

L'APPORT DE LA SCIENCE DANS L'ENTRAÎNEMENT SPORTIF : L'EXEMPLE DE LA COURSE DE FOND

Véronique Billat

De Boeck Supérieur | « *Staps* »

2001/1 n° 54 | pages 23 à 43

ISSN 0247-106X

Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://www.cairn.info/revue-staps-2001-1-page-23.htm>

!Pour citer cet article :

Véronique Billat, « L'apport de la science dans l'entraînement sportif : l'exemple de la course de fond », *Staps* 2001/1 (n° 54), p. 23-43.

DOI 10.3917/sta.054.0023

Distribution électronique Cairn.info pour De Boeck Supérieur.

© De Boeck Supérieur. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

L'apport de la science dans l'entraînement sportif : l'exemple de la course de fond

Véronique Billat

Université Lille 2, Faculté des Sciences du Sport, « Etude de la Motricité Humaine »*

Résumé

Cet article observe l'évolution de l'apport des sciences de la vie et de la santé en général, et de la physiologie en particulier sur l'évolution des performances et des méthodes d'entraînement des courses de fond (10.000 m au Marathon). En effet, les facteurs limitatifs de ces épreuves sont principalement d'ordre physiologique et en particulier bioénergétique. En examinant la progression (régulière) des meilleures performances mondiales sur le Marathon depuis la fin du XIX^e siècle, il est impossible de détecter une avancée extraordinaire à mettre sur le compte de telle ou telle découverte scientifique. Il est à présent possible de distinguer des zones de vitesses correspondant à des réponses physiologiques particulières et qui permettent de progresser sur différentes distances de courses. On distingue en effet 3 vitesses qui délimitent 4 zones d'intensités : 1°) la vitesse maximale d'état stable de la lactatémie (dont le temps limite est d'une heure) 2°) la vitesse critique (asymptote de la relation temps limite à $\dot{V}O_{2\max}$ et distance limite à $\dot{V}O_{2\max}$) dont le temps limite est de 30 minutes, et 3°) la vitesse minimale qui sollicite $\dot{V}O_{2\max}$ ($v\dot{V}O_{2\max}$ ou vitesse maximale aérobie) déterminée lors d'un test triangulaire tel que le test de Luc Léger. Pour des athlètes élités, ces vitesses correspondent aux vitesses spécifiques du semi-marathon, du 10.000 m et du 3000 m. Les programmes d'entraînement ne sont pas très différents selon les époques et les écoles, mais il est à présent possible d'analyser les raisons d'une réussite et d'un échec en associant le volume kilométrique réalisé à chacune de ces vitesses à des modifications physiologiques.

The contribution made by science to sports training : the example of long and middle distance running

Abstract

For almost 80 years, physiological studies have attempted to explain the basis for endurance performance and to develop ways of improving performance by training. Performance, for a runner can be represented by his/her personal power (velocity) versus time to exhaustion (time limit) relationship. There are some particular velocities that delineate intensity domains which are determined by oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and blood lactate response vs. time. Which can distinguish : 1°) the maximal lactate steady-state (MLSS) where the rate of appearance of blood lactate equals the rate of disappearance and at which $\dot{V}O_2$ stabilizes after 3 minutes at about 85 % $\dot{V}O_{2\max}$. This corresponds to the highest velocity that an athlete can sustain for an hour (85 % $v\dot{V}O_{2\max}$ for a well-endurance trained subjects), carbohydrate (and lactate even) are the main substrates for this exercise, 2°) The critical power which is the slope of the relationship between distance and time run at $\dot{V}O_{2\max}$, 3°) the minimal velocity associated with $\dot{V}O_{2\max}$ determined in an incremental tests ($v\dot{V}O_{2\max}$ or maximal aerobic velocity). In the light of this physiological approach it should be possible in the next 5 years to diversify training and to explore endurance training effects and fitness.

* 9, rue de l'Université, 59790, Ronchin.

INTRODUCTION : LES ENJEUX DE L'APPROCHE SCIENTIFIQUE DE L'ENTRAÎNEMENT

L'avenir du sport de haut niveau se joue dans les dix prochaines années. En effet, la crédibilité des performances passées et présentes est altérée par le grand déballage du dopage. Cet article ne discutera pas des causes de cette soudaine chasse au dopage (voir « *le système des sports* » de Paul Yonnet). Cependant après la question « mais que fait la police ? », il est temps de s'interroger sur l'apport de la science dans le domaine de l'entraînement sportif.

A titre d'exemple sensible de l'apport des sciences de la vie et de la santé en général, et de la physiologie en particulier on peut examiner l'évolution des performances et des méthodes d'entraînement des courses de fond (10.000 m au Marathon). En effet, les facteurs limitatifs de ces épreuves sont principalement d'ordre physiologique et en particulier bioénergétique¹. En examinant la progression (régulière) des meilleures performances mondiales sur le Marathon depuis la fin du XIX^e siècle, il est impossible de détecter une avancée extraordinaire à mettre sur le compte de telle ou telle découverte scientifique. On peut cependant constater que bien souvent les entraîneurs et les sportifs faisaient de la prose sans le savoir en mettant au point des procédés d'entraînement que les scientifiques décryptent et valident bien des années plus tard.

Nous allons donc parcourir ce siècle d'avancée des techniques d'entraînement et des concepts physiologiques appliqués aux effets de l'exercice sur le corps humain. Les énormes progrès déjà réalisés dans ce domaine pourraient nous permettre d'envisager l'avenir de l'entraînement sans dopage à condition de se donner les moyens de former les cadres techniques.

Pour illustrer notre démonstration nous avons choisi la course de fond (du 3000 m au Marathon) qui est actuellement pratiquée

par 4 millions de sportifs en France. Le Marathon ne fait plus peur et chacun veut progresser selon ses capacités physiques et le temps dont il dispose. Pour cela, un entraînement « sur mesure » est possible par une meilleure adéquation entre le profil énergétique du coureur (dont nous allons préciser les déterminants) et la spécificité physiologique et biomécanique de la course de fond. En effet, un entraînement scientifique requiert l'étalonnage des réponses physiologiques (fréquence cardiaque, consommation d'oxygène, lactatémie, débit ventilatoire) sur un éventail de vitesses proches de la vitesse de compétition.

Progresser en courant « à la sensation » est possible mais seulement après l'apprentissage de la mise en correspondance de la perception de l'intensité de l'exercice avec les réponses physiologiques. Cet apprentissage est possible dès le plus jeune âge (en classe de 6^e à 11 ans) par les échelles de perception de la difficulté de l'exercice soit en fonction de leur intensité (vitesse), soit en fonction de la durée (Garçon et al., 1998).

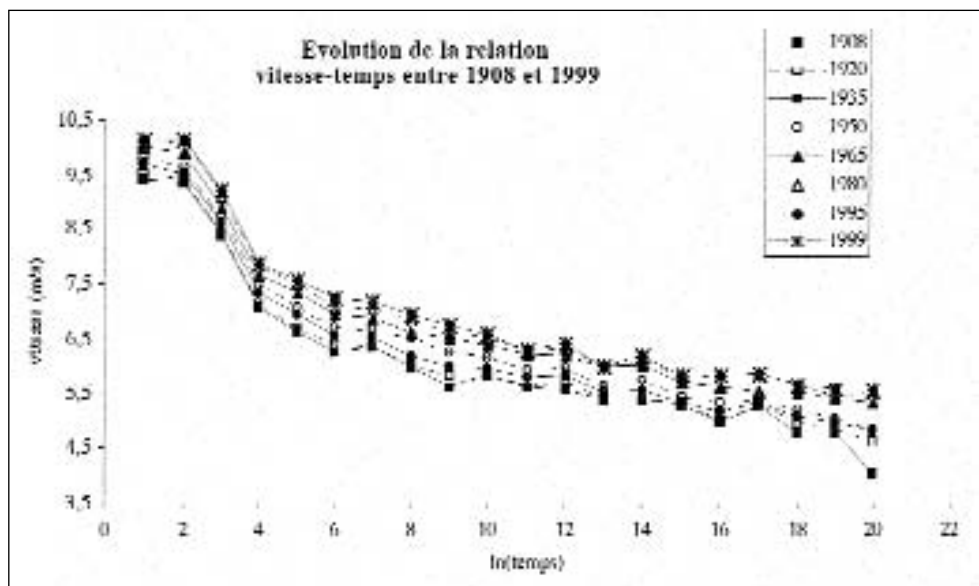
1. LE DÉBUT DE SIÈCLE ET LE DÉBUT DE L'ANALYSE MATHÉMATIQUE ET PHYSIOLOGIQUE DES RECORDS DE L'ESPÈCE HUMAINE À LA COURSE

En 1906, paraît le premier article sur une étude prospective des records à la course. Son auteur, Kennelly (ingénieur électricien à Havard), aborde pour la première fois la forme de relation qui lie la vitesse en fonction du temps (courbe de performance). Par la suite, le physiologiste et prix Nobel, Archibald Vivian Hill (1927) qui fut un pionnier de la bioénergétique de l'exercice musculaire, contribua à ce type d'approche. Nous lui devons l'introduction de nombreux concepts (consommation maximale d'oxygène²,

1. La bioénergétique est la partie de la physiologie qui étudie les transformations d'énergie nécessaires au sein de l'organisme (de l'énergie chimique des aliments à l'énergie mécanique des muscles).

2. La consommation maximale d'oxygène est la puissance maximale des voies métaboliques dites « aérobies » c'est-à-dire qui utilisent l'oxygène pour « brûler » les carburants (lipides, glucides) nécessaires à la recharge énergétique des muscles. Cette consommation d'oxygène dépend du débit sanguin (litre/min) qui peut transporter l'oxygène chaque minute vers les muscles actifs (facteur central de la consommation d'oxygène), mais également de la capacité du muscle à utiliser l'oxygène qui lui est apporté (facteur périphérique). La limitation principale est

FIGURE 1 : La relation vitesse (m/s) – temps (en logarithmes) des records du monde en course à pied à 15 secondes d'intervalle de 1908 à 1998. Cette figure montre la perte de vitesse en fonction du temps selon une échelle logarithmique pour pouvoir mettre sur le même graphe un exercice de 10s à 3 heures). La pente de cette relation n'est pas significativement différente selon les époques, les records ayant évolué de façon homogène sur les distances courtes (100, 200, 400 m), moyenne (800, 1000, 1500, Mile, 3000, 5000 m) et longues (10000 m au Marathon).



dette d'oxygène ¹⁾ qu'il utilisa pour expliquer la forme de la relation vitesse - temps en course à pied (figure 1), élaborée à partir des records du monde du 100m au marathon (tableau 1).

En effet on peut alors envisager des tranches de durées d'exercice pour lesquelles la perte de vitesse est peu sensible. En effet pour une durée de course qui double de 10 à 20 secondes, la vitesse est maintenue à 36 km/h et pour celle qui passe de 1 heure à 2 heures, on ne perd que 1 km.h⁻¹. Au contraire dans certaines portions de la courbe liant la vitesse au temps de course, il existe des cassures montrant d'énormes pertes de vitesse pour des temps assez proches à l'instar de la première à la deuxième minute de course, où la vitesse chute de 33 à 28 km.h⁻¹.

L'étude de cette courbe a permis aux physiologistes du début de siècle de supposer et déceler des similitudes quant aux facteurs limitatifs et aux qualités énergétiques requises pour ces différents couples de vitesse - durée qui vont déterminer la performance : temps mis sur une distance donnée fixée par le règlement fédéral sportif.

Il est remarquable de constater que cette relation entre la vitesse et la durée de maintien n'a pas changé au travers du siècle si l'on compare les pentes. Cela signifie que l'évolution des records du monde sur courtes et longues distances s'est réalisée de façon égale tout au long du siècle et que l'on peut courir plus longtemps à 36 km/h mais également à 20 km/h (rappelons que ce ne sont pas les mêmes coureurs qui sont performants sur les

(suite de la note 2)

centrale et peut être pulmonaire pour les athlètes de haut niveau et les chevaux de course (il s'agit d'une hypoxémie induite par l'exercice identifiée par une baisse de plus de 15 % de la saturation de l'hémoglobine en oxygène).

1. Pour les exercices d'une durée inférieure à 3 minutes, l'organisme utilise des processus de transformation de ses stocks d'énergie chimique en énergie mécanique non aérobie à partir des stocks de phosphates organiques ou de la fermentation du glucose en acide lactique. Un déficit d'oxygène apparaît lorsque les besoins en énergie sont supérieurs à la consommation d'oxygène. L'homme a un déficit d'oxygène maximal (obtenu lors de 1 à 2 minutes de course à vitesse maximale) d'environ 1 ml/kg de poids de corps.

Tableau 1 : Vitesses records de l'espèce humaine (sexe masculin) en fonction de la distance et de la durée en course à pied (au 1^{er} mars 1999).

[*Ces vitesses sont proches de la vitesse minimale sollicitant $\dot{V}O_{2\max}$: la vitesse maximale aérobie (VMA)].

Distances (m et km)	Records masculins (h,min,s)	vitesses (km.h ⁻¹)	Records féminins (h,min,s)	Vitesses (km.h ⁻¹)
100m	9,84s	36,50	10,49s	34,32
200m	19,32s	37,27	21,34s	33,73
400m	43,29s	33,26	47,60s	30,25
800m	1min41,11s	28,48	1min53,28s	25,42
1000m	2min12,18s	27,24	2min28,98s	24,16
1500m	3min26,00s	26,21	3min50,46s	23,43
1609m (Mile)	3min44,39s	25,82	4min12,56s	22,93
2000m*	4min47,88s	25,01	5min25,36s	22,12
3000m*	7min20,67s	24,51	8min06,11s	22,21
5000m	12min39,36s	23,70	14min28,09s	20,74
10 000m	26min22,75s	22,75	29min31,78s	20,32
20 km	54min55,06s	21,85	1h06min48,8s	17,96
21,100 route	59min17s	21,36	1h06min43s	18,97
21,101 piste	1h00min00s (record de l'heure)	21,10	18,34 km (record de l'heure)	18,34
25 km route	1h13min55,8s	20,29	—	—
30 km	1h29min18,1s	20,15	—	—
42,195 km	2h06min05s	20,08	2h20min47,0s	17,98
100 km	6h10min20s	16,38		
200 km	16h32min20s	12,09		
452,27 km	48h	9,42		
1023,2 km	144h (6 jours)	7,11		

courtes et les longues distance). A la lecture du tableau 1 on peut constater que les femmes courent 2 km/h moins vite sur toutes les distances par rapport aux hommes. Cela signifie que leurs performances sur longues distances ont du retard par rapport aux courtes distances, cela étant probablement le fait d'une réglementation qui n'inscrivit le marathon féminin aux Jeux Olympiques qu'en, 1984 à Los Angeles.

2. DE LA PERFORMANCE AUX CARACTÉRISTIQUES PHYSIOLOGIQUES DU COUREUR

Quels sont les paramètres énergétiques qui nous permettent de prévoir les performances d'un coureur sur longue distance ? Depuis quand connaît-on ces facteurs ? Quelles sont les nouvelles pistes pour approfondir notre connaissance de l'énergie humaine ?

Les paramètres qui permettent de prédire les performances d'un coureur sont les suivants :

i) la *puissance métabolique* que le coureur peut fournir sur une durée donnée (la

puissance énergétique du coureur) qui dépend de la capacité du coureur à transformer l'énergie chimique qu'il a stockée sous forme de glucides, lipides, protéides et de créatine phosphate, en énergie mécanique (raccourcissement des muscles qui vont actionner les levier osseux). Pour les exercices d'une durée supérieure à 3 minutes (à partir du 1500m), cette transformation s'opère par l'intermédiaire de l'oxygène (un litre d'oxygène consommé correspondant à une production d'énergie de 21 kJ à partir des glucides).

ii) le *coût énergétique* de sa course selon l'équation de Pietro di Prampero. Ce chercheur a beaucoup contribué dans la tradition de l'école italienne, (depuis Rodolfo Margaria, dans les années 30, puis Paolo Cerretelli, depuis les années 70) à la connaissance des aspects énergétiques de la locomotion humaine, et a formulé l'équation suivante qui indique que la puissance métabolique (E_r : « energy rate ») dépend de la vitesse de course et du coût énergétique (C_r) selon l'équation (di Prampero, 1986) :

$$E_r = C_r \times V \quad (1)$$

où V est la vitesse en mètres par seconde, C_r est exprimé en joules ou en millilitres d'oxygène par mètre et par kilogramme de poids de corps et E_r est en watts ou en millilitres d'oxygène consommé par seconde et par kilogramme de poids de corps (consommation maximale d'oxygène). Cette équation a été appliquée à toutes les locomotions humaines (natation, cyclisme...) dont le déplacement en gondole (di Prampero officie à l'Université d'Udine à une centaine de kilomètres de Venise).

Pour les exercices de plus de 3 minutes, C_r dépend donc de la consommation maximale d'oxygène et l'équation (1) peut s'écrire sous la forme :

$$\text{Vitesse max (m.min}^{-1}\text{)} = \frac{\text{VO}_{2\text{max}} \text{ (ml.min}^{-1}\text{.kg}^{-1}\text{)} / \text{Coût énergétique (ml.m}^{-1}\text{.kg}^{-1}\text{)}}{(2)}$$

Nous avons tous une valeur maximale de consommation d'oxygène ($\text{VO}_{2\text{max}}$) qui équivaut à multiplier par 10 à 25 le métabolisme de repos. En effet, une personne consomme environ $3,5 \text{ ml.min}^{-1}\text{.kg}^{-1}$ d'oxygène au repos. Ce qui distingue les champions des autres, c'est leur capacité à élever cette consommation d'oxygène, non pas de 10 fois mais jusqu'à 25 fois pour atteindre la valeur de $88 \text{ ml.min}^{-1}\text{.kg}^{-1}$ (mesurée chez le fameux coureur cycliste Miguel Indurain) ou encore $91 \text{ ml.min}^{-1}\text{.kg}^{-1}$ chez certains coureur à pied (comme chez les Portugais Dominguo et Dionisos Castro qui réalisèrent 3min36 sur 1500 m à 25 ans et 2h07min au marathon à 35 ans). La valeur de la consommation d'oxygène des grands champions qui ont jalonné l'histoire de la course de fond est indiquée ultérieurement avec leur entraînement (tableau 4).

Nous avons montré (Billat et al., 1994) que le temps de maintien (temps limite) de cette consommation maximale d'oxygène est un paramètre qui peut varier de 25 % dans un groupe de coureurs de même niveau de performance (record sur semi-marathon) pour lesquels la consommation d'oxygène est homogène (5 % de variation). Cette démonstration, qui répondait à une question légitime de connaître non seulement les caractéristiques de puissance aérobie (consommation maximale d'oxygène) mais également d'endurance (temps

de limite) à cette puissance maximale avait été éludée.

L'endurance peut être mesurée par le facteur F (« F » comme fraction de $\text{VO}_{2\text{max}}$ utilisée sur une durée d'effort donnée). La détermination de ce facteur « endurance » mis en évidence par François Péronnet (Professeur à l'Université de Montréal) nécessite une série d'épreuves épuisantes avec la mesure des échanges gazeux respiratoires. Pour simplifier, on peut utiliser la relation liant le pourcentage de la vitesse associée à $\text{VO}_{2\text{max}}$ (ou vitesse maximale aérobie) et le temps record sur les distances de compétition. Il est également d'usage plus courant de rechercher la vitesse (cf. encart 1 et encart 2, figures 2a et 2b concernant la lactatémie et la cinétique de la consommation d'oxygène en fonction de la vitesse) et la fraction d'utilisation de la consommation maximale d'oxygène à laquelle la glycolyse est trop rapide pour la resynthèse de l'équivalent réducteur NADH en NAD (nicotine adénine dinucléotide) dans la chaîne respiratoire. Cette vitesse, appelée vitesse « au seuil lactique » ou plus abusivement « seuil anaérobie » depuis les années 60 apparaît entre 60 et 90 % de la vitesse à laquelle on atteint la consommation maximale d'oxygène. Cette appellation de « seuil anaérobie » est abusive puisque l'accumulation lactique consécutive à la réduction de l'acide pyruvique en acide lactique (qui va se dissocier en ion lactate et proton hydronium (H^+) entraînant la baisse du pH musculaire et sanguin) est surtout due au recrutement de fibres rapides qui ont beaucoup d'isoenzyme LDH de forme M (transformant l'acide pyruvique en acide lactique) et non de forme H (favorisant, comme dans le cœur, la transformation de l'acide lactique en acide pyruvique). L'intensité de la contraction musculaire qui dépend de la force imposée (accélération d'une masse), conditionnant un travail (force appliquée sur une distance) puis une puissance (travail produit par unité de temps) détermine un flux de calcium qui lui-même stimule (par le messenger AMP cyclique) la transformation de l'enzyme phosphorylase inactif en actif. Cet enzyme est responsable de la glycogénolyse lactique (cassure du glycogène, forme de stockage animal de molécules de glucose) qui va aboutir à une acti-

Encart 1 : Les zones de vitesses remarquables d'une course d'intensité croissante et leurs utilisations à l'entraînement

Il semble qu'il y ait quatre zones de vitesses selon différents seuils de modifications physiologiques d'une course de faible intensité (footing lent de « régénération » ou course longue de plusieurs jours) à une course sollicitant la plus longue durée à la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2\max}$).

→ Zone 1 Vitesses pour lesquelles il n'y a pas de production d'acide lactique

Ces vitesses sollicitant une consommation d'oxygène inférieure à 60 % de $\dot{V}O_{2\max}$. Les vitesses de cette zone de vitesse peuvent être maintenues plusieurs heures, voir même plusieurs jours. Il s'agit d'une allure de trot, peu ou pas de lactate est formé, celui-ci étant aussitôt oxydé dans les fibres lentes de type I et le myocarde. La lactatémie est basse parce que « Ra », le débit d'apparition du lactate, est faible (Ra pour « rate of appearance », Brooks 1985).

A cette faible intensité il y a une utilisation préférentielle des lipides par rapport aux glucides et d'une sollicitation du seul métabolisme aérobie. Cette utilisation importante des acides gras libres a également un effet inhibiteur sur la glycolyse. Le résultat de cette inhibition glycolytique par le métabolisme des acides gras libres est une production moindre de lactate et une augmentation de son oxydation en pyruvate. La consommation d'oxygène reste stable avec au bout d'une heure une légère augmentation due à l'utilisation des lipides qui nécessitent plus d'oxygène pour resynthétiser la même quantité d'adénosine triphosphate (l'ATP qui est le composé énergétique directement utilisable par les muscles pour leur contraction). Les facteurs limitant d'une course à vitesse très lente seront d'ordre musculaire, traumatique en raison de la répétition des chocs (3 fois le poids de corps à chaque pose de pied au sol).

→ Zone 2 Vitesses pour lesquelles il n'y a pas d'accumulation d'acide lactique et la consommation d'oxygène est encore stabilisée.

Ce sont des vitesses de course nécessitant des consommations d'oxygène de 60 à 80 % de $\dot{V}O_{2\max}$ selon les coureurs. Ces vitesses sont utilisées lors du 100 km ou des « trails » (courses de longue durée en nature qui ont émergées dans les années 90 en France) ou encore le marathon pour les coureurs moins entraînés. L'utilisation plus importante d'ATP nécessite la mise en œuvre des fibres de type fibres rapides qui résistent à des tensions musculaires plus fortes. Ces fibres ont un métabolisme anaérobie ce qui conduit à une production accrue d'acide lactate et à une augmentation du débit ventilatoire ($\dot{V}E$), pour compenser l'acidose métabolique. L'accumulation du lactate lors de cette phase est de 2 à 4 mmol.l⁻¹. L'acide lactique ($C_3H_5O_3$) étant entièrement dissocié dans le corps humain en ions lactate et hydrogène ($C_3H_5O_3^- H^+$) selon la réaction : $HCO_3^- + H^+ \rightarrow H_2O + CO_2$.

Il en résulte ainsi un excès de CO_2 que la ventilation « élimine » en augmentant $\dot{V}E$ et donc $\dot{V}CO_2$. L'augmentation de $\dot{V}E$ et de $\dot{V}CO_2$ est plus importante que celle de $\dot{V}O_2$, provoquant celle disproportionnée de l'équivalent ventilatoire pour l'oxygène : $\dot{V}E / \dot{V}O_2$ et du quotient respiratoire, R ($\dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$). De même, l'organisme ne consommant pas davantage d'oxygène qu'en nécessite la phosphorylation oxydative (pour remplacer l'ATP utilisé), l'augmentation de $\dot{V}E$ provoque une moindre extraction d'oxygène par volume d'air ventilé ; c'est pourquoi FEO_2 augmente. Le début de cette seconde phase est donc caractérisé par l'augmentation de FEO_2 sans la diminution correspondante de $FECO_2$. Ceci correspond au seuil anaérobie ventilatoire défini par Wasserman et al. 1973.

→ Zone 3 Vitesses pour lesquelles y a accumulation d'acide lactique mais encore compatible avec un état stable de la consommation d'oxygène inférieur à son maximum.

Ce sont des vitesses de course nécessitant des consommations d'oxygène égales à 80-90 % de $\dot{V}O_{2\max}$ selon les coureurs. Ces vitesses sont utilisées lors du marathon et du semi-marathon ou encore sur 10 km pour les coureurs moins entraînés. Outre l'accumulation du lactate par rupture de l'équilibre entre son débit d'apparition et de disparition, on observe également une augmentation accélérée de la ventilation et une hausse continue de $\dot{V}CO_2$. A ce stade, cependant, l'hyperventilation ne peut plus compenser l'augmentation du lactate sanguin. Par ailleurs, davantage d'oxygène est utilisé par les muscles respiratoires qui assurent l'hyperventilation. Ainsi une partie de $\dot{V}O_2$ est non disponible pour les muscles squelettiques directement sollicités dans la foulée.

→ Zone 4 Vitesses pour lesquelles la consommation d'oxygène augmente jusqu'à sa consommation maximale d'oxygène

Ce sont des vitesses de course qui sollicitent 90 à 95 % de $\dot{V}O_{2\max}$ dans les 3 premières minutes pour atteindre la valeur maximale en fin d'exercice dont la durée limite est d'environ 10 à 12 minute. En compétition, ces vitesses sont celles du 10 km, voire 3 km pour les coureurs moins entraînés.

vation de la LDH-M et donc une accumulation d'acide lactique. L'appellation « seuil lactique » est peut-être moins équivoque puisqu'elle ne fait que constater, sans sous-entendre une quelconque anaérobiose, l'accumulation lactique. Si l'athlète est capable, après une période d'entraînement, de courir plus vite avant d'atteindre le seuil d'accumulation lactique, c'est qu'il aura moins sollicité ses fibres de type rapide et qu'il aura augmenté ses enzymes oxydatives. En moyenne, un coureur est capable de courir un marathon à une vitesse égale à 90-95 % de la vitesse au seuil lac-

tique, soit au maximum à 80-85 % de sa consommation maximale d'oxygène.

Le troisième facteur discriminant de la performance sur longue distance est *le coût énergétique* du déplacement du coureur. En effet, à débit d'énergie égal, le coureur qui ira le plus vite est celui qui aura la foulée la plus économique. Le coût énergétique (C_r pour l'anglais « cost of running ») est une quantification de l'économie de la course par unité de distance parcourue et de poids de corps transporté. Ainsi il a été montré que l'espèce humaine a un coût énergétique moyen de 4 kJ par kilomètre couru et par

FIGURE 2a : Augmentation de la lactatémie en fonction du temps à différentes vitesses de course (en % de la vitesse maximale aérobie : VMA).

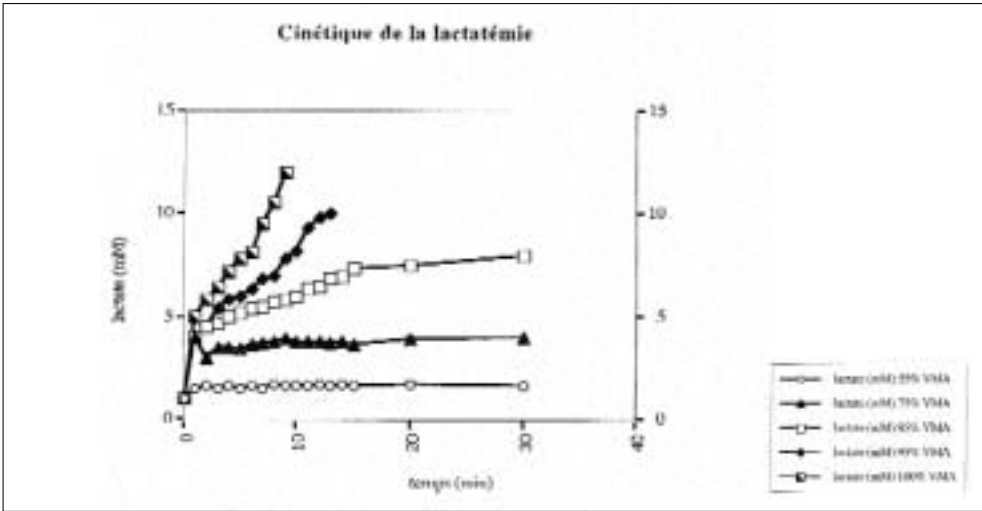
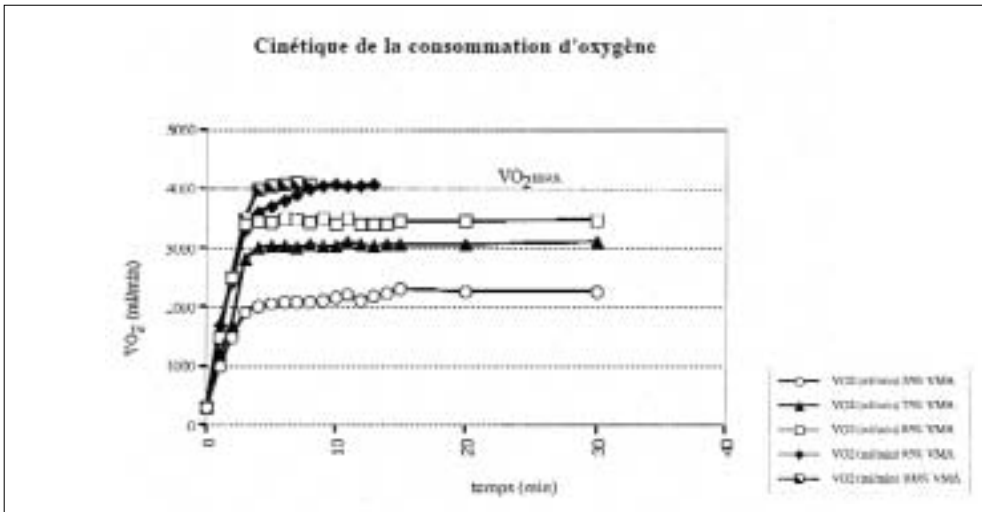


FIGURE 2b : Augmentation de la consommation d'oxygène en fonction du temps à différentes vitesses de course (en % de la vitesse maximale aérobie : VMA).



Encart 2 : La composante lente d'ajustement de la consommation d'oxygène

Un siècle de littérature physiologique nous enseigne que la consommation d'oxygène augmente de façon proportionnelle avec la puissance d'un exercice réalisé en courant sur tapis roulant ou en pédalant sur cycloergomètre (Astrand et Rodhal, 1986). Lorsque les puissances considérées sont comprises entre le seuil de début d'accumulation lactique et la vitesse associée à $\dot{V}O_{2\max}$, et qu'on laisse faire le temps, le sujet développant une puissance constante, on observe une composante lente d'ajustement de la consommation d'oxygène qui tend à atteindre $\dot{V}O_{2\max}$ (voir la revue de question de Gaesser et Poole, 1996). L'augmentation de la consommation d'oxygène se poursuit jusqu'à l'arrêt de l'exercice par épuisement du sujet. Cette composante lente d'ajustement de $\dot{V}O_2$ a été décrite comme telle pour la première fois en 1972, par Whipp et Wasserman. Les causes de cette composante lente d'ajustement de $\dot{V}O_2$ sont attribuées à l'augmentation du coût du pédalage dû au recrutement des fibres rapides qui ont un moins rapport ATP/O₂. 86 % de cette augmentation étant obtenues au niveau de la consommation locale d'oxygène par les membres actifs (lors d'une mesure de cathéter d'une jambe pédalant, Poole et al., 1991).

Lorsque la puissance de l'exercice est sous maximale (i.e. inférieure à la puissance associée à $\dot{V}O_{2\max}$ déterminée lors d'un protocole triangulaire) le sujet atteint $\dot{V}O_{2\max}$ (Poole et al., 1988 ; Roston et al., 1987). Bien que les raisons de cette augmentation de la consommation d'oxygène avec le temps pour ces exercices supérieurs au seuil lactique soient encore peu claires, nous avons récemment mis en évidence que cette composante lente d'ajustement de la consommation d'oxygène jusqu'à $\dot{V}O_{2\max}$ apparaissait lors de courses exhaustives de 18 minutes à 90 % de $v\dot{V}O_{2\max}$ mais n'était pas suffisamment importante pour que les coureurs atteignent leur $\dot{V}O_{2\max}$ (Billat et al., 1996c). Cette notion de composante lente d'ajustement de la consommation d'oxygène remettait donc en question la notion de vitesse associée à $\dot{V}O_{2\max}$ évaluée selon le seul protocole triangulaire. En effet, il faudrait également prendre en compte la vitesse minimale associée à $\dot{V}O_{2\max}$ mesurée lors d'un palier d'exercice au dessus du seuil anaérobie (environ 85 % de $v\dot{V}O_{2\max}$) qui rendrait possible l'atteinte de $\dot{V}O_{2\max}$ au bout d'un certain temps. Cela signifierait qu'il n'existe pas un $\dot{V}O_{2\max}$ mais des $\dot{V}O_{2\max}$ selon le protocole utilisé et en outre non pas un temps limite à $\dot{V}O_{2\max}$ mais des temps limites à $\dot{V}O_{2\max}$ selon la vitesse imposée. Partant de cette idée que j'ai soufflée lors d'un congrès de l'American College of Sport Medicine à Minneapolis en 1995, Hill et al. (soumis pour publication en 1997 au *Journal of Applied Physiology*) ont calculé une puissance critique en utilisant le modèle de Scherrer que nous avons précédemment exposé, mais en utilisant non pas le temps limite à une puissance donnée mais le temps nécessaire à l'atteinte de la consommation d'oxygène. Ils définissent alors la notion de puissance critique, puissance maximale pour laquelle il est encore possible d'obtenir un état stable de la consommation d'oxygène à une valeur significativement inférieure à $\dot{V}O_{2\max}$. Ils montrent que cette puissance correspond à la puissance critique classique.

Le défaut de cette approche est de considérer que le délai d'épuisement est déterminé par le délai d'atteinte de la consommation maximale d'oxygène alors que nous avons démontré que pour le même délai d'épuisement (en pédalage et en course) à 90 % de v ou $p\dot{V}O_{2\max}$, les triathlètes atteignaient ou non leur consommation maximale d'oxygène (Billat et al., *Journal of Applied Physiology* en 1998). L'absence de composante lente significative de $\dot{V}O_2$ à une intensité supérieure au seuil lactique n'empêche pas l'arrêt de l'exercice sans que le sportif soit en acidose ou en déplétion de phosphocréatine. De même, au seuil de début d'accumulation lactique, les réserves de glycogène intracellulaire pour les fibres II sont épuisées.

TABLEAU 2 : Simulation des caractéristiques bioénergétiques et performances passées, présentes et futures sur le marathon. Valeurs de références pour les femmes et les hommes (*italique*).

Le record actuel féminin est de 2h20min47s et le record masculin de 2h06min05s.

Seuil Lactique % $\dot{V}O_{2\max}$	$\dot{V}O_{2\max}$ sur Marathon	Coût énergétique brut (ml.m ⁻¹ .kg ⁻¹)	$\dot{V}O_{2\max}$ (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	vitesse sur marathon (km.h ⁻¹)	Temps réalisé h, min,s				
95,5	0,91	0,190	<i>0,180</i>	78	88	22,41	26,69	1h53min36s	<i>1h34min54s</i>
92,4	0,88	0,200	<i>0,190</i>	76	86	20,06	23,89	2h06min01s	<i>1h46min12s</i>
89,3	0,85	0,210	<i>0,200</i>	74	84	17,97	21,42	2h20min56s	<i>1h58min12s</i>
86,1	0,82	0,220	<i>0,210</i>	72	82	16,10	18,33	2h37min15s	<i>2h18min10s</i>
83,0	0,79	0,230	<i>0,220</i>	70	80	14,42	17,24	2h45min49s	<i>2h27min07s</i>
79,8	0,76	0,240	<i>0,230</i>	68	78	12,92	15,46	3h16min00s	<i>2h43min54s</i>

kilogramme de poids de corps. Cette valeur est proche de celle du cheval qui a toutefois un débit d'énergie deux fois supérieur (pour un même niveau d'entraînement), ce qui explique des vitesses maximales aérobies deux fois supérieures à celles des meilleurs demi-fondeurs humains (50 contre 25 km.h⁻¹). Sachant que 1 litre d'oxygène consommé permet de fournir 21 kJ d'énergie, il est possible de traduire le coût énergétique de 4 joules par mètre, en millilitres d'oxygène consommé par unité de distance et de poids du corps. Quatre joules représentent un coût en oxygène de $4/21 = 0,190 \text{ ml.min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Il faut souligner que le coût énergétique est une quantité d'oxygène (et donc de joules par équivalence) dépensée par unité de distance et de poids du corps et qu'il est relativement indépendant de la vitesse entre 10 et 20 km.h⁻¹. En deçà, la course devient moins économique car le coureur est obligé de raccourcir ses pas (augmentation du travail interne ou de gesticulation par augmentation de la fréquence des gestes, Cavagna et al., 1991) et, au-delà, la composante aérodynamique du coût énergétique devient non négligeable (Pugh, 1970). En effet, au-dessus de 20 km.h⁻¹, la consommation d'oxygène (donc le surcroît de dépense énergétique $\Delta\dot{V}O_2$) augmente de façon exponentielle avec la vitesse selon l'équation :

$$\Delta\dot{V}O_2 = 0,02 \times V^3$$

où $\Delta\dot{V}O_2$ est exprimé en $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ et V est en m.s^{-1} .

Ainsi, à 24 km.h⁻¹ (6,66 m.s⁻¹) comme par exemple sur un 3000 m couru en 7 min30s, la composante aérodynamique peut être calculée comme suit :

$$\dot{V}O_2 \text{ à } 24 \text{ km.h}^{-1} = 3,5 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1} \times 24 = 84 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

$$\text{Or } \Delta\dot{V}O_2 = 0,002 \times V^3 = 0,002 \times 6,66^3 = 0,002 \times 295 = 5,9 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$$

Ainsi sur les 84 ml.min⁻¹.kg⁻¹ d'économie de course ($\dot{V}O_2$ à une vitesse donnée) la composante aérodynamique représente 5,9 ml.kg⁻¹.min⁻¹ soit 7 % à 24 km.h⁻¹.

De plus, on distingue le coût énergétique brut (dans lequel la consommation d'oxygène de repos est incluse) du coût énergétique net (dans lequel la consumma-

tion d'oxygène de repos est retranchée ; elle est de 3,5 ml.min⁻¹.kg⁻¹).

Si l'on applique l'équation de di Prampero (1986) à la course, il est alors possible de calculer les caractéristiques énergétiques nécessaires aux coureurs pour battre la meilleure performance mondiale sur marathon (dans le contexte d'une course à température de 18°C avec ravitaillement en eau et en glucose, le coureur s'étant chargé en glucide les jours précédents).

3. APPLICATIONS DES FACTEURS DISCRIMINANTS DE LA PERFORMANCE AUX RECORDS DU MONDE FÉMININ ET MASCULIN SUR MARATHON

L'analyse des exigences bioénergétiques du record du monde de marathon féminin contribue à mieux cerner les caractéristiques physiologiques des femmes. En se référant aux équations (2) et (3) de di Prampero (1986) :

$$\begin{aligned} \text{Vitesse (m.min}^{-1}\text{)} &= F \dot{V}O_{2\text{max}} (\text{ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}) / \\ \text{Coût énergétique (ml.m}^{-1}.\text{kg}^{-1}\text{)} &\quad (4) \end{aligned}$$

où V est la vitesse sur le marathon, où F est la fraction d'utilisation de la consommation maximale d'oxygène sur le marathon que l'on peut approcher par le seuil lactique ; il est possible de cerner les exigences bioénergétiques de cette nouvelle meilleure performance du marathon féminin. Le coût énergétique représente la consommation d'oxygène brute (incluant les 3,5 ml.min⁻¹.kg⁻¹ de repos) par unité de distance parcourue et par kilogramme de poids de corps. Le tableau 2 donne les valeurs de référence de ces facteurs bioénergétiques compatibles avec les caractéristiques de la femme et de l'homme, qui permettent de réaliser une performance donnée sur marathon. En effet, à niveau égal de performance (en référence aux points donnés par la table de cotation de la fédération d'athlétisme internationale, IAAF), la femme a une consommation maximale d'oxygène de 10 ml.min⁻¹.kg⁻¹ inférieure à celle de l'homme.

C'est pourquoi, afin d'examiner les exigences bioénergétiques de ce nouveau record du monde féminin de marathon, nous avons

choisi la gamme de valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ allant de 68 à 78 ml d' O_2 .min⁻¹.kg⁻¹ (Péronnet, 1992) ; cette valeur correspond aux consommations d'oxygène des coureuses de fond de haut niveau. Le nouveau record féminin du marathon établi en 2000 par la jeune Kenyane Loroupe (alors que celui-ci n'avait pas progressé depuis 1985), correspond à une vitesse de 17,98 km.h⁻¹. Pour courir à cette vitesse pendant 2h20 il faut (en prenant l'hypothèse d'une course moyennement économique avec un coût énergétique brut de 200 ml.kj⁻¹.km⁻¹) une consommation d'oxygène de 60 ml.min⁻¹.kg⁻¹ : 18 km⁻¹.h⁻¹ = 60 ml d' O_2 .min⁻¹.kg⁻¹ x 60 minutes* / 200 ml.kg⁻¹.km⁻¹

Etant donné que le marathon se court en moyenne à 90 % de la vitesse au seuil lactique (données non publiées enregistrées sur 73 marathonniens de 2h07min à 3h30min, thèse de Mario Paiva, Université de Porto) et que la vitesse au seuil lactique représente 90 % de la consommation maximale d'oxygène, la consommation d'oxygène de 60 ml d' O_2 .min⁻¹.kg⁻¹ nécessaire sur le marathon pour courir à 18 km/h (avec un coût énergétique brut de la course égal à 200 ml.kg⁻¹.km⁻¹) implique que la coureuse devra avoir une consommation maximale d'oxygène de :

$$\dot{V}O_{2\max} = [1 / (0,9 \times 0,9)] \times 60 = 74 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

Une course plus économique permet de diminuer la consommation maximale d'oxygène requise.

Cette jeune Kenyane a fait mieux que Mimoun qui couvrait la distance en 2h25min pour l'or olympique à Melbourne en 1956 et que Zatopek en 2h23min3s à Helsinki 4 ans plus tôt. Cette amélioration régulière des performances au cours de ce siècle (Bocquet et al., 1999) est due à une augmentation de la quantité et de la qualité de l'entraînement, les marathonniens actuels allant jusqu'à couvrir un marathon par jour en période de stage (à l'instar des meilleurs coureurs Portugais) sans négliger toute l'année les séances d'entraînement courues entre 90 et 100 % de $v\dot{V}O_{2\max}$ (2 séances hebdomadaire toute l'année).

De plus, la banalisation d'une épreuve autrefois mythique et aujourd'hui courue par des millions d'amateurs permet de convaincre certains jeunes coureurs de demi-fond long de se lancer plus jeunes sur le marathon. De même, toutes les nations courent le marathon qui est réellement une discipline universelle. Si les africains excellent sur les courses de fond depuis Abebe Bikila à la fin des années 70, les africaines apparaissent sur le plan international depuis 5 ans.

TABLEAU 3 : Evolution des vitesses depuis le premier record recensé (IAAF, 1995) en 1926 pour les femmes. Ce record du marathon était de 3h40min et 22secondes soit une vitesse moyenne sur les 42,195 km = 11,5 km.h⁻¹.

Années	Temps sur le marathon (min, sec)	Vitesse (km.h ⁻¹)
1926	3h40min22s	11,49
1963	3h37min07s	11,66
1964	3h19min33s	12,69
1967	3h07min26s	13,51
1970	3h02min53s	13,84
1971	2h49min40s	14,92
1973	2h46min36s	15,20
1974	2h43min54s	15,45
1975	2h38min19s	15,99
1977	2h34min47s	16,36
1978	2h32min30s	16,60
1979	2h27min33s	17,16
1980	2h25min40s	17,38
1983	2h22min43s	17,74
1985	2h21min06s	17,94
1998	2h20min47s	17,98

* Le facteur 60 homogénéise les unités entre les vitesses en kilomètres/heure et les consommations d'oxygène par minute.

Le tableau 3 montre l'évolution du record du monde féminin du marathon. Le premier record a été maintenu 40 années, et l'avant dernier (1985) quelque 13 années, d'où la forme sigmoïde de la courbe visualisant l'évolution du record du monde du marathon féminin.

La marge de progression calculée pour l'an 2000 (faite en extrapolant à partir de la relation établie entre les années et la vitesse - record sur marathon) aboutit à un temps de 2h00 ! Il n'est toutefois pas possible d'envisager que les femmes dépassent les hommes sur les courses de longues distances, ainsi que Whipp et Ward (1992), l'ont spéculé dans cet article de la revue *Nature*. Pour ce qui concerne les hommes, les 20 km/h ont été franchis soit 2 km/h plus vite que les femmes (+10 %). En appliquant les caractéristiques bioénergétiques des meilleurs coureurs de fond qui accompliraient la course idéale (avec au départ un stock de glycogène¹ à son maximum).

Des études basées sur les prédictions mathématiques (Liu, 1998) et non pas sur les caractéristiques énergétiques de l'homme, ont prévu que le marathon serait couru en 1h59 min en 2030. En effectuant la même démarche mais avec la mise à jour du record, nous prévoyons de franchir les deux heures en 2010 (Bocquet et al., 1999).

Il convient d'attendre les cinq prochaines années pour examiner l'évolution de ces records au cours du prochain millénaire. Pour les femmes étant donné qu'elles n'ont commencé à courir le marathon que très tardivement de façon officielle (premier marathon olympique à Los Angeles en 1984), il est difficile d'appliquer une prédiction mathématique de qualité puisque le nombre de performances réalisées n'est pas suffisant. Cependant en spéculant sur des données bioénergétiques compatibles avec

les données actuelles, une coureuse qui aurait une consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2\max}$) de 75 ml.min⁻¹.kg⁻¹ accompagnée d'un seuil lactique de 89 % de $\dot{V}O_{2\max}$ et d'un coût énergétique brut de 210 ml.min⁻¹.km⁻¹, pourrait couvrir le marathon en moins de 2h20 (+ de 18 km.h⁻¹) et plus exactement en 2h19min02s. Une marathonnienne idéale qui aurait à la fois un coût énergétique brut très bas (180ml.min⁻¹.km⁻¹), une consommation maximale d'oxygène élevée (78 ml.min⁻¹.kg⁻¹) et un seuil d'accumulation lactique au plus haut (90 % de $\dot{V}O_{2\max}$) serait alors capable de couvrir les 42,195 km à 21,06 km. h⁻¹ : c'est-à-dire en 2h00min12secondes.

Cependant, aussi bien pour les hommes que les femmes, nous n'avons jamais pu observer chez la même personne à la fois un haut débit d'énergie et une très basse valeur de coût énergétique. Il est vrai que la base de données est relativement restreinte si l'on s'en tient à la littérature scientifique, tous les meilleurs coureurs ne fréquentant pas les laboratoires. Cela devrait changer avec une approche sur le terrain pas des appareils portables comme le K4 qui permet la mesure des échanges gazeux sur la route.

Le dopage permet d'améliorer la consommation maximale d'oxygène, l'endurance et le seuil lactique. Dès lors la question de savoir s'il est possible, par le seul entraînement, d'améliorer les trois facteurs de la performance en course de fond ? La réponse est oui mais avant de montrer par quels procédés d'entraînement, il convient de considérer l'évolution historique des méthodes d'entraînement et des connaissances de ces facteurs physiologiques de la performance en course de fond. Ce bref retour en arrière nous permet de mieux appréhender l'interaction nécessaire entre le savoir scientifique et le savoir-faire des entraîneurs et des athlètes pour les années futures.

1. Le glycogène est une forme de stockage des glucides sous forme complexe dont 100g sont stockés dans le foie et 300 à 400 g dans les muscles). Au bout de 1h45min, les réserves commencent à être épuisées et l'utilisation des lipides de plus en plus importante entraîne une baisse de la vitesse car les lipides demandent une consommation d'oxygène plus importante pour obtenir la même quantité d'énergie : 1 litre d'oxygène consommé par minute donne seulement 19.6 kJ d'énergie contre 21 kJ pour les glucides soit 7 % de moins. A ce moins bon rendement énergétique du substrat va en plus s'ajouter une augmentation du coût énergétique de la foulée à partir du trentième kilomètre (di Prampero et al., 1986).

4. EVOLUTION DES FACTEURS PHYSIOLOGIQUES DE LA PERFORMANCE ET DES MÉTHODES D'ENTRAÎNEMENT EN COURSE DE FOND AU COURS DU SIÈCLE

On peut distinguer les grandes périodes que sont le début de siècle, les années 20-30, les années 50, 60-70 et 80-90.

– *Les années « art nouveau » (1900) ou l'essor de l'entraînement fractionné et de la mesure de la consommation d'oxygène sur tapis roulant (pour la marche).*

La consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) à l'exercice était parfaitement mesurée pour des exercices de marche sur tapis roulant depuis 1910. L'utilisation de la consommation d'oxygène, dans une perspective d'analyse de la tâche ou d'évaluation de prérequis pour la performance, était nulle. Sur le plan empirique, déjà à cette époque (1912) le Finlandais, champion olympique du 10.000 m, Hannes Kolehmainen, présentait la nécessité de rendre spécifique à la compétition les vitesses d'entraînement. Afin, cependant, de ne pas réaliser une compétition chaque jour d'entraînement qui était déjà quotidien à cette époque, il introduisait l'entraînement « fractionné » qui consistait précisément, à fractionner la distance de compétition en 5 à 10 répétitions. Ces fractions étaient donc courues à la vitesse de compétition ce qui donnait pour le 10.000 m par exemple des séries de 10 répétitions de 1000 m réalisées à l'allure de compétition du 10.000 m (3 min 05 au 1000 m) soit 19 km/h pour ce champion (le 10.000m est actuellement couru à 22,7 km/h par le recordman du monde).

– *Les années « Art Déco » : le prix Nobel Archibald Vivian Hill invente le concept de « Consommation maximale d'oxygène »*

En 1927, A.V Hill développe le concept de consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) dans son ouvrage « Muscular movement in man ». Il remarquait que la valeur de la consommation d'oxygène n'atteignait plus de véritable état stable lors d'un exercice de 4 minutes à 16 km.h⁻¹ pour lui-même (âgé de 35 ans il pratiquait encore la course à pied). Hill considérait que cette vitesse était la limite au-delà de

laquelle la consommation d'oxygène plafonnait. Cette vitesse (qualifiée 60 ans plus tard de « vitesse maximale aérobie ») était pour Hill « une vitesse limite raisonnable » au delà de laquelle (je cite l'énumération) :

- un déficit d'oxygène apparaît au fil du temps,
- le lactate sanguin s'accumule,
- la fréquence cardiaque et la température corporelle augmentent,
- les réserves de glycogène s'épuisent, la glycémie s'effondre,
- des douleurs et raideurs musculaires apparaissent.

Pour le dernier item, il décrivait tout simplement ses propres impressions de coureur de fond. Il concluait alors que toutes ces causes déterminaient l'abandon du coureur.

A cette époque, en 1920, le Finlandais Pavoo Nurmi (qui courait le 5000m en 14min 36s (20,55 km/h) introduisait l'entraînement par intervalles courus à une vitesse supérieure à la vitesse de compétition, sur de courtes distances (200-400m : 6 x 400m en 60 secondes, par exemple) à l'intérieur d'une course lente et longue de 10 à 20 km dans les bois. Le reste du kilométrage était couru à très faible allure, Nurmi avait déjà intégré les principes d'alternance et de récupération dont nous savons aujourd'hui qu'ils sont tout aussi importants que le travail intense lui-même.

– *Les années « Formica » (années 50) ou celles du formidable coureur tchèque : le fabuleux coureur Emil Zatopek invente « l'interval training »*

A la fin des années 50, le coureur Emil Zatopek, recordman du monde du 5.000 m s'étant inspiré du médecin allemand, le docteur Van Aacken, créait l'entraînement par « intervalle » (encart 3). Cet entraînement par intervalle était en fait réalisé à la vitesse au seuil anaérobie celui-ci étant estimé à partir des temps donnés dans sa biographie et de ses performances sur 5.000 m (le 5.000 m permettant d'extrapoler la vitesse maximale aérobie). Ce concept de seuil anaérobie était inventé bien plus tard dans les années 70 par le cardiologue américain Karl Wasserman (pour le seuil ventilatoire) et par l'école Allemande, en particulier par Mader, Keul, Kindermann (pour le seuil lactique).

Encart 3 L'interval-training

L'entraînement pour améliorer la consommation maximale d'oxygène permet d'illustrer la méthodologie de l'individualisation de la charge (intensité-durée-répétition-forme intermittente ou continue) par la prise en compte du temps limite continu à $\dot{V}O_{2,max}$ pour la calibration de l'intensité et la durée de l'entraînement fractionné (interval-training). Reindell et Roskamm (1959) furent les premiers ayant décrit les principes de « l'interval training », déjà popularisés dans les années 50 par le champion olympique Emile Zatopek (qui répétait jusqu'à 100 fois 400m en 80 secondes, soit environ 80 % de sa vitesse à $\dot{V}O_{2,max}$). L'interval-training (IT) consiste en une ou plusieurs séries d'exercices alternés avec des périodes de récupération dont l'intensité est légère ou modérée (Fox et al., 1993). Par cette alternance, il est possible d'augmenter la quantité de travail à une intensité élevée (Astrand et al. 1960 ; Christensen et al. 1960 ; Fox et al., 1977 ; Margaria et al., 1969). Margaria et al. (1969) avaient même émis l'hypothèse selon laquelle il était possible de continuer indéfiniment un exercice intermittent en alternant des répétitions de 10 secondes d'exercice à 130 % de la puissance sollicitant $\dot{V}O_{2,max}$, entrecoupées de 30 secondes de repos. Pour les Allemands, Reindell et Roskamm (1959), la période de récupération (« l'intervalle ») qui suit chaque répétition courue à haute intensité est la plus déterminante dans les adaptations cardiovasculaires. En revanche, pour « l'interval training » de l'Américain Fox, c'est la période d'exercice intense qui est importante. Pour Fox, l'interval-training correspond en fait aux exercices intermittents, c'est à dire aux exercices comportant une alternance de phase d'activité intense et de récupération. C'est dans ce sens que nous utilisons la terminologie « interval-training ». En outre, le terme d'entraînement « fractionné », se réfère à une séance d'entraînement dont la distance totale correspond environ à celle des compétitions mais fractionnée en plusieurs parties et dont la vitesse est généralement proche de celle visée en compétition. Depuis Emil Zatopek, les coureurs de demi-fond et de fond utilisent ce procédé pour augmenter le volume d'entraînement couru à des vitesses spécifiques de compétition (1500m-10000m) compris entre 90 et 110 % de leur vitesse sollicitant leur $\dot{V}O_{2,max}$, c'est à dire $v\dot{V}O_{2,max}$ (Daniels et Scardina, 1984 ; Lacour et al., 1991 ; Padilla et al., 1992 ; Billat et al., 1996a). Le but de l'entraînement intermittent à $\dot{V}O_{2,max}$ est d'augmenter la consommation maximale d'oxygène. Gorostiaga et al. (1991) ont montré qu'un entraînement intermittent utilisant des répétitions de 30 secondes de course à 100 % de $v\dot{V}O_{2,max}$ alternées avec 30 secondes de repos, améliorait le $\dot{V}O_{2,max}$ de façon significative, ce qui n'était pas le cas d'un entraînement continu de 40 minutes à 70 % de $\dot{V}O_{2,max}$. L'interval-training peut, cependant, recouvrir des formes très différentes. En effet, selon l'intensité et la durée des fractions à hautes et basses vitesses, la part respective des métabolismes aérobie et anaérobie dans la dépense énergétique sera modifiée (Christensen et al., 1960). C'est pourquoi dans la conception et la planification d'un entraînement intermittent doivent être pris en compte la durée et l'intensité de l'intervalle de récupération et de travail, ainsi que le nombre de répétitions et de séries (Fox and Mathews, 1974 ; Knuttgen et al., 1973). Saltin (1976) considère les paramètres supplémentaires de « périodicité » qui est le rapport entre le temps d'exercice intense et de récupération et celui « d'amplitude » qui décrit la différence entre la puissance requise par l'exercice intense et celle de la récupération, par rapport à la puissance moyenne de l'interval training.

En effet, Zatopek effectuait jusqu'à 100 x 400m en 1min 30 (15 km/h) avec 200 m de trot entre deux 400 m. Il parcourait jusqu'à 50 km par jour en scindant sa séance d'interval training en une série de 50 répétitions le matin et une autre le soir.

– *Les années « hippies » ou l'émergence des études scientifiques sur l'interval training.*

En 1960 le physiologiste suédois Per Olof Astrand développe la méthode des intervalles longs de 3 minutes à 90 % de la consommation maximale d'oxygène. Il considère que c'est une méthode fiable pour améliorer la consommation maximale d'oxygène sans pour autant avoir validé cette proposition par une étude systématique de la réponse physiologique aigüe et

chronique à ce type d'entraînement fractionné.

A cette même époque (1960) le coureur et entraîneur néo-zélandais, Lydiart développe la méthode des intervalles très courts : 10 à 15 secondes de course à 100 % de $v\dot{V}O_{2,max}$ et 10 à 15 secondes de trot à 30-40 % de $\dot{V}O_{2,max}$. Le physiologiste suédois Christensen qui travailla sur des protocoles d'exercices intermittents courts (15 à 30 secondes), corrobora cette méthode d'entraînement (avait-il eu seulement l'écho de la pratique de Lydiart ?) en montrant que ces quelques secondes d'effort et de récupération permettent de ne pas accumuler d'acide lactique. Cela ne signifie pas que le muscle ne produit pas d'acide lactique (il en produit même au repos) mais que le débit d'apparition étant en équilibre

TABLEAU 4 : Entraînement de quelques champions historiques de course de fond classés par registre d'intensité. « R » indique la récupération entre les séries de plusieurs répétitions, « r » indique la récupération entre chaque répétition. Les valeurs de consommation maximale d'oxygène, de vitesse associée à $\dot{V}O_{2\max}$ ($v\dot{V}O_{2\max}$) ont été estimées par l'auteur à partir de leurs records sur 3.000 m.

Année NOM Performance	$v\dot{V}O_{2\max}$ (km/h) et $\dot{V}O_{2\max}$ (ml/min/kg) du coureur	Entraînement à la vitesse < Seuil (km)	Entraînement à la vitesse = au seuil lactique (km)	Entraînement à la vitesse égale à 90-100 % $v\dot{V}O_{2\max}$ (km)	Entraînement à des vitesses > $v\dot{V}O_{2\max}$ (km)
1920 Paavo Nurmi 14 min28s au 5000m (20,73 km/h) 30min06s au 10000m (19,93 km/h) 1 entraîn ^{ns} /jour	22,12 km/h 75 ml/min/kg	15-20 km/jour	?	20 x 100m	4 x 400m à vitesse maximale R = 15 min
1950 Emil Zatopek 13 min57s2 au 5000m (21,5 km/h) 28min54s2 au 10000m (20,75 km/h) 2 entraîn ^{ns} / jour	23,45 km/h 76,2 ml/min/kg	20 km/jour	1) 20 x 200m + 40 x 2 + 400m +20 x 200m = 200m trot 2) ou 50 x 200m matin et ap-midi	40 x 200m r = 200m	6 x 400m à vitesse maximale R = 10 min
1968 Kip Keino 7 min 39s5 au 3000m (23,5 km/h) 13 min36s5 au 5000m (22,05 km/h) 2 à 3 entraîn ^{ns} /jour	23,45 km/h 80,0 ml/min/kg	5 x 45min et 6 x 60min	?	10 x 400m r = 2min ou 6 x 800m r = 3-5min	10 x 200m +10 x 100m +4 x 80m R = 300m marché
1972-1976 Lasse Viren 13 min16s au 5000m (22,61 km/h) 27 min38s au 10000m (21,71 km/h) 2 à 3 entraîn ^{ns} /jour	23,96 km/h 83,0 ml/min/kg	80 km à 100bpm	130 km Fartlek (de 12 à 15 km)	10 x 200m r = 2min ou 6 x 800m r = 3-5min	8 x 600m r = 600m marchés
1984 Grete Waitz (femme) 15 min08s au 5000m (19,82 km/h) 30 min59s8 au 10000m (19,35 km/h) 2h25min28s au marathon (17,4 km/h) 2 entraîn ^{ns} /jour	21 km/h 73,0 ml/min/kg	45min à 2 heures	séances de 20 min au seuil dans course de 60 min (Tempo training) 5 x 2000m	6 x 1000m r = 1min ou 5 x 1600m r = 2 min ou marchées r = 3 min	2 séries de 10 x 300m r = 100m marchés R = 5 min marchées
1986 Ingrid Kristiansen (femme) 14 min37s33 au 5000m (20,52 km/h) 30 min13s74 au 10000m (19,85 km/h) 2h21min06s au marathon (17,94 km/h) 2 entraîn ^{ns} /jour	21,7 km/h 76,0 ml/min/kg	45min à 2 h 30 min	Séances de 2 x 15min au seuil dans course de 90 min (Tempo training)	5 x 1000m r = 2min	2 séries de 5 x 100m r = 200m marchés R = 400m marchés

TABLEAU 5 : Mise en correspondance des terminologies d'entraînement de 1950 à 1990, avec l'intensité et la durée limite des exercices. VMA est la vitesse minimale qui sollicite la consommation d'oxygène lors d'un protocole de test procédant par augmentation successive de la vitesse par palier de 2 ou 3min. CE est le coût énergétique de la course ou de toute autre locomotion considérée.

Intensité %	VAM Temps limite en min à cette vitesse	Années 50-60	Années 70 Institut National des Sports	Années 80 (presse grand public)	Années 80 Milieux fédéraux sportifs	Années 90 Milieux fédéraux sportifs	Années 2000 Milieux sportifs et scientifiques De masse et d'élite
120-105	1-3	Interval training GERSCHLER 20s à 1min 30s récupération = 3 min	Résistance intensité de 7s à 1 min récupération = 3 à 5 min	Résistance intensité de 8s à 2 min récupération = 3 à 5 min	Puissance et Capacité lactiques	Déficit d'oxygène maximal Intervalles courts	Déficit d'oxygène maximal (intervalles 15-15)
100-95	4-10	Interval training de REINDELL & GERSCHLER 30s à 1min 30s récupération = 3 min	Résistance récupération de 10s à 5 min récupération = temps de travail		Puissance maximale aérobie	Vitesse maximale aérobie = $\frac{VO_{2max}}{C_r}$ intervalles 30-30	Vitesse maximale aérobie (intervalles 30-30)
95-90	10-40	- Interval training de ASTRAND = 3 min Récupération = 3 min - Interval training court de Lydiart = 15s à 30s	Résistance volume I de 1 à 5 min récupération = 1 à 5 min	Résistance dure I de 3 à 6 min	Puissance aérobie	Puissance aérobie (Intervalle 3min-3min)	Vitesse qui sollicite le plus long temps limite à VO_{2max} (intervalles 3 min-3 min)
90-85	40-60					Puissance aérobie Intervalles longs	Vitesse maximale de non atteinte VO_{2max} (intervalles 5 min-2min30)
85-80	60-75	Interval training de ZATOPK = 1min30s Récupération = 40s	Résistance volume II de 5 à 10 min récupération = 1 à 3 min	Résistance dure II de 6 à 15 min	Capacité maximale aérobie	Vitesse maximale de non accumulation lactique Intervalles longs	Vitesse maximale stabilisation $\dot{V}O_2$ au bout de 3 min (intervalles 10 -20min)
80-75	150-180			- Résistance douce 10 min environ - Endurance active	Capacité aérobie	Seuil lactique Course continue de 20min à 50min	Vitesse maximale de non accumulation lactique Course continue de 45min à 1h)
75-70	Plusieurs heures	Endurance pure de Van Aacken	Endurance fondamentale	Endurance fondamentale	Capacité aérobie	Vitesse récupération	Vitesse de non production d'acide lactique

avec le débit de disparition dans le sang et que le potentiel REDOX reste stable (rapport NADH/NAD). Ainsi le pH sanguin et musculaire ne chute pas et la vitesse de course n'est pas diminuée.

En 1964, le physiologiste et cardiologue californien Karl Wasserman, invente le concept de « seuil anaérobie ventilatoire » comme étant l'intensité d'exercice (ou vitesse pour la course ou la marche pour les patients de Wasserman) entraînant une augmentation abrupte du débit ventilatoire. Cette augmentation du débit d'air ventilé par minute n'est pas due à un manque d'oxygène des muscles mais à la stimulation de récepteurs (carotidiens, et aortiques) sensibles au pH sanguin qui baisse en raison de l'accélération de la glycolyse à partir d'une certaine vitesse de course (vitesse au seuil lactique) à laquelle les fibres de type II (riches en isoenzyme lactico déhydrogénase -M) sont recrutées. De plus, le liquide céphalo-rachidien est sensible à la pression partielle de dioxyde de carbone (CO_2) qui augmente avec les ions H^+ par l'accélération de la glycolyse et la réduction de l'acide pyruvique en acide lactique (qui se dissocie en anion lactate et proton hydronium (H^+)).

Ainsi la baisse de pH du liquide céphalo-rachidien stimule les centres respiratoires dans le cerveau, le débit ventilatoire augmentant. De même les récepteurs articulaires sensibles au mouvement envoient des signaux au cerveau. Ainsi seuil anaérobie (seuil ventilatoire) et seuil de début d'accumulation lactique sont liés aux mêmes causes : le recrutement de fibres glycolytiques, mais n'ont pas de lien de causalité. De plus, le protocole de détermination du seuil ventilatoire procède par incréments de vitesse très faibles (moins de $0,5 \text{ km.h}^{-1}$) et par des paliers courts (1 minute) alors que la vitesse de début d'accumulation lactique est déterminée par des paliers d'au moins 5 minutes.

En effet, la vitesse au seuil anaérobie est comprise entre 60 et 90 % de la consommation maximale d'oxygène pour les sujets peu à très entraînés en endurance. Cette puissance au seuil anaérobie par la méthode ventilatoire est déterminée lors d'un protocole d'exercice constitué d'enchaînement de paliers courts (1 min) à des puissances croissantes ($0,5 \text{ km/h}$ d'augmentation de la vitesse toutes les minutes).

– *Les années « Pop » et « arts Disco » (70-80) apparition du concept de seuil lactique et vulgarisation des tests à l'effort*

Les années 70 sont celles de la mesure de la consommation maximale d'oxygène chez le sportif. Par ailleurs, le concept de seuil lactique apparaît grâce à l'école allemande composée de physiologistes comme Mader qui travaillent de concert avec les entraîneurs (Mader et Heck., 1986). Ils distinguent un premier seuil (le seuil « aérobie ») pour lequel la concentration d'acide lactique s'élève au-dessus de la valeur de repos (qui est de 1 mmol.l^{-1}) ; ce premier seuil correspond à la première zone de vitesse décrite dans l'encart 1 entraînant une concentration sanguine d'acide lactique égale à 2 mmol.l^{-1} et identifiée par Keul comme étant le « seuil aérobie » (Keul et Kindermann, 1978). Ils distinguent également un second seuil (le seuil dit « anaérobie », correspondant à la seconde zone de vitesse décrite dans l'encart 1). Ce seuil dit « anaérobie » correspond à une vitesse induisant une lactatémie de 4 mmol.l^{-1} . Ces valeurs de références sont encore très largement utilisées en Allemagne, en Italie et au Portugal, nombre de chercheurs étant allés passer leurs thèses à Cologne à l'Institut National du Sport allemand. Cependant ces valeurs sont conventionnelles puisque la lactatémie maximale d'état stable est comprise entre 2,3 et 6,8 mM selon les sportifs, même s'il est vrai que la moyenne se situe à 4 mM (Billat, 1996). Cependant on ne peut se contenter de moyenne pour le suivi de l'entraînement des sportifs.

A l'heure actuelle, ces seuils sont toujours utilisés même si l'on préfère à des valeurs absolues de référence, considérer la cinétique de la lactatémie (Brooks, 1985, 1986). Puis 1985 voit l'apparition de la notion de vitesse d'état stable maximum de la lactatémie (« maximal lactate steady-state ») inventée par Georges Brooks, Professeur à l'Université de Berkeley, auteur d'un remarquable ouvrage qui fait référence dans le domaine de la physiologie de l'exercice (Brooks et al., 1996). Cette vitesse est la vitesse maximale à laquelle la lactatémie se stabilise en fonction du temps, l'apparition du lactate dans le sang étant en équilibre avec sa disparition (Brooks, 1985).

En 1980, parallèlement à l'approfondissement du concept de seuil, apparaît celui de vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène (« Vitesse maximale aérobie » : VMA qui correspond à $\dot{V}O_{2\max}$) par l'école québécoise avec Luc Léger (1983) très prolix dans le domaine de la physiologie appliquée au sport et à l'exercice, qui valide une méthode indirecte sur piste d'évaluation de la consommation maximale d'oxygène par l'équation :

$$\dot{V}O_{2\max} (\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) = 3,5 \text{ VMA (km/h)} \quad (5)$$

Cette méthode a rendu accessible l'évaluation de la consommation maximale d'oxygène sur le terrain à des milliers d'athlètes et surtout d'écoliers (en particulier par le protocole dit de « navette » qui utilise un aller retour sur 20 m). Cette équation 5 est fondée sur le même principe que celles de Pietro di Prampero (équations 2 et 3) puisque l'on peut écrire l'équation 5 :

$$\text{VMA (m} \cdot \text{min}^{-1}) = \dot{V}O_{2\max} (\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{coût énergétique (ml} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (6)$$

Avec un coût énergétique brut moyen de $210 \text{ ml} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, on obtient l'équation suivante :

$$\text{VMA (m} \cdot \text{min}^{-1}) = \dot{V}O_{2\max} (\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) / 0,210 (\text{ml} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (7)$$

Si on veut exprimer la vitesse en km/h on multiplie 0,210 par 60 et l'on obtient alors le coefficient de 3,5. Sachant que VMA peut être soutenue en moyenne 6 minutes, il suffira de parcourir le plus de distance en 6 minutes pour obtenir une vitesse moyenne très proche de VMA et de multiplier par 3,5 pour obtenir votre consommation maximale d'oxygène (encart 4). Prenons l'exemple des records du monde. Sur le tableau 1 on peut remar-

Encart 4 Les tests de terrain d'intensité progressive pour déterminer VMA : L'épreuve de Léger- Boucher (1980)

Il s'agit d'une épreuve collective qui détermine la vitesse maximale aérobie définie comme étant la vitesse théoriquement minimale qui sollicite la consommation maximale d'oxygène. Cette épreuve évalue de façon indirecte la consommation maximale d'oxygène. Elle utilise en fait le même type de protocole que les épreuves progressives d'évaluation directe de $\dot{V}O_{2\max}$ en laboratoire. Il s'agit pour les coureurs, de suivre la vitesse indiquée par un coup de sifflet, une balise temporelle ou une bande sonore pré-enregistrée. A chaque son, le coureur doit se trouver au niveau de l'un des repères placés tout les 50 m le long d'une piste de 400 m. La vitesse de course est accélérée progressivement par paliers continus de 2 minutes.

Chaque accélération correspond à une augmentation du coût énergétique de 3,5 ml/kg/min (soit d'un MET, unité métabolique). De ce fait, chaque palier correspond à un coût énergétique donné, $\dot{V}O_{2\max}$ est alors estimé à partir du coût énergétique (standard) du dernier palier parcouru. Lorsque le coureur « décroche », n'étant pas capable de suivre le rythme imposé, l'épreuve est interrompue. Au numéro du palier, la vitesse atteinte correspond à une consommation maximale d'oxygène. La critique principale que l'on peut émettre est que le dernier palier de vitesse est souvent réalisé alors que $\dot{V}O_{2\max}$ est déjà atteint à l'avant-dernier palier. Ceci peut donc, à l'instar de toutes les estimations faites à partir d'épreuves de terrain progressives, conduire à la surévaluation de $\dot{V}O_{2\max}$ et VMA pour le calcul des vitesses d'entraînement. Il est donc indispensable de vérifier cette vitesse maximale aérobie, au cours d'une épreuve rectangulaire, où l'on demande au coureur (qui s'est préalablement échauffé 20 min à 30 min) de courir à la vitesse déterminée à l'issue du test progressif. Dans l'éventualité où le coureur ne pourrait soutenir plus de 2 à 3 minutes cette vitesse présumée maximale aérobie, cela démontre qu'elle a été surestimée. Dans ce cas, choisissez comme repère de vos vitesses d'entraînement (exprimée en pourcentage de VMA), la vitesse de l'avant-dernier palier. Une lactémie finale supérieure à 15 mmol/l peut suggérer que l'athlète a réalisé son dernier palier grâce à l'apport énergétique de la glycolyse anaérobie ($\dot{V}O_2$ plafonnant ou diminuant). Concernant l'épreuve de Léger et Boucher (1980), $\dot{V}O_{2\max}$ qui augmente de 3,5 ml/kg/min à chaque palier est calculé par l'équation : $\dot{V}O_2 = 14,49 + 2,143 V + 0,0324 V^2$ où $\dot{V}O_2$ est exprimé en ml/kg/min et V en km/h et V^2 en km/h.

Dans des études ultérieures, Léger et Mercier (1983, 1986) recalculèrent une nouvelle régression pour des vitesses de course comprises entre 8 et 25 km/h : $\dot{V}O_2 = 1,353 + 3,163V + 0,0122586 V^2$ où $\dot{V}O_2$ est exprimé en ml/kg/min et V en km/h et V^2 en km/h.

Pour plus de facilité d'utilisation, vous pouvez vous référer à l'équation simplifiée : $\dot{V}O_2 = 3,5 V$ où $\dot{V}O_2$ est exprimé en ml/kg/min et V en km/h

quer qu'un 2.000 m chez les femmes se court en 5min25s soit à 22,2 km/h. On peut considérer qu'il s'agit de la vitesse maximale aérobie féminine ; en appliquant la formule de Luc léger on obtient alors une consommation maximale d'oxygène de 77,5 ml.min⁻¹.kg⁻¹. Remarquons que l'on retrouve les valeurs estimées à partir du record du monde féminin, quoique le 2000m soit peu couru donc perfectible.

5. LE PASSÉ ET L'AVENIR DE L'ENTRAÎNEMENT

Les coureurs de fond qui marquèrent l'histoire en faisant progresser les records du monde ont parfois fait varier l'entraînement, en jouant, sans le formaliser comme tel, sur les 3 registres de vitesses : en dessous de la vitesse au seuil lactique, à la vitesse au seuil lactique et à la vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène.

Le tableau 4 décrit l'entraînement de quelques grands champions de course de fond qui ont marqué l'histoire de la course à pied et le tableau 5 l'équivalence des nomenclatures de l'entraînement depuis les années 50. Cet entraînement est décrit selon les trois registres d'intensité qui ont une signification physiologique :

- 1) vitesse inférieure au seuil lactique,
- 2) vitesse égale et légèrement supérieure au seuil lactique
- 3) la vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène.

Nous pouvons constater que leurs entraînements respectaient cette répartition, même si cela n'était pas explicite. Ils n'ont pas attendu les concepts physiologiques pour varier leurs vitesses d'entraînement.

L'intérêt d'une approche scientifique de l'entraînement est de pouvoir analyser les raisons d'une progression (ou d'une régression) par la mise en corrélation de ces variations de performance avec celles des facteurs énergétiques de la performance. Il n'est cependant pas question de réduire la performance à une simple dimension énergétique, mais cette dernière reste incontournable.

Si les vitesses ont été calibrées et différenciées, l'entraînement a trop souvent

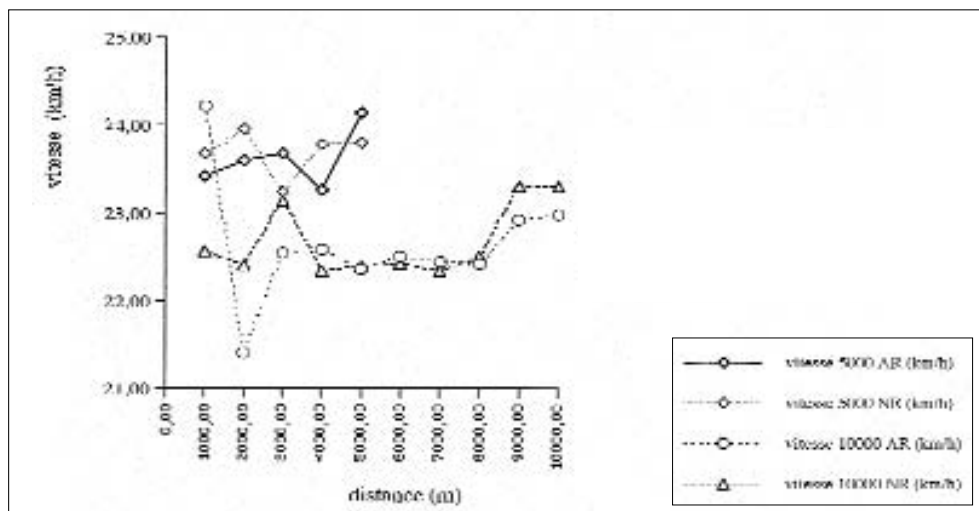
négligé le calibrage des répétitions de course par rapport au temps limite que pouvait soutenir le coureur à cette vitesse. Le temps a été oublié dans la physiologie du XX^e siècle qui a modélisé les réponses physiologiques uniquement en fonction de l'intensité de l'exercice en négligeant les durées constantes longues de 1 à 5 minutes selon les protocoles.

Ainsi, la vitesse qui entraîne la consommation maximale d'oxygène n'est pas unique. Si l'on demande à un coureur de courir à la vitesse maximale qu'il peut soutenir pendant une durée limite comprise entre 2 et 8 minutes (à des vitesses variant de plusieurs km/h), il atteindra sa consommation maximale d'oxygène. Par contre il existe sans doute une seule vitesse qui permettra de soutenir le plus longtemps sa consommation maximale d'oxygène (Billat et al., 1999). Pour autant ce n'est pas cette seule vitesse qui peut être la clef de l'amélioration rapide de la consommation maximale d'oxygène, puisqu'une longue durée de stimulation du débit cardiaque (à son niveau maximal) peut être obtenue par l'entraînement fractionné courue à des vitesses supérieures (Billat et al., 2000).

A présent, il est possible d'accéder en direct aux réponses physiologiques pendant la séance d'entraînement, voire même la compétition, grâce à des appareils de mesures télémétriques (mesure de la consommation d'oxygène, de la fréquence cardiaque). Il sera surprenant de constater l'évolution des échanges gazeux lors d'épreuves de demi-fond long (5.000, 10.000 m) pour lesquelles la vitesse n'est pas constante (figure 3). La question posée est de savoir dans quelle mesure le coureur régule sa vitesse sur les constantes physiologiques. Ces nouveaux outils ne seront cependant utiles que si les entraîneurs et les scientifiques s'allient pour proposer une alternative au dopage : le progrès par l'individualisation de l'entraînement à partir des caractéristiques bioénergétiques du sportif mises en rapport avec une analyse des contraintes relevées en compétition.

Tous les moyens de la lutte contre le dopage ne doivent pas se résumer aux contrôles ou aux campagnes de sensibilisation. Il faut être efficace et être en mesure de proposer à chacun, un entraînement pour progresser que ce soit pour le sportif qui

FIGURE 3 : Profil des vitesses de course au cours du 5000 m et du 10.000 m des anciens ou nouveaux records du monde (battus à 3 semaines d'intervalle seulement).



pratique pour la production d'un spectacle sportif (premier système de la performance) ou pour celui qui pratique d'abord pour se confronter à lui-même (second système de la performance selon Paul Yonnet, 1998).

BIBLIOGRAPHIE

- Astrand I., Astrand P.O., Christensen E.H., Hedman R. Intermittent muscular work. *Acta Physiol. Scand.*, 48, 448-453, 1960.
- Billat V. *Course de fond et performance*. Chiron, Paris, 280pp, 1991.
- Billat V. *Physiologie et méthodologie de l'entraînement*. De Boeck université, Paris, 193 p., 1998.
- Billat V. Use of Blood lactate Measurements for Prediction of Exercise Performance and for Control of Training. *Sports Med.*, 22, 157-175, 1996.
- Billat V., Koralsztejn J.P. Significance of the velocity at and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med.* 22, 90-108, 1996.
- Billat V., Pinoteau J., Petit B., Renoux J.C., Koralsztejn J.P. Reproducibility of running time to exhaustion at in sub-elite runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 26, 254-257, 1994.
- Billat V., Pinoteau J., Petit B., Renoux J.C., Koralsztejn J.P. Calibration de la durée des répétitions d'une séance d'interval training à la vitesse associée à en référence au temps limite continu. *Science et Motricité*, 28, 13-20, 1996.
- Billat V., Flechet B., Petit B., Muriaux G., Koralsztejn J.P. Interval training at $\dot{V}O_{2\max}$: effects on aerobic performance and overtraining markers in endurance athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31, 156-163, 1999.
- Billat V., Bocquet V., Slawinski J., Demarle A., Lafitte L., Koralsztejn J.P. Intermittent run at $v \dot{V}O_{2\max}$ allows runners to stay a longer time at $\dot{V}O_{2\max}$ than continuous severe run. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 81 (3) : 188-1996, 2000.
- Bocquet V., Blondel N., Billat V., Koralsztejn J.P. Does Hill's relationship change through time ? 4th annual congress of the European College of Sport Science. Rome, 322, 1999.
- Brooks GA. Anaerobic threshold : review of the concept and direction for future research. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 17, 22-31, 1985.
- Brooks GA. The lactate shuttle during exercise and recovery *Med. Sci. Sports Exerc.*, 18, 360-368, 1986.
- Cavagna G.A., Willems P.A., Franzetti P., Detrembleur C. : The two power limits conditioning step frequency in human running. *J Physiol* 437, 95-108, 1991.
- Cerretelli P et al. Kinetics of metabolic transients during exercise, 187-209 in « *Exercise bioenergetics and gas exchange* », Ceretelli P. and Whipp BJ editors, Elsevier/North Holland Biomedical Press, 1980.
- Christensen E.H., Hedman R., Saltin B. Intermittent and continuous running. *Acta Physiol. Scand.*, 50, 269-287, 1960.
- Conconi et al. Determination of the anaerobic threshold by a non invasive field test in runners. *J. Appl. Physiol.* 52, 869-873, 1982.
- Costill DL. *Approche scientifique de la course de fond*. Vigot Editeur, Paris, 180 pp., 1981.
- di Prampero P.E. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med.* 7, 55-72, 1986.

- Faina M. et al. Maximal accumulated oxygen deficit during a time limit test at in swimmers, kayakers and cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 76, 13-20, 1997.
- Farrel et al. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 11, 338-344, 1979.
- Fox E.L., Bartels R.L., Klinzing J., Ragg K. Metabolic responses to interval training programs of high and low power output. *Med. Sci. Sports Exerc.* 9, 191-196, 1977.
- Gazeau F, Koralsztein JP., Billat V. Biomechanical events in the time to exhaustion at maximum aerobic speed. *Arch. Physiol. Biochem.* 105, 6, 1-8, 1997.
- Heck H. et al. Justification of the 4 mmol/l lactate threshold. *Int. J. Sports Med.* 6, 117-130, 1985.
- Hermanssen L. Effect of metabolic changes on force generation in skeletal muscle during maximal exercise. Dans *Human Muscle Fatigue : Physiological mechanisms*. Porter R., Whelan J. (eds). London ; Pitman Medical. 75-88, 1981.
- Hill A V. *Muscular movement in man*. New York, Mc Graw - Hill, 192, 104 p.
- Keul J., Kindermann W. La transition aérobie-anaérobie lors de la pratique de certains sports. Dans *actes du Colloque International de Saint Etienne*. Lacour JR, 37-67, 1978.
- Kindermann W, Simon G, Keul J, The significance of aerobic-anaerobic transition for the determination of workload intensities during endurance training. *Eur J appl physiol* 42, 25-34, 1979.
- Léger L., Boucher R. An indirect continuous running multistage field test, the université de Montréal Track Test, *Can. J. Appl. Sports Sci.*, 5, 77-84, 1980.
- Liu Y., Schutz R.W. Prediction models for track and field records : analysis and predictions. *J. Sports Med.*, 8, 36-42, 1998.
- McDougall JD. et al. Biochemical adaptation of human skeletal muscle to heavy resistance training and immobilization. *J. Appl. Physiol.* 43, 700-703, 1977.
- Mader A., Heck H. A theory of the metabolic origin of anaerobic threshold. *Int. J. Sports Med.* 7, (suppl 1.) 45-65, 1986.
- Margaria R., Edwards H.T., Dill D.B. The possible mechanism of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *Am.J. Physiol.* 106, 689-719, 1933.
- Margaria R., Oliva R.D., di Prampero P.E., Ceretelli P. Energy utilization in intermittent exercise of supramaximal intensity. *J. Appl. Physiol.*, 26, 752-756, 1969.
- Medbo J.I., Mohn A.C., Tabata I., Bahr R., Vaage O., Sejersted O.M. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J. Appl. Physiol.*, 64, 50-60, 1988.
- Newsholme EA. et al. La course à pied. Bases scientifiques, entraînement et performance. De Boeck Université, Paris-Bruxelles, 1997.
- Péronnet F. Le Marathon. Equilibre énergétique, alimentation et entraînement du coureur sur route. Deuxième édition, Décarie, Montréal ; Vigot, Paris, 438 pp, 1991.
- Reindell, H., Roskamm H. Ein Beitrag zu den physiologischen Grundlagen des Intervalltrainings unter besonderer Berücksichtigung des Kreislaufes. *Schweiz. Z. Sportmed.* 7, 1-8, 1959.
- Stegmann H, Kindermann W. Comparison of prolonged exercise tests at individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol. l⁻¹ lactate. *Int. J. Sports Med.* 3 : 105-110, 1982.
- Van Aacken E. « *Van Aacken method* » World Publications, Mountain view, CA, USA, 140 pp., 1976
- Whipp B.J., Wasserman K. Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J. Appl. Physiol.* 5, 351-356, 1972.
- Wasserman K., Mc Ilroy MB. Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am. J. Cardiol.*, 14, 844-852, 1964.
- Yonnet P., *Système des sports*. Gallimard Edition, Paris, 251 pp., 1998.

Los aportes de la ciencia al entrenamiento deportivo: ejemplo de la carrera de fondo

Resumen

Este artículo observa la evolución de los aportes de la ciencias de la vida y la salud en general, la fisiología en particular sobre la evolución de los rendimientos y los métodos de entrenamiento de los corredores de fondo. Los factores que limitan estas pruebas son principalmente de orden fisiológicos y particularmente bioenergéticos. Al examinar la progresión de los mejores rendimientos mundiales en la Maratón desde fines del siglo 19, se hace imposible detectar un avance extraordinario en relación a los descubrimientos científicos. Es posible distinguir algunas zonas de velocidades que corresponden a respuestas fisiológicas particulares y que permiten progresar sobre diferentes distancias. Se pueden distinguir tres velocidades que limitan 4 zonas de intensidades: 1) la velocidad máxima estado estable de la lactatemia; 2) la velocidad crítica el tiempo es limitado a 30 minutos; 3) la velocidad máxima que necesita VO₂max, determina a través de un test triangular y el test de Luc Léger. Para los atletas de elite estas velocidades corresponden a las velocidades específicas de semi maratón, de 10.000m y de 3000m. Los programas de entrenamiento no son muy diferentes según la épocas y las escuelas.

L'apporto della scienza nell'allenamento sportivo: esempio della corsa di fondo

Riassunto

Questo articolo osserva l'evoluzione dell'apporto delle scienze della vita e della salute in generale, e della fisiologia in particolare sull'evoluzione delle performance e dei metodi d'allenamento delle corse di fondo (dai 10.000 m alla maratona). In effetti, i fattori limitanti di queste prove sono principalmente d'ordine fisiologiche e, in particolare, bioenergetiche. Esaminandone la progressione (regolare) delle migliori prestazioni mondiali sulla maratona dalla fine del XIX secolo, è impossibile individuare un avanzamento straordinario da mettere sul conto di questa o quella scoperta scientifica. Attualmente è possibile distinguere delle zone di velocità corrispondenti a risposte fisiologiche particolari e che permettono di progredire su differenti distanze di corsa. In effetti si distinguono 3 velocità che delimitano 4 zone d'intensità: 1°) la velocità massima dello stato stabile della lattacidemia (in cui il tempo limite è di un'ora), 2°) la velocità critica (asintoto della relazione tempo limite a VO₂ max e distanza limite a VO₂ max) il cui tempo limite è i 30 minuti, e 3°) la velocità minimale che sollecita il VO₂ max (vVO₂ max o velocità massima aerobica) determinata durante un test triangolare come il test di Luc Léger. Per atleti d'élite, queste velocità corrispondono alle velocità specifiche della mezza maratona, del 10.000 m e dei 3.000 m. I programmi d'allenamento non sono molto differenti secondo le epoche e le scuole, ma è oggi possibile analizzare le ragioni di un successo e di un insuccesso associandone il volume chilometrico realizzato a ciascuna di queste velocità verso delle modificazioni fisiologiche.

Der Beitrag der Wissenschaft zum Training im Sport: das Beispiel Langstreckenlauf

Zusammenfassung

Dieser Artikel beobachtet die Entwicklung des Beitrags der Wissenschaften vom Leben und der Gesundheit allgemein und speziell der Physiologie auf die Leistungsentwicklung und die Trainingsmethoden beim Langstreckenlauf (10000m, Marathon). In der Tat, die leistungslimitierenden Faktoren dieser Disziplinen sind vor allem physiologischer und besonders bioenergetischer Natur. Wenn man die (gleichmäßige) Entwicklung der weltbesten Zeiten im Marathonlauf seit Ende des 19. Jahrhunderts analysiert, ist es unmöglich, einen Leistungssprung festzustellen, der auf das Konto irgendeiner wissenschaftlichen Entdeckung gehen könnte. Gegenwärtig ist es möglich, Geschwindigkeitsbereiche zu unterscheiden, die besonderen physiologischen Reaktionen entsprechen und die es erlauben, auf unterschiedlichen Laufstrecken Fortschritte zu erzielen. Man unterscheidet drei Geschwindigkeitsbereiche, die vier Intensitätszonen abgrenzen: 1) Die maximale Geschwindigkeit bei stabilem Laktat Spiegel (max. 1 Stunde). 2) Die kritische Geschwindigkeit (Asymptote der Relation zwischen limitierender Zeit bei VO₂max und limitierender Distanz bei VO₂max), deren limitierende Zeit bei 30 Min. liegt, und 3) die minimale Geschwindigkeit, bei der es zur VO₂max kommt (vVO₂max oder maximale aerobe Geschwindigkeit), die durch einen Dreieckstest wie den Test Luc Léger bestimmt wird. Bei Eliteathleten entsprechen diese spezifischen Geschwindigkeiten dem Halbmarathon, den 10000m und den 3000m. Die Trainingsprogramme sind nicht sehr unterschiedlich je nach Epochen oder Schulen, aber es ist gegenwärtig möglich, die Gründe für einen Erfolg oder Misserfolg zu analysieren, indem man den bei diesen Geschwindigkeiten realisierten Umfang mit physiologischen Modifikationen in Verbindung bringt.