

La vitesse terminale en course de demi-fond :

Réflexion sur les Championnats d'Europe

Les entraîneurs nationaux ont livré les temps de passage des courses de demi-fond court et long des championnats d'Europe s'étant déroulé en août 2002 à Munich (revue de l'AEFA de septembre 2002).

L'examen des courbes de vitesse et d'accélération en fonction de la distance nous a permis de dégager quelques pistes de réflexion quant aux points forts à développer pour les coureurs de demi fond français.

La vitesse de référence est celle du coureur arrivé premier de la course et la seconde courbe est, le cas échéant, celle du ou des coureurs français.

Rappel concernant les facteurs énergétiques de la performance en demi-fond. Depuis le physiologiste Wilkie puis di Prampero qui est intervenu brillamment au colloque demi-fond de Châtenay-Malabry en Novembre dernier, nous savons que les paramètres bionérgétiques de la performance en demi-fond sont les suivants :

- la **capacité anaérobie** réserve d'énergie (joules) fournie par les métabolismes anaérobies alactique et lactique,
- la **puissance ou maximale aérobie** (PMA ou VMA) (en joules par seconde c'est-à-dire en watts), la puissance étant mesurée par son équivalent en consommation maximale d'oxygène : VO₂max,
- le délai d'ajustement de la consommation maximale d'oxygène que l'on appelle le **déficit d'oxygène initial** qui va amputer d'autant, en début d'exercice, la capacité lactique cité au premier point.

- le **coût énergétique** de la course qui va faire correspondre à une consommation d'oxygène donnée une vitesse de course. Etre économe revient à consommer peu d'oxygène (et d'énergie) à une vitesse donnée (en joules par mètre et par kilogramme de poids de corps). Ce coût énergétique caractérise l'économie gestuelle du coureur. Cependant, très souvent, les coureurs qui ont une consommation maximale d'oxygène élevée (>78 ml.min⁻¹.kg⁻¹ chez les hommes et >68 ml.kg⁻¹.min⁻¹ chez les filles) ne sont pas ceux qui sont les plus économes (Billat et al., 2001).

Cela peut se résumer à l'équation suivante (di Prampero et al., 1993) : $E_{max} = Can/tc + PMA - PMA/\tau \times (1 - e^{-tc/\tau})$

Où Can est la capacité anaérobie (lactique + alactique), tc est le temps de course, PMA est la puissance maximale aérobie, τ (tau) est le temps qu'il faut (environ 20s) pour atteindre

63% de son VO₂max en début d'exercice (on appelle cela la constante de temps d'ajustement de la consommation d'oxygène), et enfin le troisième terme de l'équation : $PMA/\tau \times (1 - e^{-tc/\tau})$ représente l'énergie qui doit être fournie au début d'exercice par les métabolismes anaérobies pour compenser le déficit d'oxygène initial (qui peut être diminué par l'échauffement).

Cette énergie représente 30 % de l'énergie de course pour un exercice qui dure environ 1min40s chez les juniors filles de l'équipe de France et 42% chez les garçons pour un 600m couru en moyenne en 1min25s (que nous avons mesuré au stage de Pâques à Fréjus en 2002).

On peut donc considérer qu'il est souhaitable pour réussir en course de demi-fond avoir :

- d'avoir un O₂max élevé,
- une faible inertie du métabolisme aérobie (τ le plus faible possible),
- une grande capacité lactique.

En effet si VO₂max est élevé et que l'ajustement de la consommation d'oxygène se déroule rapidement, la capacité lactique sera moins mise à contribution, la fin de course pouvant être alors plus rapide.

En outre, si la vitesse maximale de pointe du demi-fondeur est élevée (vitesse sur 60m lancé), grâce notamment à une bonne réserve de phosphocréatine (PC) et une concentration élevée en enzyme créatine kinase, l'ATP (Adénosine Tri Phosphate)

sera fournie rapidement sans avoir recours, en début de course, à la fusion de 2ADP (Adénosine Di Phosphate) pour fournir de l'ATP en urgence avec une accumulation d'AMP (adénosine mono phosphate) se dégradant en Inosine Mono Phosphate (IMP) et en ammonium provoquant une fatigue musculaire précoce.

Le coût énergétique est moins déterminant pour la performance du demi-fondeur.

On constate cependant que le coureur de demi-fond doit avoir de nombreuses qualités énergétiques avec lesquelles il doit composer selon les qualités de l'adversaire en championnat.

Concernant les courses à record il doit tout d'abord tenir compte de ses qualités intrinsèques et « monter » la course en accord avec ses partenaires.

En outre, il faut garder à l'esprit que l'enchaînement des courses peut, à partir de la demi-finale, faire prendre un problème de récupération avec celui d'un défaut de vitesse terminale inhérente à un manque de capacité lactique et/ou un manque de puissance maximale aérobie qui est compensé en début de course par la capacité lactique qui s'épuise alors de façon précoce.

Les commentaires des courses se font selon cet angle de vue énergétique sans strictement aucun jugement de valeur.

Ce n'est qu'une illustration des points rappelés précédemment.

LE 800 M

Hommes

La course des séries (figures 1a-d) nous montre qu'après le départ, la vitesse diminue jusqu'au 600m dans la première série (celle d'Aissat, fig 1a) et que le Français n'a pu maintenir la vitesse entre le 600 et le 800m. Concernant la série 2, après la classique décélération (figure 1b), la vitesse est remontée dès le 400 mètre pour se stabiliser jusqu'à la fin de course. Le Français, Barre, a suivi le même profil de course à une vitesse inférieure avec une baisse de vitesse entre le 600 et le 800m (fig 1b). On peut alors soupçonner effectivement un manque de puissance maximale aérobie (VO2max).

En série 4, Lacasse a suivi le profil de course de la tête avec une baisse continue de vitesse sauf pour Lacasse qui a stabilisé la sienne entre le 400 et le 600m ce qui lui a permis de baisser davantage sa vitesse de course entre le 600 et le 800m sans compromettre sa qualification (fig 1c). En demi finale, Lacasse a bien suivi (baisse de vitesse puis accélération du 400 au 600m) mais son accélération entre le 600 et le 800m a été moins marquée qu'au niveau de la tête de course (figure 1d).

Ce défaut de vitesse maximale est peut être le reflet d'un manque de récupération qui intervient dès le 400m. Dans cette demi finale, le coût énergétique de l'accélération positive sur 800m n'a représenté que 0,15% de la dépense énergétique sur un 800m (voir pour méthode de calcul, l'article de Cottin et al., 2002). Cependant l'accélération dépend de la force F selon l'équation de Newton : ($F = ma$, m étant la masse et a l'accélération), ce qui implique une fraîcheur musculaire suffisante pour produire cette force. Dans sa demi-finale (fig 1e), Aissat a suivi la tête de course (baisse de vitesse, stabilisation du 400-600m puis accélération) alors que dans la finale il a davantage diminué sa vitesse entre le 200-400m et n'a pu l'augmenter autant que l'a fait la tête de course entre le 400 et le 800m (fig 1f).

On peut évoquer plutôt le manque de récupération qui pourrait être du à une puissance maximale aérobie trop basse induisant une forte sollicitation du métabolisme lactique à chaque course compromettant la récupération au fil des tours. Le coefficient de variation de la vitesse sur 800m est de 5% ce qui est assez bas. Cela signifie que les écarts de vitesse à la moyenne ne représentent que 5% de la vitesse moyenne de course.

Femmes

(figures 2 a-d)

Chez les féminines, la série 1 s'est courue en baisse de vitesse jusqu'au 600m pour finir en une augmentation très marquée (fig 2a) ; Grouselle qui était moins rapide dans les 400 premiers mètres a accéléré dès le 400m mais a vu sa vitesse décroître au 600m alors que la tête de course augmentait la sienne très fortement (fig 2a). Ce départ plutôt lent n'a pu être rattrapé par cette accélération de milieu de course qui l'a pénalisé à la fin de course. Un départ lent peut être du à un manque d'échauffement, une tactique prudente qui avait pour objectif de ne pas entamer la capacité lactique de façon précoce.

Cependant, cette tentative de course équilibrée n'a pas permis d'assurer la fin de course. La vitesse au premier 200m n'était pourtant pas très rapide par rapport à la deuxième série (29s3 contre 28s3). Un travail de puissance lactique et de vitesse aurait pu permettre d'avoir une marge de sécurité plus importante dans le premier 200m.

La seconde série (fig 2b) est partie vite et a ralenti du 200m au 400m pour se stabiliser dans les 400 derniers mètres, la tête de course augmentant légèrement la sienne dans les 200 derniers mètres alors que Fouquet diminuait sa vitesse de course dans les deux cent derniers mètres. La quatrième série a été courue à vitesse décroissante (figure 2c) à l'instar de la première demi-finale (fig 2d) la course s'est courue à vitesse décroissante. Coulaud a vu sa vitesse chuter de façon plus brutale surtout à partir du 400 mètres.

Figure 1a : Série 1 - 800 m hommes

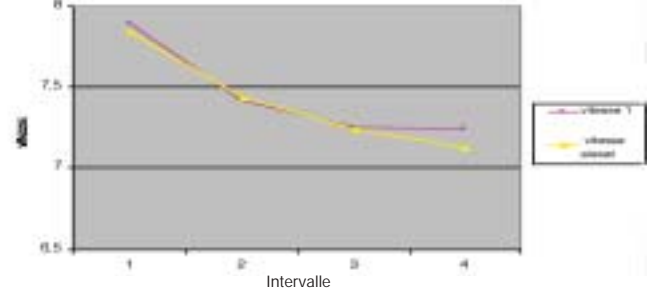


Figure 1b : Série 2 - 800 m hommes

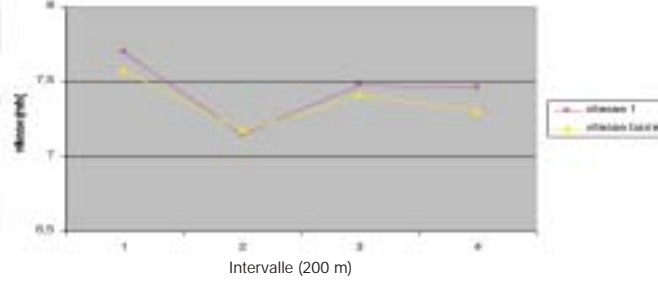


Figure 1c : Série 4 - 800 m hommes

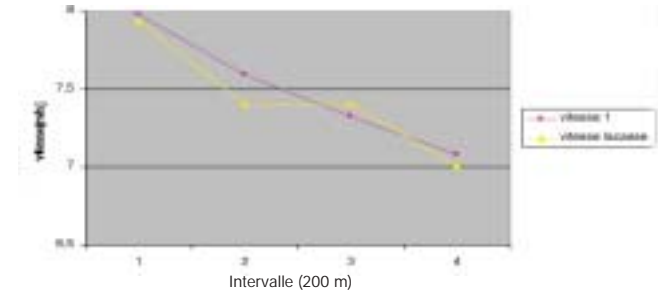


Figure 1d : Demi 1 - 800 m hommes

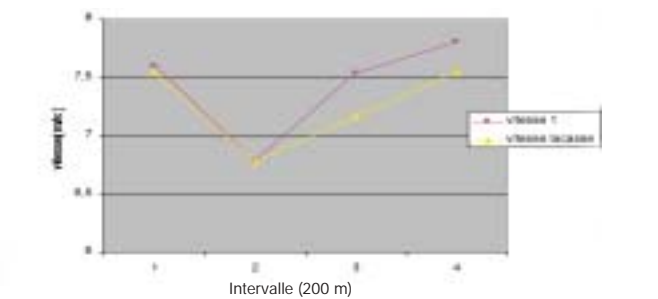


Figure 1e : Demi 2 - 800 m hommes

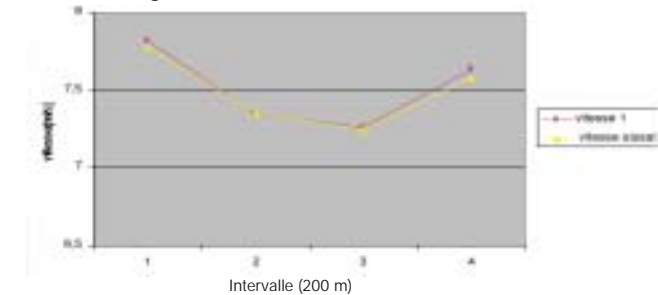


Figure 1f : Finale - 800 m hommes

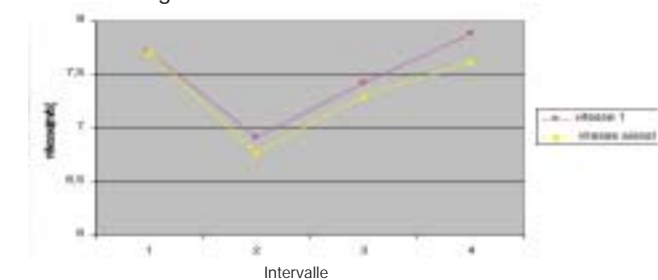


Figure 2a : Série 1 - 800 m femmes

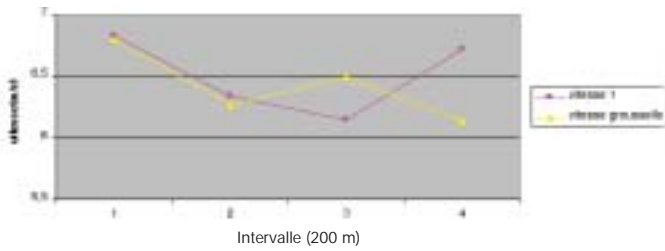


Figure 2b : Série 2 - 800 m femmes

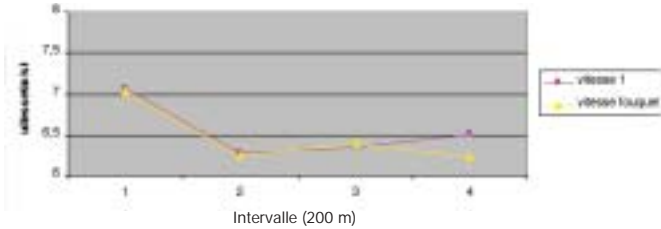


Figure 2c : Série 4 - 800 m femmes

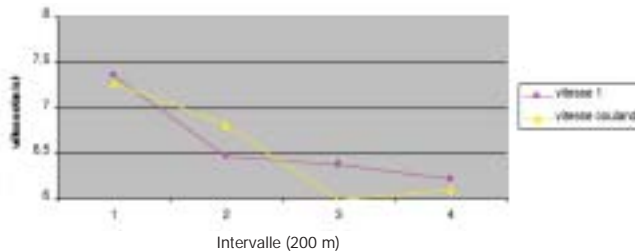


Figure 2d : Demi 1 - 800 m femmes

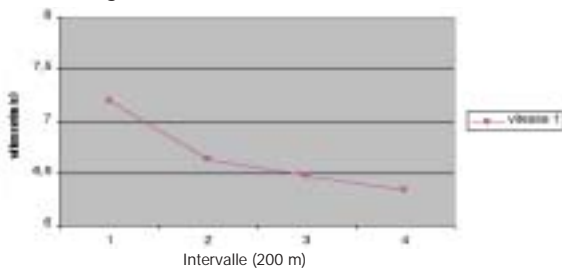


Figure 2e : Demi 2 - 800 m femmes

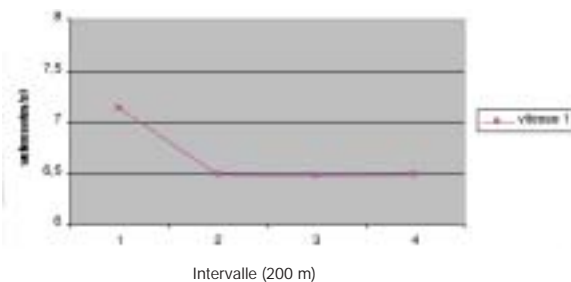
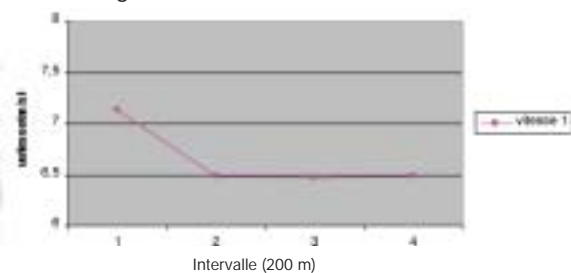


Figure 2f : Finale - 800 m femmes



Les premiers 200 m de cette série se sont courus de façon très rapide (27s). La capacité lactique a du être épuisée de façon précoce en raison de ce départ rapide surtout si VO₂max n'est pas très élevé car un départ rapide additionne un déficit d'oxygène initial et accumulé élevés (fig 7). La seconde demi-finale s'est déroulée à vitesse stable (fig 2e) ainsi que la finale (fig2f).

La consommation maximale d'oxygène est sans doute la clef du problème afin d'éviter d'épuiser la capacité lactique de façon précoce. En effet, l'énergie (ATP) fournie à haute puissance (vitesse) par une consommation d'oxygène élevée (puissance maximale aérobie) va permettre à une vitesse donnée, de moins puiser dans la capacité lactique qui représente environ une réserve d'énergie égale à celle fournie en une minute par la consommation maximale d'oxygène de 60 ml.kg⁻¹.min⁻¹, elle a une capacité anaérobie équivalente en millilitres d'oxygène de 60 ml.kg⁻¹ (soit 60 * 21 joules = 1260 joules par kilogramme de poids de corps). Cette énergie anaérobie permet de courir plus vite qu'à la vitesse maximale aérobie (vitesse minimale qui sollicite la consommation maximale d'oxygène) lors du déficit d'oxygène accumulé et de supporter le délai d'ajustement de la consommation d'oxygène à sa valeur maximale (déficit d'oxygène initial) (figure 7).

Nous avons vu que la capacité du coureur à atteindre rapidement la consommation d'oxygène à sa valeur maximale (déficit d'oxygène initial) détermine la valeur du déficit

d'oxygène initial (différence entre la consommation d'oxygène requise à une vitesse supraVMA et VO₂max). Cette capacité d'ajustement de la consommation d'oxygène se mesure par la cinétique de la consommation d'oxygène en fonction du temps (Whipp, 1994). La constante de temps de cette courbe qui est mono ou bi-exponentielle (temps nécessaire pour atteindre 63% de la valeur plateau de la consommation d'oxygène : la constante de temps τ), rentre à présent dans le suivi de l'entraînement des sportifs (Billat et al., 1998 ; Billat et al., 1999, Demarle et al., 2001).

Ainsi que nous l'avons vu, les courses de demi-fond court se déroulent à des vitesses supérieures à la vitesse maximale aérobie (VMA). Le débit d'énergie requis est donc supérieur à O₂max. Il faut être capable :

- de solliciter (un haut) VO₂max en un délai très court (cinétique d'ajustement de VO₂ à VO₂max très court),
- de supporter un grand déficit d'oxygène (DO₂) puisque les besoins en énergie par unité de temps sont supérieurs à VO₂max (figure 7).

En jaune, nous avons l'oxygène consommé et en blanc le déficit d'oxygène de début d'exercice ; en bleu, le déficit d'oxygène accumulé tout au long de la course dont la vitesse est supra-maximale (> VMA).

On peut conclure que la réussite sur 800 mètres est déterminée par la vitesse des quatre cent premiers mètres. Ceux-ci vont conditionner la suite de la course surtout si le coureur subit un déficit d'oxygène initial élevé dû à une faible valeur de la consommation maximale d'oxygène.

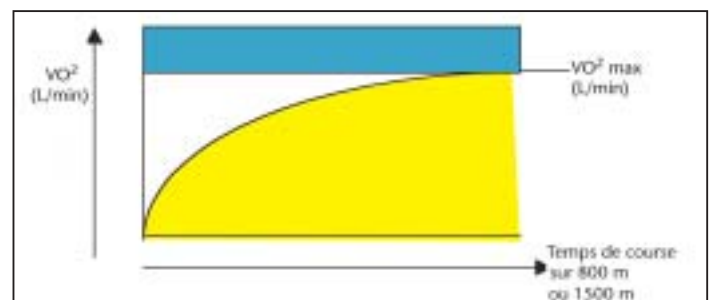


Figure 7 : le déficit d'oxygène initial (en blanc), le déficit d'oxygène accumulé (en bleu) et le déficit d'oxygène accumulé (blanc + bleu). Les zones bleue et blanche représentent la part de l'énergie fournie par le métabolisme anaérobie. En jaune l'énergie fournie par le métabolisme aérobie (mesuré par le volume d'oxygène consommé pendant la course).

LE 1500 M

Hommes

La première série s'est courue en accélération progressive à partir du 800m (course de Mhedi Baala) (figure 3a). On note une différence de vitesse de plus de 1 m/s (près de 4 km/h entre le 800m et le 1500m). La série 2 s'est courue de façon similaire avec une moindre amplitude (différence entre la valeur minimale et maximale) de la vitesse de course (figure 3b). La finale s'est déroulée en une augmentation continue de la vitesse de course. On peut constater que les courbes de Baala et de Chouki se superposent (fig 3c). On note, toutefois, un léger fléchissement de la vitesse entre le 400 et le 800m qui correspond à la phase d'observation inhérente à toute grande finale. Baala a pu récupérer et faire parler ses qualités de vitesse en fin de course. Une augmentation du O_2max le fera gagner même sans phase de « récupération » en course.

Femmes

La série 1 s'est courue à vitesse stable avec une légère augmentation de la vitesse dans les 300 derniers mètres (fig 4a). La seconde série s'est déroulée à l'image de celle des hommes (vitesse croissante à partir du 800m) avec toutefois une accélération très peu marquée (fig 4b). La finale fut très tactique en témoigne cette chute de vitesse jusqu'aux 800 mètres avec une stabilisation à basse vitesse (round d'observation) et une augmentation de vitesse fulgurante dans les 300 derniers mètres (+ 9%) (fig 4c).

Les coureuses qui avaient une haute valeur de consommation maximale d'oxygène et qui ont pu oxyder l'acide lactique dans la phase « lente » de la course, ont pu repartir dans les 300 derniers mètres.

Cette aptitude se développe lors des entraînements fractionnés assez longs (3 minutes) à vitesse variable. Szabo travaille cette capacité à finir vite en introduisant des phases dites « de récupération » au sein des fractionnés.

LE 5000 M

Hommes

La finale masculine (fig 5a) s'est courue à vitesse croissante avec une légère stabilisation entre le 2000 et le 3000m. La différence de vitesse est proche de 3,5 km/h entre le début et la fin de course. Une capacité lactique élevée (60 ml/kg) associée à une valeur de consommation maximale d'oxygène conséquente (de 80 ml/kg/min) sont nécessaires pour suivre une telle course.

Femmes

La finale féminine a vu une chute de vitesse entre le 2000 et le 4000m pour finir très vite à 6 m/s (soit 21,6 km/h nécessitant un $\text{VO}_2\text{max} = 3,5 \times 21,6 = 76 \text{ ml/kg/min}$). Là encore une capacité lactique élevée (60 ml/kg) permettra de supporter une telle accélération si le $\text{O}_2\text{max} < 72 \text{ ml/kg/min}$ (figure 5b). Cependant, encore une fois rappelons que le VO_2max est le pré-requis indispensable sur 5000m, la capacité lactique ne pouvant compenser une faiblesse du VO_2max sur une telle durée d'exercice.

LE 10 000 M

Hommes

La finale s'est courue à vitesse constante avec une légère augmentation de vitesse dans le dernier kilomètre (fig 6a).

Femmes

La finale féminine s'est déroulée de la même façon que celle des hommes (fig 6b). La régularité de la vitesse sur des bases très élevée nécessite une haute valeur de la consommation d'oxygène (71 ml/kg/min). L'accélération dans le dernier kilomètre est conditionnée par une valeur de VO_2max largement $> 71 \text{ ml/kg/min}$ afin de ne pas l'épuiser tout au long des 25 tours de piste. La clef de la réussite sur 10 000m est, là encore, une haute valeur de v qui va donner au coureur une réserve de puissance (débit d'énergie) sur 10,000m qui va solliciter entre 95 et 100% de VO_2max tout au long de la course.

Figure 3a : Série 1 - 1500 m hommes

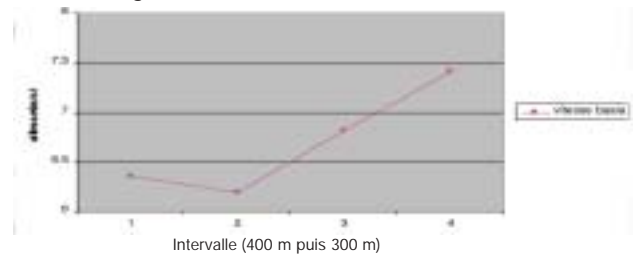


Figure 4a : Série 1 - 1500 m femmes

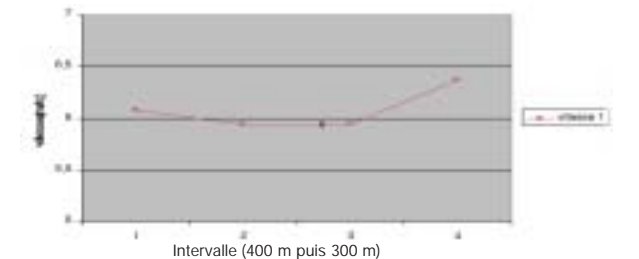


Figure 4c : Série 2 - 1500 m femmes

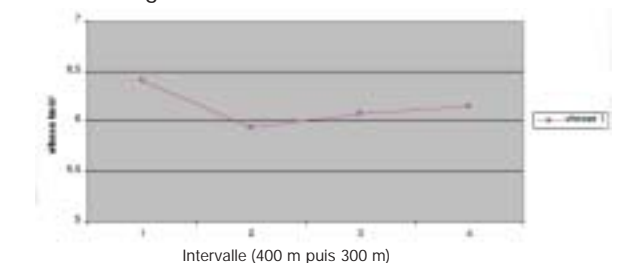


Figure 4d : Finale 1500 m femmes

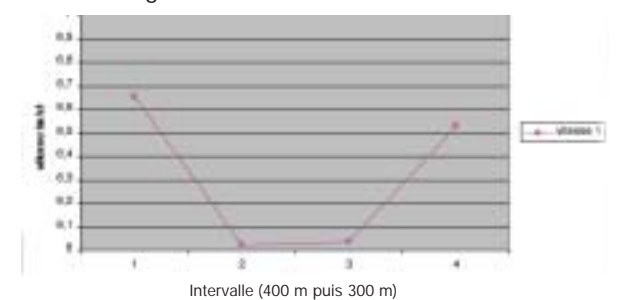


Figure 5b : Finale 5000 m femmes

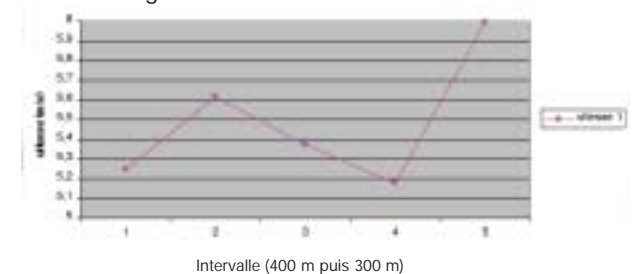
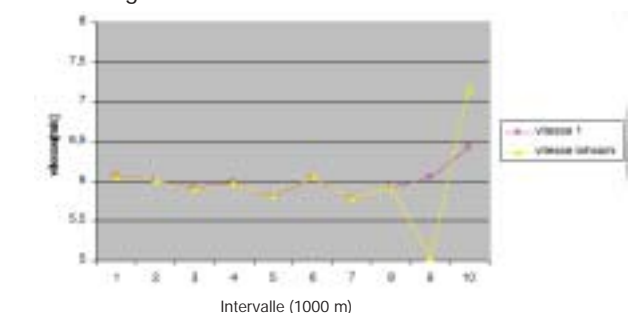


Figure 6a : Finale - 10 000 m hommes



En conclusion

La question de la vitesse terminale est en fait celle de la différence entre le débit d'énergie nécessaire à la vitesse de course qui est supérieur à $\dot{V}O_{2max}$ dans le 800m (120%) et le 1500m (110%). Cette différence peut être comblée par une inertie rapide du métabolisme aérobie (échauffement, effet de l'entraînement fractionné de type aérobie comme le 30s-30s à VMA) mais également par une grande capacité lactique (à l'entraînement cela peut être développé par des séries de 500-400-300m à allure du 800 et du 1500m). Il est intéressant d'explorer les entraînements à vitesse variable partant de VMA pour osciller autour de cette vitesse au sein même des fractionnés.

Désormais, il faut prévoir des tests de suivi physiologiques sur le terrain permettant de mettre en évidence la capacité d'osciller et d'augmenter sa vitesse de course entre 95% et 125% de VMA.

Nous proposons au centre d'expertise de la course à Bondoufle, au stade Robert Bobin, en partenariat avec la ligue d'athlétisme et le Conseil Général de l'Essonne de suivre l'évolution de ses qualités bioénergétiques du coureur de demi-fond en un seul test de terrain avec l'utilisation de la mesure de la force de foulée (système Optojump placé sur la ligne droite), de la consommation d'oxygène (analyseur K4 portable) avec mesure de la vitesse instantanée par un GPS embarqué par le coureur.

Ces données contribuent à enrichir la compréhension des effets de l'entraînement sur ces facteurs de la performance du demi-fond homme et femme français.



Au stade Robert Bobin, le suivi d'un coureur...en voiture électrique

Bibliographie

BILLAT V., RICHARD R., BINSSE V., KORALSZTEIN J.P, HAOUZI P.
VO₂ slow component for a supra lactate threshold exercise depends on type of exercise and is not correlated with delay of fatigue.
Journal of Applied Physiology 85, 2118-2124, 1998.

BILLAT V., FLECHET B., PETIT B., MURIAUX G., KORALSZTEIN J.P.
Training and Overload interval training at VO₂max: effects on aerobic performance characteristics and overtraining markers in endurance athletes.
Medicine Science Sports Exercise 31, 156-163, 1999.

BILLAT V., SLAWINSKI J., BOCQUET V., DEMARLE A., LAFITTE L., CHASSAING P., KORALSZTEIN J.P.
Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for a longer time than intense but submaximal runs.
European Journal of Applied Physiology, 81: 188-196, 2000.

BILLAT V.L., DEMARLE A., SLAWINSKI J., BOQUET V., KORALSZTEIN J.P.
Influence of free vs. constant pace on the performance and oxygen kinetics in running.
Medicine Science Sports Exercise, 33: 2082-2088, 2001.

DEMARLE A., SLAWINSKI J., LAFITTE L., BOCQUET V., KORALSZTEIN J.P., BILLAT V.
Decrease of VO₂ deficit is potential factor in increased time to exhaustion after specific endurance training.
Journal of Applied Physiology, 90, 947-953, 2001.

COTTIN F., PAPELIER Y., DURBIN F., KORALSZTEIN J.P, BILLAT V.
Effect of fatigue on spontaneous speed variations in middle-distance running: use of Short Term Fourier Transform.
European Journal of Applied Physiology 87, 17-27, 2002.

DI PRAMPERO PE, CAPELLI C, PAGLIARO P, ANTONUTTO G, GIRARDI M, ZAMPARO P., SOULE RG.
Energetics of best performances in middle-distance running.
J. Applied Physiol. 74: 2318-2324, 1993.

WHIPP B.J
The slow component of oxygen uptake kinetics during heavy exercise.
Sports and Exerc. 1994; 26 : 1319-1326.

Figure 6b : Finale - 10 000 m femmes

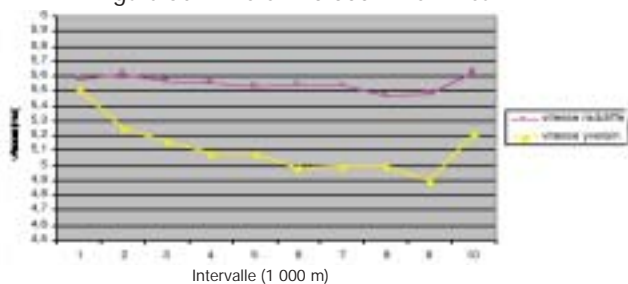


Figure 3c : Finale - 1500 m hommes

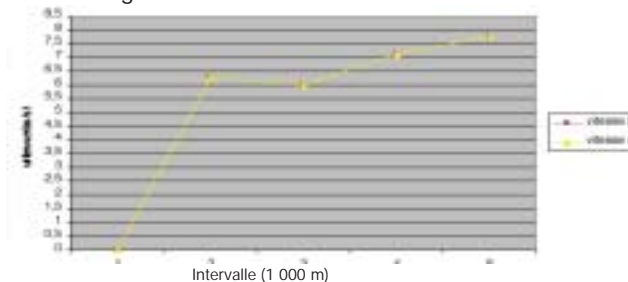


Figure 3b : Série 2 - 1500 m hommes

