corrélations entre la chute de VO_2 et l'augmentation de FR. Par ailleurs, pour certains sujets dont les FR sont peu élevées, VO_2 diminuait aussi de façon significative en fin d'épreuve. En définitive, THOMAS et al. (2001) ont conclu que le dysfonctionnement du K4 RQ est possible mais pas certain, d'autant que d'autres chercheurs (NUMMELA et RUSKO, 1995 ; PERREY et al, 2002) ont observé une chute de VO_2 en utilisant d'autres types d'appareil de mesures des échanges gazeux. Par ailleurs, dans notre étude, tous les sujets ne présentaient pas de chute systématique (un des athlètes augmente et deux maintiennent le plateau atteint) et nous n'avons pas trouvé de relation entre la valeur de FR en fin de course et celle de VO_2.

Si nous étudions à présent, l'évolution de VO_2 pour nos deux groupes de sujets, une chute plus importante de VO_2 a été observée chez les athlètes qui décéléraient en fin d'épreuve (groupe B). Or, ces athlètes étaient également ceux qui couraient à un pourcentage plus élevé de la vitesse moyenne et surtout à un niveau plus élevé de leur VMA en début de course. Il est donc possible que la chute de VO_2 soit en rapport avec une inhibition progressive des processus oxydatifs, en relation avec une baisse de pH plus précoce et/ou plus prononcée. Cette baisse de pH qui réduit la capacité fonctionnelle du muscle squelettique (FLANDROIS, 1979 ; POORTMANS, 1988) 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, dont la phosphofructokinase (PFK) et l'α-céto-glutarate-déshydrogénase qui sont les fournisseurs de NADH et FADH (équivalents réduits) à la chaîne respiratoire. Cependant, il n'a jamais été mis en évidence que ces altérations biochimiques provoqueraient une baisse de VO_2 au niveau cellulaire. Il semble même que les variations du pH ou la baisse des substrats énergétiques, aient peu d'effet sur la respiration mitochondriale (WILLIS et JACKMAN, 1994).

Dans notre étude, l'évolution de VO_2 a été mise en relation avec les paramètres ventilatoires : VT et VO_2 étaient corrélés. Le volume courant inspiré comprend à la fois une fraction d'air inhalé qui atteint les alvéoles et participe aux échanges gazeux entre l'appareil pulmonaire et le sang, et une fraction qui reste dans les conduits aériens et ne participe pas aux échanges gazeux : la ventilation alvéolaire = VT x FR = VE – Ventilation de l'espace mort. Nous avons observé une chute significative de VT parallèlement à la chute de VO_2 en fin de course, alors que VE continuait d'augmenter progressivement pour l'ensemble du groupe pour atteindre des valeurs comprises entre 146 et 149 $l.min^{-1}$. L'augmentation de VE associée à une baisse de VT pourrait être liée au développement d'une fatigue des muscles respiratoires (GALLAGHER et al. 1985 ; CIBELLA et al. 1996). Une diminution de VT a pour conséquence une hypoventilation alvéolaire relative, entraînant une baisse des possibilités d'échanges gazeux avec le sang. Ces observations ont été faites aussi pour des exercices sous maximaux (MAHLER et LOKE, 1981 ; PERREY et al,

2002). Parallèlement à cette baisse de VT, la fréquence respiratoire augmentait. De fait, l'hyperventilation accroît probablement la ventilation alvéolaire mais notre étude ne peut pas le confirmer.

Une baisse du pH sanguin de par l'augmentation de la concentration en protons (H^+) aurait pour conséquence une formation extramétabolique de CO_2 qui stimulerait les centres respiratoires (PREFAUT et MERCIER, 1993 ; ASTRAND et RODAHL, 1994). La fatigue des muscles respiratoires pourrait donc jouer un rôle en limitant la performance et expliquer ainsi la chute de VO_2. En déchargeant le système respiratoire avec de l'hélium pour des intensités de travail supérieures à 90-95% de VO_2max, JOHNSON et al. (1996) ont observé une amélioration de la durée d'un exercice sous-maximal intense.

Nos résultats permettent par ailleurs de constater que VT du groupe A est supérieur à celui du groupe B à certaines périodes de la course : entre le 550 et le 750 m, puis au 1000 m. FR croit régulièrement pour l'ensemble du groupe, mais l'observation dans les deux groupes montre que FR était significativement plus élevée à partir de 450 m pour le groupe B, indiquant peut-être une sollicitation plus importante des muscles respiratoires à ce moment de la course. La diminution de VT liée à l'hypoventilation alvéolaire, ainsi que l'augmentation progressive de FR, susceptibles d'entraîner une fatigue des muscles respiratoires à ces fortes intensités, peuvent expliquer pour une part, la baisse de VO_2 que nous avons observé en fin d'épreuve du 1500 m. La chute serait moins importante pour le groupe A, pour qui la baisse de VT est moins marquée et la FR plus faible.

D'autres hypothèses physiologiques peuvent être évoquées pour expliquer la chute de VO_2, en fin d'épreuve. Ces éléments de discussion également développés par THOMAS et al. (2001) ne restent que des suppositions, n'ayant pu être étayées par notre protocole expérimental.

1) La vasoconstriction périphérique :

Lors d'efforts intenses, la demande des muscles respiratoires augmente entraînant une redistribution du débit sanguin (HARMS, 2000). Un phénomène de vasoconstriction périphérique explique la réduction de la circulation sanguine au niveau des muscles squelettique concernés par l'effort (ASTRAND et RODAHL, 1994). Mais pour que cette hypothèse soit valide, la diminution de

VO_2 au niveau musculaire doit être plus importante que le prélèvement des muscles respiratoires pour justifier la baisse de VO_2 observée au niveau buccal.

2) Le principe de Fick :

Le principe de Fick est résumé par la relation suivante : VO_2 = QC X (CaO_2 artériel – CaO_2 veineux), où Ca correspond au contenu artériel.

Le transport de l'oxygène vers les muscles actifs dépend du débit cardiaque et du prélèvement de l'oxygène au niveau des muscles observé au travers de la différence artério-veineuse. Ainsi, la baisse de VO_2 peut venir de la baisse de l'un ou l'autre de ces paramètres. Une augmentation de la pression sanguine lors d'efforts intenses entraînerait par un phénomène d'extravasion de liquide sanguin dans le liquide interstitiel, une diminution du volume sanguin et par conséquent, l'augmentation de la viscosité sanguine. Cette augmentation conduirait à une diminution du QC et *a posteriori* à une diminution de VO_2 (GREENHAFF et TIMMONS, 1998). La différence artério-veineuse, elle, pourrait être altérée par une vasoconstriction au niveau des muscles actifs mais également, une inhibition de la respiration au niveau cellulaire.

3) Acidose sanguine et effet BOHR.

Au cours d'un exercice supra-maximal, la production d'ions H^+ est importante. L'acidose musculaire faciliterait jusqu'à un certain seuil la libération de l'oxygène fixé sur l'hémoglobine, permettant un meilleur apport d'O_2 au niveau cellulaire : effet BOHR (JOHNSON et al. 1996 ; BILLAT et al. 1998). Cependant, les ions H^+ ne peuvent être libérés au niveau des alvéoles pulmonaires. Le pH sanguin s'acidifie alors fortement et le sang artériel conserve alors une composition veineuse diminuant le pouvoir de fixation de l'O_2 aux hématies. Une diminution de l'effet BOHR entraînerait une désaturation artérielle à l'origine d'une baisse possible de VO_2.

En résumé, plusieurs hypothèses pourraient expliquer la chute de VO_2 en fin d'exercice supra-maximal, tel que le 1500 m :

- L'hyperventilation avec pour conséquence une fatigue des muscles respiratoires,
- La baisse du VT qui entraînerait une hypoventilation alvéolaire,

- La baisse du débit cardiaque consécutive à une augmentation de la viscosité sanguine,
- Un déséquilibre dans les pressions alvéolaires et artérielles entraînant une diminution des possibilités de fixation de l'O_2 par les globules rouges,
- Les conséquences de la baisse du pH sur la fixation de l'oxygène au niveau des globules rouges et sur les capacités fonctionnelles du muscle.

Mais l'influence de certains de ces facteurs peut inversement favoriser l'augmentation de VO_2 (NUMMELA et RUSKO, 1995), et notre étude ne nous permet pas de valider l'une ou l'autre de ces hypothèses.

Il est également possible que l'évolution de la vitesse avant le 1300 m et par conséquent, l'état physiologique des athlètes à ce moment de la course induise la grandeur de la chute de VO_2. De plus, nous ne pouvons pas écarter le fait que les athlètes ne se sont peut-être pas tous engagés de la même manière dans cette phase de lutte contre la fatigue où le manque d'adversité apparaît plus cruellement.

L'analyse physiologique met en évidence une forte implication du système aérobie et confirme la prédominance de ce secteur dans la performance. Néanmoins d'autres études devront être menées pour améliorer nos connaissances sur l'intervention du système anaérobie et surtout son évolution avec la performance.
Une seconde partie va maintenant être consacrée aux aspects biomécaniques.

II. Analyse biomécanique

Cette analyse n'était pas l'objectif premier de notre travail centré plus particulièrement sur l'évolution des indices physiologiques (en particulier VO_2). Néanmoins, il nous est apparu réducteur d'aborder uniquement les aspects physiologiques d'autant que certains facteurs biomécaniques directement liés à

la vitesse de course étaient relativement faciles à mesurer. Les propos qui vont suivre ont pour simple objectif d'analyser l'évolution de la fréquence et de l'amplitude des foulées dans sa relation avec la performance. L'analyse sera forcément limitée car l'évolution du pattern de la foulée, ou bien les temps de contact et d'envol n'ont pas été relevés. D'autres études pourront avoir comme objet de développer plus spécifiquement ce secteur.

Sur un plan biomécanique, quelques rares données concernant l'amplitude et la fréquence des foulées existent dans la littérature pour des athlètes de 1500 m. SCHOLICH (1978) ont relevé des valeurs moyennes d'amplitude égale à 2 m et de fréquence à 3,53 hz pour un coureur de 1500 m de haut niveau : 3 min 32 s (vitesse moyenne = 25,5 $km.h^{-1}$). Mais ces valeurs étant des moyennes sur l'ensemble de la course, il nous est difficile de réaliser des comparaisons avec notre étude. L'analyse faite par GAJER et al. (2003) lors des championnats du monde de Paris, a permis de mettre en évidence l'évolution tour par tour de ces paramètres pour des athlètes de haut niveau. En finale des championnats du monde de Paris en 2003, l'amplitude maximale était atteinte au 1100 m, c'est à dire, à la fin du $3^{ème}$ tour (cf. figure 8, p 38). Une amplitude plus faible était relevée en début de course (500 m) et dans la dernière ligne droite lorsque la vitesse chute. Dans les premiers tours, il semblerait que les athlètes conservent une réserve d'amplitude (estimée à 5%) qui leur permettrait d'être plus économique au cours de cette phase de train et/ou d'accélérer plus tard dans la course. Dans notre étude, l'amplitude de la foulée notée pour le groupe A restait relativement stable entre le début et la fin de course (cf. figure 31, p 88). En revanche, l'amplitude du groupe B diminuait progressivement au fil des tours parallèlement à la chute de la vitesse. Ce dernier résultat pourrait être comparé à l'évolution sur 800 m, où une baisse de vitesse liée à une chute de l'amplitude était observée dans la seconde partie de l'épreuve (GAJER, 1995).

Les finalistes des championnats du monde à Paris augmentaient progressivement la fréquence de leurs foulées du 500 m au 1300 m (+ 8%) ; ensuite la valeur de ce paramètre diminuait dans les derniers 100 m (- 4%) où les athlètes résistent à la chute de vitesse (cf. figure 8, p 38). Les valeurs de fréquence utilisées par les athlètes de notre étude ont été plus importantes dans le dernier tour par rapport aux tours précédents : + 5,5% entre le 600 m et le 1400 m (cf. figure 29, p 87). Cette augmentation de fréquence (+ 10%)

apparaissait surtout pour le groupe des bons finisseurs (groupe A). Pour le groupe B, et contrairement aux athlètes du groupe A, la chute de vitesse s'est traduit également en fin de course par l'incapacité des athlètes à augmenter leur fréquence de foulées (cf. figure 30, p 88). En général, l'incapacité des athlètes à augmenter l'amplitude est « compensée » dans une certaine mesure par la possibilité d'augmenter la fréquence des foulées. Ceci se vérifie au cours des disciplines athlétiques (1500 m, 3000 m, 5000 m ....) où la vitesse est maintenue, voire augmentée en fin d'épreuve. Néanmoins, la chute de vitesse au cours des disciplines comme le 400 et le 800 m semble témoigner d'une augmentation insuffisante ou d'une baisse de la fréquence des foulées. Ainsi, cette chute conjointe de l'amplitude et de la fréquence peut être considérée comme le témoignage d'une fatigue intense. Ainsi, Maria MARTINS, une des meilleures françaises sur 1500 m a été capable d'augmenter sa fréquence de 9% à l'occasion des séries des championnats du monde de Paris 2003. En revanche, en demi-finale où elle n'a pu participer à l'accélération terminale, une chute de fréquence des foulées a pu être observée.

Selon DONATI (1994), la chute de ces paramètres pourrait avoir des causes différentes :

- la fréquence dépendrait de la capacité du système nerveux central à émettre une succession de stimuli nerveux émis en succession rapide, pour que la force soit exprimée rapidement,
- l'amplitude dépendrait des quantités de force exprimées lors de la phase d'appui.

Une fatigue neuro-musculaire et/ou liée aux forces de contractions auraient pour conséquence la baisse de vitesse en fin de course. L'intérêt de prochaines études serait de pouvoir évaluer de façon plus précise (notamment par des mesures des temps de contact / d'envol grâce à des outils comme l'opto-jump) l'évolution de ces paramètres et de la performance suite à un entraînement de force spécifique.

L'analyse physiologique et biomécanique des résultats que nous venons de présenter doit nous permettre de donner à présent quelques orientations en matière d'entraînement.

III. Conséquences pour l'entraînement

L'analyse des résultats obtenus lors des deux tests, a permis de caractériser nos coureurs de 1500 m.

La VMA moyenne des sujets était de **20,3 ± 0,6 km.h^{-1}**. Le niveau des athlètes dans le domaine de la puissance aérobie était assez homogène. Ces valeurs étaient caractéristiques d'une population de niveau interrégional. PADILLA et al. (1992) présente des valeurs de 21,4 ± 0,9 km.h^{-1} pour des athlètes de niveau national. Le type de test utilisé pour déterminer la VMA étant variable d'une étude à l'autre, nous sommes conscients que des différences peuvent être imputables également au protocole utilisé.

Sur le 1500 m, les athlètes de notre étude ont réalisé des performances qui se situaient à **11,5 ± 8,9 s** de leur record personnel. Pour diverses raisons, l'évaluation s'est déroulée à une période dite de préparation, qui n'était peut-être pas la plus favorable. D'autre part, les conditions expérimentales ne sont pas optimales pour que l'athlète réalise une performance de pointe. L'athlète se trouve seul contre lui-même, malgré la présence de la bicyclette et la motivation reste en dessous de la situation réelle de compétition. Par ailleurs, le port du masque s'est avéré une gêne pour les athlètes de par son poids (pourtant minime) et pour respirer naturellement. Une accoutumance au matériel aurait probablement réduit cette sensation rapportée par les athlètes. Aucune étude n'a cependant été trouvée rapportant un coût énergétique supplémentaire dû au port du K4.

Les temps réalisés sur 1500 m correspondaient à **107,65 ± 1,98%** de leur VMA obtenue lors du test TUB2. Ces valeurs étaient plus élevées que les estimations recueillies chez de bons coureurs par GACON (1995) : 102 et 105%. En revanche, elles sont très proches des valeurs mesurées par LACOUR et al. (1990) pour des athlètes de haut niveau : 108,9 ± 3,5%, ainsi que de celles communiquées par DIRRINGER pour Medhi BAALA lors de ses meilleures performances (3 min 34 s en 1999 et 3 min 28 s en 2003) effectuées respectivement à 106,5% et 107,3% de sa VMA (23,7 km.h^{-1} en 1999 et 24,2 km.h^{-1} en 2003). Nous devons néanmoins rester prudent dans les comparaisons pour les raisons évoquées ci-dessus. Les études menées par

LACOUR et al. (1990) ou PADILLA et al. (1992) pour des athlètes de sexe féminin et masculin de haut niveau (performances supérieures à 90% de la vitesse du meilleur athlète de l'année pour les hommes et 88% chez les femmes) montrent l'importance de la valeur de VMA pour l'atteinte de la haute performance. Nos résultats montraient également une corrélation (r^2 = 0,73) entre la vitesse du 1500 m et la VMA des athlètes engagés. Notre étude a permis en outre d'observer les évolutions de vitesse au fil de la course. Pour le 800 m, 100% des courses réalisées pour la performance utilisent une stratégie basée sur un départ rapide, puis les athlètes cherchent à maintenir un plateau préalable à la chute inéluctable de vitesse dans la dernière partie de la course (GAJER et al, 2000). Nous avons mis en évidence dans notre étude préalable, que cette stratégie n'est plus valable sur 1500 m, pour une durée d'effort qui se trouve doublée. Pour obtenir la meilleure performance, les athlètes doivent effectivement partir vite (sur 150 m), mais très rapidement trouver une allure de croisière sur des vitesses légèrement inférieures à la vitesse moyenne, de façon à pouvoir récupérer de ce départ et éventuellement accélérer dans le dernier 400 m. DIRRINGER (2003), entraîneur de haut niveau, confirme cette orientation en décrivant le 1500 m selon trois phases :

- « du départ au 300 m : phase de mise en action et de placement. Cette accélération n'est pas gênante sur le plan métabolique, surtout pour des spécialistes de 800 / 1500m, mais elle doit rester modérée et ne pas se prolonger au-delà du 300 m.
- du 300 au 1100 m : tronçon où la régularité du train est essentielle. Il faut veiller à ne pas trop « se mettre dans le rouge », afin de pouvoir produire une accélération terminale dans la dernière phase de course.
- du 1100 m à l'arrivée : accélération terminale qui conditionne souvent le classement final. »

L'analyse chronométrique de la finale des championnats du monde à Paris en 2003 illustre la chute importante de vitesse dés le second 100 m (13,7 ± 0,3 s à 15,2 ± 0,2 s pour le premier et le second 100 m respectivement). Cette vitesse se maintient ensuite en plateau pendant au moins 750 mètres. La répartition moyenne utilisée lors de cette finale correspond au modèle décrit précédemment dans l'étude A: 103,6% de la vitesse moyenne pour le premier 100 m, 98,3% pour les 1000 m qui suivent et 103,4% pour les 400 derniers

mètres. Nous ne possédions malheureusement pas les VMA de ces athlètes pour réaliser l'analyse et la comparaison en pourcentage de VMA.

Dans notre étude, la comparaison de nos deux groupes montre des différences significatives dans la répartition de l'effort au cours du 1500 m par les coureurs. La stratégie utilisée par les athlètes du groupe A de la présente étude est proche du modèle défini dans l'étude A préalable. Après un premier 150 m effectué à plus de **110% de VMA**, leur vitesse de course chute et se maintient en moyenne à **107% de VMA**. En revanche, l'autre groupe semble en « surrégime » et maintient une intensité proche de celle adoptée dans les premiers mètres (**109,8% de VMA**) sur la première partie de course. Ensuite, la tendance s'inverse en faveur du groupe A, capable de maintenir puis d'accélérer pour réaliser le dernier 400 m à près de **115% de VMA**. « Un pourcentage important de la VMA dans la première moitié de course n'hypothèque pas forcément la performance, mais la capacité à terminer vite » DIRRINGER (2004).

Pour une analyse encore plus riche d'enseignements, il aurait fallu que nos sujets réalisent deux 1500 m, en utilisant les deux types de stratégies. Mais pour des raisons matérielles et surtout de disponibilités des athlètes, ce type d'expérimentation est difficile à mettre en place. Nous pouvons néanmoins retenir les préconisations de GASTIN (1998) : «*The key to surging is to know when to drop back such that the body may recover from the transient increase in acidity and depletion of ATP-CP* » (La clef est peut-être de savoir quand ralentir, pour que le corps puisse récupérer de l'augmentation transitoire de l'acidité et de la baisse de l'ATP-CP). Ainsi, l'athlète sur 1500 m aurait intérêt à partir vite mais pas trop longtemps. Et nos résultats donnent du sens aux propos de J-Michel DIRRINGER :

« tout doit concourir à ménager sa monture sur une bonne partie de la course :

- réduire suffisamment tôt son accélération initiale,
- avoir une réserve d'amplitude de la foulée,
- ne pas être trop au dessus de la VMA (105%),

pour avoir la capacité à produire une accélération terminale ».

Cette information donnée aux entraîneurs pourrait leur permettre d'être beaucoup plus précis dans l'établissement d'un profil de course, à partir des

valeurs individuelles de VMA. Une allure de départ soutenue, maintenue trop longtemps peut être préjudiciable pour la suite, dans les courses pour la performance. L'athlète ayant les bonnes informations chronométriques assez tôt dans l'épreuve, peut alors adapter sa vitesse, pour finir dans de bonnes conditions.

Sur 800 m, les fins de course représentent la partie la moins rapide de l'épreuve. En comparaison sur 1500 m, nous avons pu montrer grâce à notre étude préalable, que les athlètes au niveau national et international, sont pour la plupart, capables d'accélérer notamment entre 1200 et 1300 m, même si la dernière ligne droite ressemble à une lutte contre la chute de la vitesse (comme sur 400 m et 800 m).

Pour se faire, l'athlète doit gérer au mieux ses ressources et une stratégie de course calculée en fonction de sa VMA pourrait être encore plus utile que celle estimée sur la base du niveau du moment de l'athlète.

Dans notre étude, le modèle issu du groupe A est le suivant :

- un premier 100 m à 110% de VMA
- suivi d'une phase de train (1000 m) à 107% de VMA
- et d'une fin de course (400 m) à 115% de VMA

Mais le nombre de sujets trop faibles et les différences interindividuelles qui existent dans l'exploitation du potentiel aérobie dans les épreuves supra-maximales ne nous permettent pas de généraliser ce modèle théorique.

Nos propos sont également à nuancer car si une majorité des coureurs répartissent leur effort globalement de cette manière, il existe à très haut niveau des exceptions à la règle (EL-GHERROUJ ; LAGAT) : « ces athlètes ont un profil de course qui se rapprochent du 800 m, avec un départ rapide, voire très rapide sur 400 m, le maintien d'un train très élevé jusqu'au 1200 m, pour finir ensuite « comme ils peuvent », surtout les 150 derniers mètres (comme au meeting de Zurich en 2004). EL-GHERROUJ pour des raisons physiques mais surtout psychologiques a besoin d'avoir distancé ses adversaires avant le dernier 100 m, ce qui explique ses accélérations franches du 1000 au 1100 m ou du 1000 au 1200 m. Cette accélération contribue probablement à son ralentissement terminal. Seuls des coureurs au registre de course exceptionnellement large peuvent courir de cette manière (800 / 1500 / 3000

m)» (DIRRINGER, 2004). Des études et des observations plus poussées dans ce domaine sont nécessaires.

La contribution respective des systèmes aérobie / anaérobies sur l'épreuve a été estimée à partir du calcul du déficit en oxygène (selon la méthode de MEDBO et al, 1988) en tenant compte des observations faites par GASTIN et al (1995). Les auteurs n'observaient pas de différences dans les valeurs du déficit pour des exercices supra-maximaux effectués à vitesse constante et de type « all-out ». Pour notre groupe de sujets, DO_2 max était égal à **66 ± 10,4 l.min^{-1}**. Ces valeurs paraissaient élevées au regard des 51 l.min^{-1} rapportées par GASTIN (1998) ou des 47,1 de SPENCER et GASTIN (2001). En revanche, elles étaient proches des valeurs relevées sur le terrain pour des coureurs de 1500 m par DUFFIELD et DAWSON (2003) : 71 ± 24,8 l.min^{-1}. Au-delà des contingences liées au matériel de mesure des gaz, certains auteurs (CRAIG et MORGAN, 1998) s'interrogent néanmoins, sur la validité de la mesure du déficit pour mesurer la capacité anaérobie.

La part aérobie estimée dans notre étude représentait **78,5 ± 3,6%** de la resynthèse totale de l'ATP. Elle est conforme aux données de la littérature. En effet, une revue assez large sur ce thème a été réalisée par DUFFIELD et DAWSON (2003). La part aérobie attribuée à la resynthèse de l'ATP varie sur 1500 m selon les auteurs entre 72 et 84%. Les valeurs inférieures à 80% sont évaluées grâce à des modèles mathématiques proposées pour du très haut niveau (3 min 29 s - 3 min 38 s au 1500 m), alors que les valeurs plus hautes (> 80%) sont issues d'expérimentations sur tapis roulant ou sur le terrain, en utilisant soit la méthode de MEDBO (WEYAND et al, 1993 ; SPENCER et GASTIN, 2001), soit des relevés de lactatémie post-course (HILL, 1999).

Les taux de lactate relevés dans notre étude : **14,9 mmol.l^{-1}**, sont cohérents par rapport aux valeurs expérimentales de HILL (1999) : 15,6 ± 4,3 mmol.l^{-1} (prélèvement post-exercice à 5 minutes). En revanche, elles restent inférieures aux valeurs rapportées par LACOUR et al. (1990) pour des athlètes de haut niveau en situation réelle de compétition : 20,8 ± 2,7 mmol.l^{-1} (prélèvement post-exercice entre 5 et 10 minutes). Ce constat est probablement dû au niveau moindre de nos sujets et dans une certaine mesure au cadre de l'épreuve expérimentale insuffisamment motivant.

Pour GASTIN (2001), la prédominance d'un système sur l'autre serait inversée autour de 75 s. DUFFIELD et DAWSON (2003) confirment le point d'équivalence dans la contribution des deux systèmes entre 70 et 80 s, plutôt que les 2-3 minutes antérieurement admises (KEUL, 1975 ; Mac ARDLE et al. 1981 ; FOX et MATHEWS, 1984) avant l'utilisation de la méthode de calcul du déficit, préconisée par MEDBO et al. (1988).

Ces données permettent de conforter l'idée d'une prédominance forte du système aérobie au-delà de 1 minute 30 s d'effort supra-maximal ; un entraînement des processus aérobie est alors nécessaire et indispensable.

L'analyse des résultats nous permet d'argumenter à la fois la nécessité de développer le secteur aérobie tout au long de l'année : améliorer la valeur de VMA, mais également le temps de maintien à VMA (ou endurance à VMA).

Le développement aérobie dans la programmation :

Actuellement, les entraîneurs et les athlètes consacrent beaucoup de séance sur le thème du développement de la puissance maximale aérobie durant la période hivernale. Ils le délaissent plus ou moins en période estivale, au profit du travail spécifique (dominante lactique). Au vue de l'importance de la contribution aérobie à la resynthèse d'ATP dans la course de 1500 m, il apparaît que le secteur aérobie doit être développé toute l'année, même en période pré-compétitive. **Il faudrait le considérer comme une qualité spécifique à part entière du coureur de 1500 m**. J-Michel DIRRINGER, l'entraîneur de Medhi BAALA préconisait déjà à l'occasion du colloque de SALON (2003), de ne pas délaisser ce secteur même en période pré-compétitive. En le développant l'hiver avec une courte phase de rappel spécifique lactique, puis en sollicitant de nouveau cette filière l'été en préambule du travail spécifique lactique, il semblait obtenir de meilleurs résultats avec ses athlètes.

VMA et temps de maintien (endurance) à VMA :

Il semble acquis qu'un haut niveau de VMA (et de VO_2max) est nécessaire pour être performant en demi-fond court. « le poids de la VMA est maximal, car la vitesse spécifique et la VMA sont très proches» GACON (1995). Notre étude confirme totalement ce point de vue. « L'aérobie libère la vitesse » selon J-

Claude VOLLMER, ex-entraîneur national auprès de la FFA. Nous ne pouvons qu'encourager les entraîneurs à développer la valeur de VMA chez leurs athlètes. Si VMA augmente, le confort de l'athlète sur le 1500 m va augmenter et ses possibilités de performances également. Pour une même vitesse de course, le déficit en oxygène sera moindre, ou à déficit égal, la vitesse de course sera augmentée. Mais si VMA est importante, le temps de maintien à VMA doit également être développé. Pour le 800 m, THOMAS et al. (2001) rapportent que VO_2max est maintenu durant 200 m seulement. En revanche, dans notre étude sur le 1500 m, VO_2max est atteint rapidement et le temps de maintien d'un plateau élevé est beaucoup plus long : 750 m voire plus pour les sujets qui ne présentent pas de chute notable de VO_2 (autour de 3 minutes). Ces résultats donnent du poids aux réflexions de J-Michel DIRRINGER qui explique la progression de Medhi BAALA de 1999 à 2003, par sa capacité à courir plus longtemps à VMA. GACON (1995) entraîneur national de la discipline, indiquait que le coureur de 1500 m, devait être capable de soutenir sa VMA aux alentours de 5 minutes.

Nos résultats semblent confirmer qu'un travail uniquement axé sur l'amélioration de VMA ne suffit pas, le temps de maintien à VO_2max devenant important. Le développement sur des distances courtes (travail sur des durées de 30 s à 1 min 30 s ou sur des distances comprises entre 200 à 400 m effectuées à des vitesses proches de la VMA et avec des temps de récupération inférieurs au temps d'effort) permet de stimuler de façon prédominante la puissance du système aérobie, alors que celui sur des distances plus longues (jusqu'à 3 minutes ou 1000 m), la capacité du système aérobie. Philippe COLLARD (cadre technique à la FFA, ancien recordman de France du 800 m et actuellement entraîneur de demi-fond) explique de façon empirique, la relative « non-progression » de sa discipline par un travail insuffisant de l'endurance aérobie à des intensités élevées.

La répétition de ce type de travail permet également à l'athlète d'améliorer son coût énergétique aux vitesses spécifiques, de par :

- l'utilisation d'un rapport optimal entre la fréquence et l'amplitude de sa foulée,
- le relâchement recherché qui lui permet de minimiser la dépense d'énergie inutile dûe à des contractions parasites.

Au delà de ces aspects mécaniques et physiologiques, ce sont également les facultés à durer psychologiquement dans ce type d'effort qui sont développées, et qui peuvent ensuite être transférées sur la compétition.
Ainsi, pour l'entraînement, il est important de considérer la durée de l'évènement (et donc la contribution relative des deux systèmes), le pourcentage d'utilisation des possibilités maximales de l'athlète lors de l'épreuve, et le temps de maintien de ces pourcentages.

La place du développement de la vitesse spécifique :

La vitesse spécifique correspond à la vitesse moyenne du 1500 m, mais peut également varier pour tenir compte de l'évolution de la vitesse au cours du 1500 m. Pouvoir partir sur des bases chronométriques élevées sans conséquence pour le reste de l'épreuve nécessite un entraînement spécifique qui doit permettre à l'athlète de disposer de qualités proches du coureur de 800 m. Par ailleurs, ce travail de changement de rythme (vite + train) peut s'envisager à la fois sur les séquences de développement de VMA, et sur les séances spécifiques à la vitesse de course, d'autant plus que l'athlète est jeune : il doit se construire des repères de rythme et se construire une forme d'économie de course sur ces allures.
A haut niveau, la préoccupation de J-Michel DIRRINGER vis-à-vis d'un coureur de 1500 m est qu'il soit performant à la fois sur 800 m et sur 3000 m, sans se préoccuper outre mesure de l'allure spécifique du 1500 m. Pour preuve, Medhi BAALA a réalisé beaucoup de travail pour développer la VMA (95 à 105%), lors de séances type 800 m et très peu de travail sur 1500 m. Pourtant, il a réalisé moins de 3 min 29 s sur 1500 m (DIRRINGER, 2004).

Ainsi, il est important d'envisager le travail spécifique sous ses deux formes :

- un travail spécifique des systèmes physiologiques qui servent de support à l'épreuve,
- un travail spécifique à l'allure ou aux allures utilisées sur l'épreuve notamment par rapport à la notion d'efficacité.

Les paramètres physiologiques sont des facteurs importants de la performance en demi-fond et doivent être systématiquement développés. Cependant, nous

ne pouvons pas envisager d'optimiser les sources d'énergie sans prendre en compte la manière dont les athlètes la dépensent et sans appréhender la notion de coût énergétique. Notre étude ne s'est pas centrée sur ces aspects, mais il aurait été intéressant de calculer le coût énergétique de chaque athlète lors du 1500 m et de le comparer avec celui évalué lors du test TUB2.

Une étude menée par HANON (2002) a pu montrer que seuls les espoirs masculins français forts à la fois sur le plan aérobie et sur le plan musculaire avaient atteint le niveau international sur 1500 mètres. Ce lien entre les qualités musculaires et la performance en demi-fond a également été mis en évidence par PAAVOLAINEN et al. (1999) qui ont pu montrer l'amélioration du coût énergétique suite à un développement des qualités musculaires. Pour un groupe de 18 coureurs entraînés en endurance, un entraînement consacrant 32% du temps à l'entraînement de la force pendant 9 semaines, a permis d'améliorer les performances sur 5000 m, sans changement de VO_2max. Cette amélioration était due à l'amélioration des caractéristiques neuromusculaires qui se sont répercutées favorablement sur l'économie de course. Dans une autre étude sur le 1500 m féminin, il a pu être montré que les qualités musculaires illustrées par la vitesse et la détente verticale étaient liées à la capacité à accélérer en situation de fatigue (dernier 200 m d'un 500 m effectué à l'allure spécifique du 1500 m) (HANON et al. 2004). Une corrélation significative a été trouvée pour des athlètes spécialistes de 1500 m entre les tests au squat-jump et l'amplitude (HANON et al. 2004). Une amélioration de la force des membres inférieurs augmenterait l'amplitude maximale de la foulée. Ainsi pour des vitesses utilisées lors du 1500 m, l'athlète pourrait conserver une réserve d'amplitude lui permettant ainsi d'être plus économique dans la phase de « train » (1000 m intermédiaire), et donc de limiter la fatigue. Une amélioration notable des paramètres de la foulée génère néanmoins une fatigue supplémentaire qu'il faudra « compenser » par une amélioration des capacités physiologiques (GAJER, 1995).

L'étude des ratios : vitesse / amplitude et vitesse / fréquence peut également nous permettre de situer le comportement de nos athlètes par rapport à des athlètes de haut niveau pour qui la vitesse de course est supérieure. Un ratio « vitesse / amplitude » inférieur observé pour nos athlètes au second tour par

rapport au niveau mondial semblerait signifier une utilisation supérieure de l'amplitude par rapport à la vitesse dans notre population. Ce constat est encore plus marqué pour le groupe B. En effet, le groupe B présente un ratio « vitesse / fréquence » plus élevé, comparé au groupe A et un ratio « vitesse / amplitude » plus faible signifiant une relative utilisation de l'amplitude plus importante que le groupe A.

En fin de course, si l'on compare les ratios (mondial vs. groupes de notre étude) la part de la fréquence semble être davantage impliquée au niveau mondial dans la vitesse. De ces données, peut-on dire que les athlètes de notre étude avaient une amplitude de foulée trop importante, et peut-être impliquant une dépense énergétique supérieure ? De plus, le niveau d'amplitude relatif (exprimé par rapport à la valeur de l'amplitude maximale) peut-il aussi être jugé comme trop important ? L'évaluation du niveau de force générale des membres inférieurs pourrait être un élément de réponse. Ces hypothèses demande à être vérifiées dans l'avenir. D'autres observations de course permettraient de compléter et d'affiner l'analyse du 1500 m, tels que les paramètres de la fréquence, les temps de contact et d'envol. Le temps de contact est important, notamment dans l'efficacité du mouvement de course. Les athlètes de haut niveau semblent avoir un temps de contact qui leur permet d'optimiser le déplacement du bassin sur l'appui (l'articulation de la cheville et de la hanche étant mise à contribution, alors que celle du genou doit résister à l'écrasement). Des temps de contact trop brefs peuvent être synonymes en demi-fond de foulées « sautées » où le centre de gravité réalise des oscillations verticales importantes, peu propices à l'efficacité et à l'économie de course.

Ainsi, l'amélioration des facteurs liés à la foulée doit être une préoccupation des entraîneurs car il permet au coureur de progresser en vitesse et d'améliorer son coût énergétique si cette amélioration est conjointe au développement des processus physiologique. En effet, le point essentiel reste de toujours mettre la progression des paramètres liés à la foulée en relation avec la durée de l'effort et le travail énergétique (qu'il soit à dominante aérobie ou anaérobie lactique). La capacité à maintenir une amplitude et une fréquence de foulée optimale sur la durée de l'épreuve, ainsi que la capacité à faire varier ces paramètres en

fonction des évènements de course, est capitale. La programmation d'un travail spécifique dans ce domaine nécessite l'analyse des exigences de la course. Celle-ci a été réalisée par GAJER et al. (2002). Les auteurs définissent des séances de musculation spécifique à partir d'une analyse mécanique et gestuelle (tableau 26).

Tableau 26 : description des actions musculaires lors d'une foulée.

	Muscles	Types de contraction	Muscles	Types de contraction
Hanche	**Extenseurs** Fessiers Ischios	Concentrique	**Fléchisseurs** Psoas **Extenseurs** Fessiers (Ischios)	Concentrique Excentrique-Concentrique
Genou	**Extenseurs** Quadriceps	Stato-dynamique	**Fléchisseurs** Ischios **Extenseurs** Quadriceps	Conc-Exc-Conc Fléchisseurs Jambier antérieur
Cheville	**Extenseurs** Jumeaux Soléaire	Pliométrique	**Fléchisseurs** Jambier antérieur	
Pied	**Fléchisseurs**	Pliométrique		

Le développement spécifique vise :

- le renforcement des impulsions verticales au travers :
  - d'exercices articulaires (exemple : montées sur pointes, etc.),
  - d'exercices segmentaires (exemple : squats, rebonds vers le haut, etc.),
  - puis globaux (développé fentes, courses en descente, etc.).

- le renforcement des impulsions horizontales au travers :
  - d'exercices articulaires (exemple : extension de hanche, travail des ischio-jambiers, etc.),
  - d'exercices segmentaires (exemple : fentes, rebonds vers l'avant, etc.),
  - puis globaux (courses en côtes, courses avec chariot).

L'évolution de ces exercices doit être envisagée selon la durée de l'effort. Le maintien d'une amplitude optimale notamment est un problème d'endurance de force, qui est fonction de l'intensité de travail et du volume (durée ou nombre de répétitions) ; d'où l'intérêt de travailler la force spécifique de l'appui, afin d'être capable de maintenir une amplitude de foulée le plus longtemps possible (GACON, 1997). Le développement de l'endurance de force peut être envisagé en enchaînant des exercices préparatoires (échauffement), suivi d'exercices sollicitant la force au plan local, sur un groupe musculaire ciblé (pré-fatigue), pour terminer sur un exercice plus global (course contre résistance par exemple).

Quant aux exercices visant le développement de la vitesse gestuelle, ils pourront avoir leur place, de manière analytique ou globale, mais ces exercices seuls ne peuvent suffire. Il faut adapter les progrès obtenus dans le travail technique à la vitesse spécifique de course, d'une part pour vérifier l'assimilation du travail, et d'autre part, pour obtenir le relâchement indispensable à la performance :

- courses sur des allures de compétitions en passant sur des portions lattées,
- imposer des tempos (pour la vitesse gestuelle).

Enfin dans la programmation, les réflexions de Zhang ZHIQI, entraîneur de demi-fond en Chine, présentées lors du congrès mondial des entraîneurs d'athlétisme (1994) semblent toujours d'actualité. L'auteur observe des progressions significatives sur des tests de vitesse, détente, etc., mais également sur 1500 m (moins 30 s) à l'issue d'un travail à base de circuit-trainings appliqués pendant une ou deux années chez des athlètes féminines :

- lors de la période hivernale, les exercices visent à développer l'endurance générale et à combler les faiblesses individuelles. Les exigences techniques de la course sont respectées. Les exercices sont variés, le nombre de répétitions et le nombre de séries sont importants, mais l'intensité n'est pas élevée. La fréquence cardiaque atteinte est similaire à celle utilisée pour développer l'endurance en course.
- lors de la période précompétitive, les exercices visent à développer l'endurance de force, la vitesse et la technique de course. Les actions

motrices sont rapides, de grande amplitude, et l'intensité est élevée. Le nombre d'exercices et le nombre de séries sont peu élevés.

- lors de la période précédant la compétition, les exercices visent à développer le système anaérobie lactique. Les exercices sont très intenses, mais leur nombre faible, ainsi que le nombre de séries.

L'entraînement de la force spécifique est organisé sous forme de circuits comprenant 6 à 8 exercices par série, 3 à 8 séries par entraînement et 2 à 3 séries par semaine.

Le développement des qualités physiologiques et des qualités musculaires sont nécessaires pour progresser et/ou atteindre le haut niveau. Les entraîneurs doivent s'inspirer des modèles de réussite sur le terrain mais également des résultats obtenus en recherches appliquées. L'une et l'autre des parties doivent s'enrichir mutuellement, pour optimiser le travail proposé aux athlètes.

IV. Retour pour l'athlète et son entraîneur

Parallèlement, ce travail de recherche se devait d'apporter des éléments concrets à l'entraîneur concernant son athlète (évolution des fréquences cardiaques au cours de chaque effort, évolution de la consommation d'oxygène, valeurs de lactatémie, temps de passage).
Les résultats de ces deux tests leur ont été envoyés dans les deux mois qui ont suivi l'évaluation avec quelques explications sur les données et leur utilisation possible pour l'entraînement et/ou la compétition (gestion et répartition de l'effort). Des résultats plus complets nécessitant plus de temps ont été résumés dans un petit livret personnel dont chaque athlète et chaque entraîneur ont été destinataires (cf. annexe).

Des échanges individualisés plus poussés sont envisagés et une table ronde avec les entraîneurs sur l'entraînement du 1500 m est prévue au cours de l'année 2005.

Conclusion

L'objectif principal de notre étude était d'étudier l'évolution des paramètres physiologiques au cours d'une épreuve de 1500 m courue sur le mode de la compétition. Un premier travail a consisté à observer des compétitions de différents niveaux afin de dégager un modèle de répartition de l'effort. Celui-ci se caractérise par :

- un départ rapide sur 150 m (105% de la vitesse moyenne),
- suivi d'une phase de train jusqu'au 1100 m où l'allure devient inférieure à la vitesse moyenne (98%),
- la fin de course est en accélération (102%), surtout du 1200 au 1300 m.

A partir de cette proposition de modèle, nous avons pu mettre en place une course expérimentale de 1500 m pour 12 athlètes de niveaux interrégional et national.

Nous avons pu montrer pour l'ensemble de nos sujets que:

1) VO_2max était bien atteint et un pic était observé pour le groupe au bout de 450 m.
2) VO_2 diminuait ensuite de façon significative pour maintenir ensuite un état semi-stationnaire durant environ 800 m.
3) une chute de VO_2 était observée en fin de course pour 9 sujets sur 12.

Ces éléments ont été discutés en rapport avec les données de la littérature : il semble qu'un départ rapide comme nous pouvons l'observer sur 1500 m soit favorable pour accélérer la cinétique de VO_2 en début d'exercice, et pour atteindre VO_2 max. La chute de VO_2 déjà observée sur 800 m par d'autres auteurs, a pu être mise en relation avec la baisse du volume courant et avec la vitesse. Par ailleurs, d'autres hypothèses telles que l'évolution du débit cardiaque, la baisse du pH ont été envisagées.

Notre étude nous a permis également de distinguer deux groupes de sujets : bons finisseurs et mauvais finisseurs. La chute de VO_2 en fin de course est plus

marquée pour le groupe qui termine moins bien l'épreuve de 1500 m, mais il est possible d'observer une baisse de VO_2 même chez des athlètes qui finissent bien. Ainsi, à l'avenir d'autres études pourront avoir pour but de mieux comprendre les causes de cette chute de VO_2 en fin de course et pourront établir la relation avec la stratégie de course utilisée. Il serait intéressant de répondre à la question : pourquoi dans une optique de performance vaut-il mieux partir vite, quitte à mal finir plutôt que courir à allure constante ou en « négative-split » ?

Par ailleurs, l'évaluation de la contribution aérobie a permis de confirmer la forte participation du système aérobie dans cette épreuve (78%). Les préconisations faites aux entraîneurs vont dans le sens d'un travail important de cette filière énergétique tout au long de l'année. Ce secteur peut être considéré comme une qualité à développer jusqu'en période de préparation spécifique du coureur de 1500 m. En effet, le développement de la puissance maximale aérobie permettrait à l'athlète :

- de parcourir son 1500 m en minimisant le déficit maximal d'oxygène pour une même vitesse, d'épargner la capacité anaérobie et donc ouvre la possibilité de finir plus vite,
- ou d'aller plus vite pour un même déficit d'oxygène contracté au début de l'épreuve.

L'accent doit également être mis sur le développement du temps de maintien à VMA, compte tenu du temps passé à VO_2max sur cette distance.

Des orientations concernant le rapport amplitude / fréquence optimal de la foulée et sur les qualités musculaires sous-jacentes ont été envisagées et méritent encore d'être développées.

Enfin, des qualités de vitesse de base sont nécessaires pour que l'athlète puisse :

- utiliser un pourcentage le plus faible possible de sa vitesse maximale et récupérer rapidement d'un départ rapide.
- disposer d'une réserve qui lui permette d'accélérer en fin de course, à 300 m de l'arrivée.

Résumé

Evaluation de la contribution du système aérobie lors d'une épreuve de 1500m en course à pied.

Ce projet avait pour objet de déterminer l'évolution de VO2 au cours d'une épreuve de 1500m réalisée sur le mode d'une compétition où la performance est recherchée.
Les études antérieures sur ce sujet ont été menées sur tapis roulant à puissance constante et ont conclu au fait que les athlètes n'atteignaient pas VO2max au cours d'un 1500m. La vitesse de course n'étant pas constante en compétition, nous souhaitions vérifier notamment si la répartition de l'effort pouvait avoir une influence sur la cinétique de la consommation d'oxygène.

Afin de pouvoir reproduire ultérieurement la stratégie utilisée par les athlètes en compétition, la première phase (étude A) de ce travail est de recueillir puis d'analyser un grand nombre de courses de différents niveaux. Il est à noter que seules les courses dont le résultat chronométrique était proche du record des athlètes (3 sec d'écart au maximum) ont été retenues.
Ainsi, les courses de 49 athlètes sont observées, regroupées selon leur niveau afin d'établir un modèle optimal de répartition de l'effort.
Cette première étude a permis de montrer que les courses de niveaux régional et interrégional étaient plus aléatoires au plan de la répartition de l'effort. Seules les courses nationales et internationales nous ont donc permis de déterminer le modèle suivant :
- un départ rapide puisque le premier 100 m est pour tous les niveaux le 100 m le plus rapide de la course (105% de la vitesse moyenne).
- un ralentissement dès le deuxième 100m puis un maintien de cette vitesse jusqu'aux 1000m (98% de la vitesse moyenne).
- une accélération du 1200 aux 1300m ce qui rend le dernier 400 m plus rapide (102% de la vitesse moyenne).
Il est à noter l'absence d'accélération terminale dans le dernier 100 m.

L'étude B est centrée sur l'observation de VO2 au cours d'un 1500m dont la répartition de l'effort est basé sur le modèle préalablement établi dans l'étude A. Douze coureurs de niveau interrégional et national ont participé à un premier test de détermination de VO2max (test TUB 2) puis à un 1500m basé sur le modèle de la répartition de l'effort préalablement établi. Le 1500m a été réalisé à 107,6 ± 2% de VMA (TUB2).
La valeur moyenne de VO2max recueillie au cours du test de TUB2 (66,1 ± 7 $ml.mn^{-1}.kg^{-1}$) est atteinte ou dépassée (69,5 ± 6,6 $ml.mn^{-1}.kg^{-1}$) en moyenne à 459 ± 59,6 m de course soit 55,9 ± 7,5 sec de course. Consécutivement à ce pic, une première baisse significative de 8% est rapidement notée chez tous les athlètes. Un état stationnaire est ensuite observé pendant les 800m suivants. En fin de course, VO2 chute de nouveau (5%) pour 11 sujets sur 12.
En se basant sur la vitesse de fin de course, supérieure (groupe A) ou inférieure (groupe B) à la vitesse moyenne du 1500, deux groupes de 6 sujets peuvent être différenciés. Le groupe qui finit moins bien est parti plus vite, plus longtemps (vitesse supérieure à la vitesse moyenne de course pendant 400m) : ces six coureurs présentent un temps d'atteinte de VO2max plus court et une chute de VO2 en fin de course plus prononcée que les autres coureurs. Néanmoins, il faut également noter une chute de VO2 chez les coureurs qui finissent le 1500m au dessus de la vitesse moyenne de course.

Enfin, la part du métabolisme aérobie correspond selon nos calculs à 78% de la fourniture énergétique totale et permet donc de confirmer la forte participation du système aérobie dans cette épreuve.

Résumé

Evaluation de la contribution du système aérobie lors d'une épreuve de 1500m en course à pied.

Ce projet avait pour objet de déterminer l'évolution de VO2 au cours d'une épreuve de 1500m réalisée sur le mode d'une compétition où la performance est recherchée.
Les études antérieures sur ce sujet ont été menées sur tapis roulant à puissance constante et ont conclu au fait que les athlètes n'atteignaient pas VO2max au cours d'un 1500m. La vitesse de course n'étant pas constante en compétition, nous souhaitions vérifier notamment si la répartition de l'effort pouvait avoir une influence sur la cinétique de la consommation d'oxygène.

Afin de pouvoir reproduire ultérieurement la stratégie utilisée par les athlètes en compétition, la première phase (étude A) de ce travail est de recueillir puis d'analyser un grand nombre de courses de différents niveaux. Il est à noter que seules les courses dont le résultat chronométrique était proche du record des athlètes (3 sec d'écart au maximum) ont été retenues.
Ainsi, les courses de 49 athlètes sont observées, regroupées selon leur niveau afin d'établir un modèle optimal de répartition de l'effort.
Cette première étude a permis de montrer que les courses de niveaux régional et interrégional étaient plus aléatoires au plan de la répartition de l'effort. Seules les courses nationales et internationales nous ont donc permis de déterminer le modèle suivant :
- un départ rapide puisque le premier 100 m est pour tous les niveaux le 100 m le plus rapide de la course (105% de la vitesse moyenne).
- un ralentissement dès le deuxième 100m puis un maintien de cette vitesse jusqu'aux 1000m (98% de la vitesse moyenne).
- une accélération du 1200 aux 1300m ce qui rend le dernier 400 m plus rapide (102% de la vitesse moyenne).
Il est à noter l'absence d'accélération terminale dans le dernier 100 m.

L'étude B est centrée sur l'observation de VO2 au cours d'un 1500m dont la répartition de l'effort est basé sur le modèle préalablement établi dans l'étude A. Douze coureurs de niveau interrégional et national ont participé à un premier test de détermination de VO2max (test TUB 2) puis à un 1500m basé sur le modèle de la répartition de l'effort préalablement établi. Le 1500m a été réalisé à 107,6 $\pm$ 2% de VMA (TUB2).
La valeur moyenne de VO2max recueillie au cours du test de TUB2 (66,1 $\pm$ 7 $ml.mn^{-1}.kg^{-1}$) est atteinte ou dépassée (69,5 $\pm$ 6,6 $ml.mn^{-1}.kg^{-1}$) en moyenne à 459 $\pm$ 59,6 m de course soit 55,9 $\pm$ 7,5 sec de course. Consécutivement à ce pic, une première baisse significative de 8% est rapidement notée chez tous les athlètes. Un état stationnaire est ensuite observé pendant les 800m suivants. En fin de course, VO2 chute de nouveau (5%) pour 11 sujets sur 12.
En se basant sur la vitesse de fin de course, supérieure (groupe A) ou inférieure (groupe B) à la vitesse moyenne du 1500, deux groupes de 6 sujets peuvent être différenciés. Le groupe qui finit moins bien est parti plus vite, plus longtemps (vitesse supérieure à la vitesse moyenne de course pendant 400m) : ces six coureurs présentent un temps d'atteinte de VO2max plus court et une chute de VO2 en fin de course plus prononcée que les autres coureurs. Néanmoins, il faut également noter une chute de VO2 chez les coureurs qui finissent le 1500m au dessus de la vitesse moyenne de course.

Enfin, la part du métabolisme aérobie correspond selon nos calculs à 78% de la fourniture énergétique totale et permet donc de confirmer la forte participation du système aérobie dans cette épreuve.