

Modèles mathématiques et physiologiques de la performance humaine

V. Bocquet¹, V. Billat^{2,3*}

¹Laboratoire d'étude de la motricité humaine, faculté des sciences du sport, université Lille 2, 59730 Ronchin;

²laboratoire de biostatistique, université Paris V, 5, rue des Saint-Pères, 75006 Paris; ³centre de médecine du sport de la CCAS, 2, avenue Richerand, 75010 Paris, France

(Reçu le 30 avril 1998; accepté le 25 février 1999)

Résumé

Introduction. – Au cours de ce siècle, des modèles empiriques et bioénergétiques ont été utilisés pour prédire et expliquer la performance humaine (rapport entre une vitesse et un temps de soutien). L'objectif de cet article est de confronter ces modèles élaborés à partir des records du monde aux modèles bioénergétiques proposés par les physiologistes.

Actualités et points forts. – Les physiologistes ont proposé des modèles bioénergétiques fondés sur des caractéristiques des métabolismes aérobie et anaérobie (puissances, capacités maximales et inertie).

Perspectives et projets. – Les modèles à venir devront prendre en compte les nouvelles caractéristiques déterminantes de l'endurance humaine, comme la composante lente et dérivée de la consommation d'oxygène, la variabilité interindividuelle du coût énergétique de la locomotion et du temps limite à la consommation maximale d'oxygène. © 1999 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

bioénergétique / modélisation / performance / sport

Summary – Mathematical and physiological models of human performance.

Introduction. – In this century, empirical and bioenergetic endurance modelling (i.e., the relationship between time and velocity) have been proposed to predict and explain performance over short and long distances, in running especially. The purpose of this article is to present an historical review of these modelling and applying some of them to middle- and long- distance running.

Current knowledge and key points. – The limit of each of these models is considered as the inter-individual variability of time to exhaustion (time limit) at the maximal oxygen consumption. In the same manner, none of them take into account the oxygen slow component, which appeared for supra-lactate threshold exercise.

Future prospects and projects. – In the future, the oxygen slow component and variability of time to exhaustion at the maximal oxygen consumption should be taken into account to better individualize this bioenergetic profile via the endurance model. © 1999 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

bioenergetic / modelling / performance / sport

*Correspondance et tirés à part : V. Billat, laboratoire d'étude de la motricité humaine, faculté des sciences du sport, université Lille 2, 59730 Ronchin.

Grâce à l'analyse des records du monde du 100 m au 1 000 km (*tableau I*) à la course, des modèles empiriques de la relation entre la vitesse et son temps limite (temps record) ont été élaborés lors de la première moitié du XX^e siècle afin d'appréhender l'endurance humaine. D'autres modèles tentèrent d'expliquer (et parfois de prédire) la performance (réalisation d'un temps sur une distance) sur la base de caractéristiques bioénergétiques de plus en plus élaborées.

La dichotomie observée entre les modèles selon notre classification (empirique et bioénergétique) n'est pas toujours satisfaisante, car certains modèles dit « empiriques » proposent une explication d'ordre physiologique des grandeurs obtenues. De plus, les modèles « bioénergétiques » sont basés sur les résultats d'expérimentations ; ils présentent aussi, dans une certaine mesure, un caractère empirique. Ainsi que l'ont proposé Péronnet et Thibault [45], le regroupement thématique des modèles peut l'être en fonction de leur formulation mathématique (hyperbolique ou logarithmique). Cependant, nous avons considéré que cette partition, qui a le mérite d'être simple, ne montrait pas avec force la différence de démarche entre des physiologistes qui tentaient d'élaborer des modèles en partant des caractéristiques bioénergétiques d'endurance des humains et des mathématiciens qui s'intéressaient davantage à la forme mathématique de la relation vitesse-temps en observant la courbe des records du monde sur l'ensemble des distances de compétitions officielles. Après la présentation de ces différents modèles, nous envisagerons de nouveaux paramètres physiologiques permettant des développements possibles de cette modélisation de l'endurance humaine.

di Prampero [14] ou Péronnet et Thibault [29] ont déjà souligné que la modélisation de la courbe d'endurance (relation vitesse-temps) permettait de comprendre la contribution et les caractéristiques des différents métabolismes énergétiques. Pour notre part, nous considérons que l'enjeu actuel d'une telle approche est également de constituer un outil d'analyse théorique de l'amélioration de l'endurance selon tel ou tel type d'entraînement et d'envisager les progrès de l'homme sans moyens illicites.

MODÈLES EMPIRIQUES

L'analyse de la relation intensité-durée avait déjà largement été investie par Kennelly dès 1906 [29], à partir des records du monde de l'époque (4 minutes et 12 secondes au mile ou 13 heures 26 minutes 27 secondes au 100 miles). Kennelly [29] avait élaboré une « ébauche de loi sur la fatigue des vitesses de course chez l'animal », la notion « d'animal » se référant, dans cette étude, à l'homme et au cheval. Celui-ci découvrait une relation entre V_T , vitesse qui peut être maintenue pendant un temps T , et T lui-même :

Tableau I. Vitesses records de l'espèce humaine (sexe masculin) en fonction de la distance et de la durée en course à pied (au 29 juillet 1998).

Distance	Temps	ln temps (s)	Vitesse (m·s ⁻¹)	Vitesse (km·h ⁻¹)
100 m	9,85 s	2,287	10,152	36,548
200 m	19,32 s	2,961	10,351	37,267
400 m	43,29 s	3,767	9,240	33,264
800 m	1 min 41,11 s	4,616	7,912	28,483
1 000 m	2 min 12,18 s	4,884	7,565	27,235
1 500 m	3 min 26 s	5,327	7,281	26,211
2 000 m*	4 min 50,81 s	5,672	6,877	24,758
3 000 m*	7 min 25,11 s	6,098	6,739	24,263
5 000 m	12 min 39,74 s	6,632	6,581	23,692
10 000 m	26 min 27,85 s	7,370	6,297	22,672
20 km	56 min 55,06 s	8,135	5,856	21,083
21,100 route	59 min 24 s	8,178	5,920	21,313
21,101	1 h 00 min 00 s	8,188	5,861	21,101
25 km route	1 h 13 min 55,8 s	8,397	5,635	20,289
30 km	1 h 29 min 18,1 s	8,586	5,598	20,156
42,195 km	2 h 06 min 50 s	8,937	5,544	19,960
100 km	6 h 10 min 20 s	10,008	4,549	16,378
200 km	16 h 32 min 20 s	10,994	3,359	12,092
452,27 km	48 h	12,059	2,617	9,422
1 023,2 km	144 h (6 jours)	13,158	1,973	7,105

In : logarithme népérien du temps exprimé en secondes. * Ces vitesses sont proches de la vitesse minimale sollicitant $\dot{V}O_{2max}$: la vitesse aérobie maximale (VAM) ou $v\dot{V}O_{2max}$ selon les auteurs.

$$V_T = \frac{K}{T^n}$$

dans laquelle K est une constante dépendant du type de travail et n un exposant variant de 1/8 à 1/9.

Puisque :

$$V_T = L/T, \log T = 9/8 \log L - 1,2307$$

où L est la longueur de la course en mètres. Selon ce modèle empirique, doubler la distance de course revenait à augmenter le temps de course de 118 %. Kennelly conseillait aux athlètes désireux de battre un record du monde de s'attaquer de préférence à ceux dont les points étaient situés au-dessus de la ligne décrivant cette relation. Il mit également en évidence la ressemblance de ces relations chez l'homme et le cheval, en ayant eu soin de distinguer la marche (pour l'homme et le cheval) du trot et du galop (la course pour l'homme). Il avait eu l'intuition que la différence de coût énergétique selon le type de locomotion pouvait modifier la relation vitesse/temps.

Vingt ans après, Kennelly, en 1926 [30], aborda la notion de pente de la relation vitesse (exprimée en $\log \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)—temps (en $\log \text{ s}$) dans un diagramme à double échelle logarithmique, et comparait celle-ci en fonction du sexe et du type de locomotion humaine : cyclisme, patinage, course à pied, aviron à huit barreaux, marche, natation (nage libre).

Juste après Kennelly, Meade [37], en 1916, soulignait alors le caractère fiable des records du monde et la possibilité de les exploiter pour en déduire les caractéristiques physiologiques de l'homme. En effet, en partant du nouveau record du mile (1 609 m couverts alors par Norman Taber en 4 minutes 02 secondes) (80 ans avant le record établi par Nouredine Morcelli, en 3 minutes 44,39 secondes), il s'interrogeait sur les limites des performances humaines. En établissant la relation entre l'allure (temps au mile) et la distance, il remarquait alors que les courses les plus longues (au-delà de 10 miles) étaient de meilleur niveau (c'est-à-dire placée au dessous de la courbe décrivant cette relation). Il l'expliquait par le fait qu'elles étaient courues par des professionnels (plus motivés). Il en déduisait alors que les records amateurs avaient de larges possibilités d'amélioration. En 1934, Meade [38] constatait que la courbe de la relation vitesse-distance n'était probablement pas logarithmique et ne correspondait donc pas à l'équation décrite par Kennelly en 1926.

L'analyse mathématique de la courbe puissance-durée se poursuivait par les travaux des Allemands Grosse-Lordemann et Müller [22], qui reprenaient les travaux de Kennelly, sur la base des records mondiaux de course de leur époque (1937). De leurs résultats, ils formulaient des équations descriptives dont une seule fut reprise ultérieurement par Tornvall [52], 25 ans plus tard, en 1963. Cette équation est la suivante :

$$\log t = a \cdot \log P + b.$$

Cette équation pouvant s'écrire :

$$t = 10^{(a \log P + b)}$$

où P est la puissance soutenue (W) et t est le temps pendant lequel cette puissance P peut être soutenue (secondes); a et b ont les valeurs estimées respectives de -3,04 et 10,01, ces valeurs étant obtenues empiriquement par une analyse des moindres carrés sur huit points expérimentaux en prenant le logarithme de P comme une variable indépendante (variable placée en abscisse). Les paramètres a et b sont très variables d'une personne à l'autre, cependant ni Grosse-Lordemann et Müller ni Tornvall ne leur ont donné une quelconque signification physiologique.

L'approche descriptive se poursuivait par les travaux de Francis [17], en 1943. Ce dernier traçait graphiquement la courbe entre la vitesse et le logarithme de la distance de course, puis la comparait avec une courbe de type hyperbolique. Cette dernière permettait de prédire de façon satisfaisante la vitesse sur des distances comprises entre 400 m et 19 km. L'équation hyperbolique proposée par Francis à partir des points expérimentaux issus de l'observation de la relation vitesse-temps du 400 m au 19 km était la suivante :

$$(\log d - 1,5) (v - 3,2) = 6,081$$

où d est la distance en mètres et v est la vitesse en mètres par secondes. L'asymptote horizontale de l'hyperbole correspondait à une vitesse de «non-fatigue» (supposée pouvoir être maintenue indéfiniment) que Francis identifia alors comme étant celle du «trot de chien» (vitesse de 3,2 m/s soit 11,5 km/h). Cette vitesse était supposée pouvoir être maintenue indéfiniment (nonobstant la question du sommeil). Il donne l'image du trot de chien (*dog trot*) qui illustre parfaitement cette impression qu'on les coureurs de pouvoir trotter indéfiniment à une vitesse donnée qui est proche de 50 % de la vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène pour la plupart des coureurs entraînés. Le modèle de Francis suggère déjà un modèle dans lequel les caractéristiques bioénergétiques humaines pourraient être incorporées.

MODÈLES DE LA RELATION ENTRE PUISSANCE, DISTANCE, VITESSE ET TEMPS, UTILISÉE POUR CARACTÉRISER L'ENDURANCE ATHLÉTIQUE

Nous avons vu dans les modèles empiriques que l'analyse des records du monde fournissait une appréciation utile des limites de la performance humaine par l'appréhension de la relation vitesse-temps donnée par les records du monde. Cependant, ces modèles ne permettaient pas d'apprécier l'endurance d'un sujet.

Nous entendons par l'expression «endurance athlétique» la capacité de soutenir une vitesse donnée le plus longtemps possible (la capacité dans un temps donné de soutenir la plus haute puissance moyenne ou constante possible). Nous avons ajouté à la notion d'endurance celle d'endurance «athlétique» sans aucune référence ici à la consommation maximale d'oxygène ou à une quelconque caractéristique bioénergétique du sujet. Il est cependant évident que le temps limite est sous-tendu par des facteurs physiologiques et psychologiques sous-jacents de cette endurance athlétique.

Henry et Farmer [25], en 1949, abordèrent la notion d'endurance par le *dropp-off index* défini comme un index d'endurance mesuré par la différence entre le temps requis sur 300 yards et le temps mis pour courir 70 yards (1 yard équivaut à 0,901 m). Ainsi :

$$\text{index d'endurance} = \frac{\text{temps sur 220 yards} - \text{temps sur 70 yards}}{\text{temps sur 220 yards}}$$

Cet index était bien corrélé avec la sensation subjective de l'état d'entraînement («pas entraîné, un peu, bien, extrêmement») ainsi qu'avec l'état présumé de condition physique (pauvre, assez bonne, bonne, excellente). Henry et Farmer concluaient que l'état d'endurance des sujets pouvait être apprécié par le jugement subjectif des sujets sur leur entraînement et leur condition physiques. Pour autant, l'analyse mathématique des records du monde et de leurs évolutions historiques n'était pas abandonnée.

En effet, 5 ans plus tard, en 1954, Henry [26] examinait l'évolution historique du record du mile depuis 1865 (date à laquelle Webster l'avait parcouru en 4 minutes 44 secondes). Il constatait alors que la plupart des records du mile auraient pu être prédits par la courbe exponentielle liant le temps record sur le mile et l'année de leur établissement. Il ne s'avancait pas pour autant à prédire la date à laquelle la fameuse barrière des 4 minutes serait battue (en 1954 par Roger Bannister). Il supputait que cette barrière pourrait révéler des limites physiologiques, sans préciser ce qu'elles pourraient être. On peut donc constater que la modélisation de l'endurance était largement sous-tendue par l'idée de prédire l'évolution des records, ce que même des auteurs modernes comme Péronnet et Thibault [45] ne sauraient renier dans leur approche de l'index d'endurance (ce que nous verrons ultérieurement dans les modèles physiologiques).

Ce même type de recherche fut réalisé par Lietzke [32, 33], en 1954 et 1956, qui analysait la relation entre l'allure (temps pour un 100 m en course) en fonction de la distance, sur la base des records de natation, marche et course. Tous les points qui se situaient en dessous de la courbe pouvaient être largement battus. Il précisait alors le gain d'allure et la marge de temps qu'il était possible de gagner sur la distance considérée. Lietzke remarquait sur la courbe de la relation allure-temps de course (en utilisant une échelle logarithmique), que la vitesse maximale (moyenne) était atteinte pour une durée de 15 secondes avec une vitesse de 0,00620 mile/s (35,91 km/h), ce qui est encore vrai à notre époque, même si la vitesse maximale actuelle est proche de 40 km/h. Lietzke regrettait alors l'absence de courses officielles comprises entre 100 et 200 m qui auraient permis d'exprimer cette vitesse maximale (on peut facilement imaginer l'intérêt de la rencontre des deux recordmen du monde du 100 m et du 200 m, comme Bailey et Johnson sur 150 m). Lietzke faisait donc remarquer que l'analyse des records mondiaux de course à pied devait partir du 150 m (pour les distances plus courtes, le temps de réaction du départ abaisse sensiblement la vitesse moyenne). Il constatait que la courbe suit une pente (négative) importante jusqu'au temps de course de 140 secondes ou 1 000 m (vitesse de 26 km/h). Au-delà de ce point, la courbe a une pente plus faible, traduisant une perte de vitesse moindre avec l'allongement de la durée de l'exercice. Lietzke considérait que c'est le second souffle qui expliquerait la moins grande perte de vitesse en fonction du temps. Lietzke constatait finalement qu'au-delà de 12,5 miles (20,1 km), la vitesse s'infléchissait à nouveau. De plus, Lietzke mit également en relation la distance parcourue (d , en logarithme) avec le temps (t , en logarithme) pour obtenir une relation presque linéaire.

$$\log d = k \log t + \log a$$

où k est la pente et $\log a$ est l'intercepte de la droite. Cette équation peut s'écrire :

$$d = at^k \text{ ou bien } t = (d/a)^{1/k}$$

Étant donné que la vitesse $v = d/t$ et que $d = at^k$ et que $t = (d/a)^{1/k}$, on peut alors écrire que :

$$v = at^{k-1} = a^{1/k} d^{(k-1)/k}$$

Cette équation comportait une constante $K = (k-1)/k$, qualifiée de « constante d'épuisement » et qui donne une mesure quantitative du délai d'apparition de la fatigue. Il s'agissait alors de la première quantification de l'endurance humaine. Cette valeur était de $-0,239$ pour les femmes et de $-0,009$ pour les hommes ; Lietzke ne commentait pas ces différences entre les sexes. Cette constante représente donc une seconde quantification de l'endurance après celle d'Henry et Farmer.

Meade [39], en 1956, critiquait les travaux de Lietzke en dénonçant son absence d'originalité par rapport à ceux du pionnier Kennelly [29] et conseillait à Lietzke de prendre en compte le contexte historique et culturel de l'établissement des records selon les distances, beaucoup d'entre elles étant peu courues. Quatre-vingt ans plus tard, Whipp et Ward [55] ont fait la même omission, au risque de prédire dans la prestigieuse revue *Nature* que les femmes allaient courir plus vite que leurs homologues masculins sur les longues distances. En effet, ils avaient oublié que l'amélioration rapide des performances féminines, sur le marathon par exemple, était surtout le fait d'une réglementation archaïque qui n'a inscrit la distance sur le programme olympique qu'à partir de 1984 (aux jeux olympiques de Los Angeles). Lietzke [33] répliqua à Meade [39] que la compréhension de la relation vitesse-temps devait être conjointement menée en utilisant une approche physiologique et statistique.

Frederick [18], en 1959, proposait une relation entre la distance et le temps limite (t_{lim}) calculée à partir des records du monde de l'époque (course à pied, patinage, cyclisme). Il était alors possible de considérer que le champion était épuisé au terme de la distance et que son temps pouvait être pris comme le temps limite de la distance considérée. Pour chaque sport, la courbe de la relation vitesse-temps a une pente très raide pour les distances courtes, suivie d'une diminution de la vitesse (V) beaucoup plus faible au-delà des distances couvertes en plus de 240 secondes.

Les deux portions de droites se croisent au temps limite de 4 minutes (240 secondes). La relation proposée par Frederick est décrite par l'équation :

$$\log V = a + b \log t$$

où a et b sont des constantes.

Craig [10], en 1963, s'attachait tout particulièrement à l'étude des conditions historiques de la réalisation des records du monde. Il considérait, en effet, qu'il est

impossible de prédire des performances sans avoir une vue d'ensemble de l'évolution de ces records à travers l'histoire. Craig comparait alors les courbes de vitesse-temps à partir des records de 1920 et de 1961 en course à pied. Il remarquait alors que la forme de ces deux courbes était similaire: avec une diminution rapide de la vitesse pour les distances d'une durée inférieures à 5 minutes, puis un ralentissement plus lent au-delà. Les progrès réalisés traduisaient l'amélioration des techniques de course et d'entraînement sur toutes les distances puisque la forme de la courbe restait similaire à 40 ans d'intervalle. Craig préconisait de comparer la courbe individuelle à celle des records du monde pour apprécier les qualités de vitesse et d'endurance d'un coureur afin de l'orienter sur les courses courtes ou longues.

Si ces modèles d'analyse de la relation vitesse-temps ne considèrent que les vitesses moyennes, c'est qu'effectivement le maintien d'une vitesse de course constante est la stratégie de course optimale pour battre un record pour les distances supérieures à 291 m, ainsi que le démontre Keller [28] en 1973 sur la base de la seconde loi de Newton (la force est proportionnelle à l'accélération de masse). Cette étude est l'une des rares à avoir pris en compte la notion de vitesse instantanée, réelle et non moyenne, dans l'approche de la relation vitesse-temps. La contrainte d'une équation d'optimisation est la réalisation d'un temps «*t*» le plus petit possible sur une distance donnée «*d*». La variable décrivant le débit d'énergie dépend de la consommation maximale d'oxygène du coureur, à laquelle s'ajoute une réserve d'énergie initiale. Aussi le problème à résoudre est-il de trouver d'une part une vitesse de course compatible avec les réserves d'énergie et leur débit de renouvellement et, d'autre part, la durée (minimale) de l'exercice. Cette théorie est basée sur la seconde loi de Newton et le calcul des variations qui déterminent une stratégie optimale utilisée pour trouver le temps le plus court possible pour couvrir une distance donnée selon les équations:

$$d = F\tau^2 (1/\tau + c^{-1/\tau-1})$$

pour les distances inférieures à 291 m

$$v^2 = \sigma\tau^2 + (v^2 t_1 - \sigma\tau) e^{-2(t_2-t_1)/\tau}$$

pour les distances supérieures à 291 m

où *F* est la constante de force maximale que peut exercer le coureur, σ est l'énergie équivalente à la consommation maximale d'oxygène (puissance maximale aérobie) du coureur, τ est la constante de proportion pour les forces externes de résistance au mouvement et t_1 et t_2 sont les temps entre lesquels la vitesse *v* est constante pendant un intervalle de course.

Ryder [49], en 1976, analysait l'amélioration des allures (par tranche de 100 m) du 100 m au 30 km de 1926 à 1976. Pour le 100 m, il constate un gain de 0,6 mètres par minute d'exercice soit 10 cm par an sur

un 100 m de 10 secondes. Sur le marathon, il obtenait une amélioration de 0,9 mètre par minute et par an soit 116 mètres sur les 42,195 km. Pour autant, même s'il a une approche prospective de l'endurance humaine par l'analyse de l'amélioration des records sur des distances courtes et longues, il ne va pas plus loin dans son analyse de l'évolution de l'endurance humaine. Cette étude montra cependant que les records, qu'ils soient sur distances longues ou courtes, s'étaient améliorés au même rythme (relatif) tout au long de ce demi-siècle, ce qui a pour conséquence de conserver la forme générale de la relation vitesse-temps de l'espèce humaine. Cela donne à réfléchir sur l'incidence des progrès scientifiques et technologiques sur des distances de courses aussi différentes que le 100 m ou le marathon.

En 1977, Frederick [19], poursuivant ces travaux antérieurs (voir supra) publiait une analyse statistique du modèle d'endurance. Il établissait une régression linéaire entre l'allure de course (en minutes par mile) en fonction du logarithme de la distance de course accomplie. La pente est considérée comme un «coefficient de fatigue» (*f*), expression de la diminution de la vitesse en fonction du temps. Il observait des valeurs de «*f*» différentes selon les spécialités sportives, formant ainsi trois catégories:

- les coureurs de 1 500 m ($f = 1,0 \pm 0,09$);
- les coureurs de 5 000 m–10 000 m ($f = 0,699 \pm 0,021$);
- les marathonniens ($f = 0,619 \pm 0,02$).

Ainsi, en examinant le facteur «*f*» de coureurs, il était possible de les orienter sur une distance de course. Cependant, Frederick ne donnait aucune signification physiologique à ce facteur «*f*» qu'il considérait comme étant une association complexe de facteurs physiologiques, psychologiques et morphologiques. En outre, après avoir examiné l'effet de l'entraînement sur la valeur de *f*, il constatait que sa diminution était faible en dépit d'un entraînement conséquent et d'une amélioration notoire des performances. L'entraînement et l'amélioration des performances se traduisaient plutôt par une élévation de la droite vers de plus hautes puissances (vitesses) sans que la pente n'en soit modifiée.

Harman [23], en 1987, avait également proposé un index d'endurance (sur bicyclette ergométrique) calculé à partir de la différence entre la relation temps-puissance absolue (en watts) et temps puissance relative (en pourcentage de la puissance maximale). À partir de la relation temps (minutes)-puissance absolue de l'exercice (en W), Harman construisait la relation temps en minutes-puissance relative de l'exercice (en pourcentage de la puissance maximale définie par la puissance maximale atteinte lors d'un tour de pédale).

En superposant les courbes individuelles de la relation temps (minutes)-puissance relative maximale, il remarquait que la congruence des courbes était simi-

laire entre les sujets. Ainsi, en partant de l'hypothèse que les courbes individuelles seraient superposables (et donc comparables) si une échelle des abscisses (puissance) appelée la «puissance mise à l'échelle» (*scaled power*) pouvait être commune, on pouvait permettre de comparer l'endurance des sujets en dépit de la différence absolue des puissances absolues. Il considérait le point de départ étant la puissance maximale soutenue (par définition) une seconde comme étant le point 100 %. À partir de ce point, il établissait un facteur de compression ou d'expansion de l'échelle de l'abscisse (puissance) par le facteur F qui est le facteur de correction individuel pour passer de l'échelle d'abscisse en puissance absolue à celle de puissance relative par l'équation :

$$P_{sc} = 100 - F(100 - P_{pmax})$$

où P_{sc} est la puissance exprimée en pourcentage de la puissance maximale, F le facteur d'échelle individuelle et, enfin, P_{pmax} est la puissance exprimée en pourcentage de la puissance individuelle maximale.

Ainsi pour $P_{pmax} = 100$ ou pour $F = 1$, on a $P_{sc} = P_{pmax}$ lorsque P_{pmax} est inférieure à 100, si F est supérieur à 1 alors P_{sc} est inférieure à P_{pmax} ; enfin si F est inférieur à 1, alors P_{sc} est supérieure à P_{pmax} . Ainsi, un facteur d'échelle F (*scaling factor*) supérieur à 1 étirait la courbe d'endurance (temps versus P_{sc}) d'un sujet vers la gauche, alors qu'une valeur de F inférieure à 1 comprimait la courbe d'endurance vers la droite. Ainsi, tout sujet qui aurait un facteur F supérieur à 1 était capable, pour une même durée d'exercice (un même temps t), de soutenir un pourcentage de la puissance maximale (P_{max}) supérieure à la moyenne des sujets observés. Au contraire, un sujet dont le facteur F est inférieur à 1 aurait une endurance moindre, n'étant capable de soutenir qu'un pourcentage de P_{max} inférieur à la moyenne des sujets. Utilisant la courbe d'endurance (temps versus P_{sc} , un programme d'ajustement de courbe donne une équation de la forme :

$$T = a(P_{sc})^b$$

où T est le temps d'endurance (minute), a et b des constantes sélectionnées par le programme d'ajustement de courbe (méthode de Kolb, donné dans Harman et al. [23]) et P_{sc} l'échelle de puissance (pourcentage de la puissance maximale). Ainsi, Harman et al. [23] remarquent que la moyenne des sujets (15 hommes jeunes faisant régulièrement des activités physiques) est capable de soutenir 5 minutes une puissance égale à 45 % de la puissance maximale. On peut estimer que 45 % de la puissance maximale correspond à peu près (ou est légèrement supérieure) à la puissance maximale aérobie pour cette population non spécialisée, ce qui est en accord avec les données des autres modèles.

MODÈLES DE LA RELATION ENTRE TEMPS ET FRACTION D'UTILISATION DE LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE

La capacité d'utiliser la plus haute fraction (F) de $\dot{V}O_{2max}$ sur une durée donnée (utilisée par di Prampero) ou encore la pente (cf. l'index d'endurance de Péronnet et Thibault) de la relation temps-pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ sont deux définitions de l'endurance que nous allons envisager dans cette partie. L'intérêt de telles approches permettent de donner une valeur à ce terme «d'endurance», largement utilisé dans les milieux sportifs.

Dans les années 1980, di Prampero [12, 14], dans le cadre de ses études concernant l'énergétique de la locomotion humaine, mit en équation la relation entre la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ et la durée d'exercice en course à pied. Il définit alors l'endurance comme étant directement en rapport avec cette fraction d'utilisation de la consommation maximale d'oxygène sur un temps de course donné. Cette approche est semblable à celle de Péronnet et Thibault [44, 45], que nous allons considérer ultérieurement dans les modèles physiologiques. Plus cette fraction est élevée, plus l'endurance du sujet est grande. Il décrit plusieurs équations pour différentes populations et pour des durées d'exercices (T) comprises entre 80 et 240 minutes :

- pour les coureurs amateurs, $F = 0.905 - 0.00091 \times T$;
- pour les athlètes féminines, $F = 1.00 - 0.050 \times \ln(0.14 \times T)$;
- pour les athlètes masculins, $F = 1.00 - 0.056 \times \ln(0.14 \times T)$.

Où F est la fraction moyenne de $\dot{V}O_{2max}$ qui peut être maintenue sur la durée de l'exercice et T la durée d'exercice en minutes. Ainsi, si l'on prend pour exemple le marathon, des coureurs amateurs qui le courent en 4 heures (240 minutes) pourront seulement utiliser 68,6 % (0,686) de leur consommation maximale d'oxygène, alors que des coureuses et coureurs confirmés terminant respectivement cette épreuve en 2 heures 40 minutes et en 2 heures 20 minutes pourront mobiliser 84,4 et 83,3 % de leur $\dot{V}O_{2max}$.

Si l'on prend pour référence la même durée d'exercice pour deux coureurs, par exemple 1 heure (60 minutes), on peut constater que les coureuses sont plus endurantes que les coureurs puisque, d'après di Prampero, elles seront alors capables de mobiliser 89,4 % $\dot{V}O_{2max}$ contre 88,0 % de leur consommation maximale d'oxygène $\dot{V}O_{2max}$. La différence de vitesse moyenne record de l'heure entre les deux sexes serait due essentiellement à la différence de $\dot{V}O_{2max}$. Si l'on considère la meilleure performance mondiale masculine sur marathon (2 heures 6 minutes 50 secondes), on peut alors s'apercevoir que pour cette durée de course, selon di Prampero, le coureur aura une fraction d'utilisation de $\dot{V}O_{2max}$ égale à 83,89 % de $\dot{V}O_{2max}$ ($F = 0,839$). Si l'on se réfère à un coût énergé-

tique brut (la consommation d'oxygène de repos n'est pas soustraite de la consommation d'oxygène totale en course) de la course plutôt bas (ce qui caractérise la foulée des marathonien), de l'ordre de $0,190 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ [13], on peut dès lors calculer la consommation maximale d'oxygène nécessaire pour accomplir cette meilleure performance mondiale sur les 42,195 km, en posant l'équation (di Prampero):

$$\text{vitesse marathon} = F \dot{V}\text{O}_{2\text{max}} / \text{CE}$$

où la vitesse marathon est en $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$, F une fraction (grandeur sans unité), $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ la consommation maximale d'oxygène relative au poids de corps ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) et CE le coût énergétique brut ($\text{mL}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$), mais en fait, plus précisément, on pourrait dire le coût en oxygène. Le coût en oxygène permet d'apprécier le coût énergétique à condition que toute la dépense énergétique soit couverte par le métabolisme aérobie (pour un quotient respiratoire de 0,96 l'équivalent énergétique d'un litre d'oxygène consommé est de 21 kJ). Pour les disciplines de plus de 30 minutes, la part du métabolisme anaérobie est négligeable pour le calcul du coût énergétique de la course. Cela ne signifie pas que sur un 10 000 m couru en 30 minutes, le métabolisme anaérobie ne soit pas déterminant pour le classement final, surtout si l'on en juge l'augmentation de la vitesse de course dans le dernier 400 m.

$$\begin{aligned} \text{vitesse marathon} &= 334,8 \text{ m/min} = 0,839 \dot{V}\text{O}_{2\text{max}} \\ &(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}) / 0,190 (\text{mL}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}) \\ 0,839 \dot{V}\text{O}_{2\text{max}} (\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}) &= 334,8 \times 0,190 = 63,612 \\ \dot{V}\text{O}_{2\text{max}} (\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}) &= 63,612 / 0,839 \\ &= 76 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

Cette valeur de consommation maximale d'oxygène est très proche de la valeur réelle que possédait, à l'époque, le détenteur de la meilleure performance mondiale de la distance (Arturo Barrios [46]).

L'intérêt de l'équation de di Prampero est d'établir le lien entre la performance (la vitesse de course) et les trois facteurs de la performance sur longues distances (F , CE et $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$) que doivent analyser les entraîneurs pour orienter l'entraînement. Le temps est alors implicitement contenu dans le facteur « F » (qui diminue alors que le temps de course s'allonge).

Péronnet et Thibault [44] élaborèrent, en 1987, un «indice d'endurance» (IE) qui fut utilisé par la suite dans le cadre de leur modèle physiologique (cf. supra). Cet indice est en fait la pente de la relation entre la fraction d'utilisation de la consommation maximale d'oxygène (F en pourcentage $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$) et le temps d'exercice. À la différence de di Prampero qui donne des valeurs standard de F en fonction de la durée de l'exercice pour différents profil de sujet, l'index d'endurance donne une valeur précise de l'endurance du sujet, définie alors comme étant la capacité de mobiliser la plus haute frac-

tion de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ le plus longtemps possible. L'objectif de ces deux approches est différent: en effet di Prampero avait pour problématique d'estimer le coût énergétique de la locomotion avec la nécessité d'estimer la consommation d'oxygène totale sur une distance de course, alors que Péronnet et Thibault, par l'approche de l'endurance, avait estimé de façon fine les records en course à pied du 60 m par rapport au marathon. L'index d'endurance est donc défini par la pente de la relation: fraction (%) d'utilisation de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ -temps (en secondes et logarithme népérien). La valeur de l'index d'endurance est négative, car il s'agit d'une perte de vitesse et d'une diminution de la fraction d'utilisation de la consommation maximale d'oxygène en fonction du temps. L'équation suivante permet de calculer l'index d'endurance [44]:

$$\text{IE} = (100 - \% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}) / (\text{Ln} 7 - \text{Ln} t)$$

où $\% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est la fraction d'utilisation de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$, t le temps de course en minutes et $\text{Ln} 7$ le logarithme népérien de 7 (la durée de 7 minutes étant considérée par les auteurs comme le temps limite moyen de soutien de 100 % de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$). L'équation précédente peut s'écrire:

$$\% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}} = 100 - \text{IE} \times (\text{Ln} (t/7))$$

Or un septième de minute ($t/7$) est presque égal (0,1428) à 0,14 valeur utilisée par di Prampero que nous avons présenté précédemment et qui était pour les athlètes féminines par exemple:

$$F = 1 - 0,05 \times \text{Ln} (0,14 t) = \% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$$

L'index calculé à partir des records du monde des hommes et des femmes sont respectivement de $-5,05$ et $-4,65 \% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}} \times \text{Ln} t^{-1}$. Les meilleurs marathonien mobilisent environ 85 % de leur $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ sur les 42,195 km. Comme le temps limite à $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ est variable au sein d'un groupe de coureurs ayant pourtant des valeurs de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ homogènes (de 4 à 11 minutes) [2], il est préférable d'utiliser le temps limite du sujet (et non plus une valeur fixe de 7 minutes). Par exemple, un coureur capable de consommer 100 % de sa consommation maximale d'oxygène pendant 6 minutes (360 secondes) et 94 % de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ pendant 15 minutes et 57 secondes (957,85 secondes) aura un index d'endurance de $-6,31$ ($100 - 94 / \text{Ln} 360 \text{ s} - \text{Ln} 957,85 = 6 / 5,886 - 6,864 = 6 / -0,9786 = -6,131$). Sans avoir aucun moyen d'évaluer la consommation d'oxygène, l'index d'endurance peut être calculé en prenant pour référence le temps de soutien de la vitesse maximale aérobie (de 100 à 80 %). Les valeurs de référence (tableau II) peuvent être utilisées par l'entraîneur afin de constater l'équilibre entre la puissance et l'endurance aérobie du sportif qu'il suit [1].

Nous pouvons donc déjà constater que ces modèles empiriques fournissent des outils pour mesurer l'endurance d'un sportif. Afin de pouvoir analyser les facteurs physiologiques

Tableau II. Valeurs de référence des indices physiologiques de l'aptitude aérobie et anaérobie lactique.

Notation	Nbre de points (1 à 10)	Index d'endurance*	Seuil lactique (% $\dot{V}O_{2max}$)	$\dot{V}O_{2max}$ (mL/min/kg)		lim $\dot{V}O_{2max}$ (min)	DMOA (mL/kg)
				Hommes	Femmes		
Excellent	10	3	88-90	85-88	75-78	9	75
Très bon	8	4	85-87	80-84	70-74	8	70
Bon	6	5-6	80-84	75-79	65-69	7	65
Moyen	4	7-8	76-79	70-74	60-64	6	60
Très moyen	2	9-10	70-75	65-69	55-59	5	55
Mauvais	1	11 et plus	75-79	60-64	50-54	4	50

Il est important de noter que chaque indice n'est pas corrélé aux autres; ainsi un sportif qui a un $\dot{V}O_{2max}$ de 88 mL/min/kg n'a pas systématiquement un temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ de 9 minutes (au contraire les hautes puissances maximales aérobies sont souvent associées à des valeurs basses de temps limites) [3]. DMOA est le déficit maximal d'oxygène accumulé; tlim est le temps limite. * Valeurs absolues Tableau tiré de l'ouvrage «Physiologie et méthodologie de l'entraînement sportif», Billat, sous presse.

discriminants de cette endurance et de la performance résultant sur une distance de course, les physiologistes ont attribué des significations aux paramètres des équations de la relation liant la vitesse et la durée d'exercice.

MODÈLES THÉORIQUES DE LA RELATION PUISSANCE-TEMPS BASÉS SUR LES CARACTÉRISTIQUES BIOÉNERGÉTIQUES HUMAINES

En 1927, déjà, Hill [24] publiait dans son ouvrage «*Muscular movement in man*» une explication physiologique de la forme de cette relation vitesse-temps mise en évidence par Kennelly. Il publia cette équation :

$$V = S / (tB) + (R - A) / B$$

où V est la vitesse, S la capacité énergétique (S comme *stock*), t est le temps de course et R le débit d'énergie au cours de l'exercice. A et B sont des paramètres dépendant des caractéristiques physiologiques du coureur : « A » étant la consommation d'oxygène de repos et « B », le débit d'énergie pour une vitesse donnée, exprimé en équivalent d'oxygène à une vitesse donnée (soit l'économie de course selon la définition de Daniels et al. [11]). Pour les courtes distances (limites non précisées), « S » est petit et « R » large; pour les longues distances, « S » est plus grand et « R » plus petit. Ce modèle de Hill fut repris ultérieurement par Llyod [34].

Dès 1954, Henry [26], commentant les travaux de Lietzke (cf. supra), essayait d'introduire un début d'explication physiologique concernant les ruptures de pente de la relation vitesse-temps décrite précédemment. Il évoqua l'épuisement des réserves disponibles pour leur transformation en énergie mécanique, réserves que renouvellent en fonction de la durée de l'exercice, les métabolismes anaérobie alactique et lactique ainsi que le métabolisme aérobie. Proposant une explication plus physiologique de la perte de vitesse en fonction du temps, Henry [26] affectait alors une constante « a » à

chaque partie de la courbe générale de la relation vitesse-temps selon une double échelle logarithmique :

$$dy/dt = a_1 e^{-k_1 t} + a_2 e^{-k_2 t} + a_3 e^{-k_3 t} + a_4 e^{-k_4 t} + a_5 e^{-k_5 t}$$

où dy/dt représente la vitesse (dérivée de la distance y par le temps t) et « a » un débit d'énergie traduit par une pente de vitesse due à la déplétion des réserves énergétiques (a_1 pour le métabolisme anaérobie alactique et les réserves de phosphocréatine; a_2 pour le métabolisme anaérobie lactique; a_3 [2,96], a_4 [3,54] et a_5 pour le métabolisme aérobie et les réserves de glycogène, lipidiques et protéiques). Le facteur a_1 est négligeable car les protéines sont peu mises en jeu dans le métabolisme énergétique.

Dans ces mêmes années, Scherrer et al. [50] étudiaient l'influence de la charge et de la fréquence imposées au travail musculaire dynamique local, pour préciser «quelques règles valables pour un travail musculaire de l'homme». La mesure d'un «seuil d'épuisement local» ou de «puissance critique» était alors fondée sur la constatation d'une relation simple reliant le travail limite et le temps limite. Ils l'énonçaient ainsi : «Lorsque l'on fait effectuer à un muscle, un travail dynamique poussé jusqu'au seuil d'épuisement, on constate que la durée de ce travail (tlim) et le travail effectué (Wlim) diminuent selon la puissance à laquelle se réalise ce travail. La relation entre le travail et le temps limite, pour des épreuves effectuées à différentes puissances, est en première approximation linéaire». Cette relation se formule par l'équation :

$$W_{lim} = a + b t_{lim}$$

où a et b sont des constantes.

Ce modèle reste l'un des plus précis pour prédire des temps limite pour des pourcentages donnés de la puissance maximale aérobie (de 90 à 120 %) [8].

Dans les années 1960, puis 1980, Wilkie [56, 57] mettait au point un modèle physiologique qui prenait en compte l'inertie des métabolismes énergétiques en posant le modèle suivant :

$$W_{max} = A t_e^{-1} + B - B k^{-1} (1 - e^{-k t_e}) t_e^{-1}$$

où A est la quantité d'énergie maximale fournie par les métabolismes anaérobies (alactique et lactique) et B la puissance métabolique aérobie maximale (correspondant à $\dot{V}O_{2\max}$); k est l'inverse d'une constante de temps à laquelle $\dot{V}O_{2\max}$ est atteinte (égale à $0,1 \text{ s}^{-1}$); $(1 - e^{-kte})te^{-1}$ représente le fait que $\dot{V}O_{2\max}$ ne peut être instantanément atteint dès le début de l'exercice; t est la durée de l'exercice considéré. Ce modèle fut repris notamment par di Prampero ultérieurement (cf. supra).

Ettema [15] soulignait alors le fait que, par l'équation de Frederick [18], les performances sur courtes distances étaient surestimées lorsqu'elles étaient calculées à partir de points sur longues distances. Plutôt qu'une relation vitesse-temps, il proposait alors une relation distance-tlim:

$$D = a + b \cdot t_{\text{lim}}$$

où tlim est le temps limite; a est assimilé à une réserve de distance en mètres qu'il est possible de parcourir sur les réserves d'oxygène et l'énergie fournie par les métabolismes anaérobies et b est la vitesse maximale (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) compatible avec la reconstitution de ces réserves par les métabolismes aérobie. Ettema rapporta la similitude de son équation avec celle élaborée par Scherrer et Monod [51] pour le travail dynamique local d'un groupe musculaire. De l'équation précédente Ettema tirait:

$$t_{\text{lim}} = a / V - b$$

où V est la vitesse en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, tlim le temps limite en secondes et a, b des constantes dont la valeur diffère en fonction de la partie de la courbe étudiée donc du temps limite considéré, des métabolismes énergétiques sollicités et du type de locomotion utilisée.

Ainsi, le temps limite à une vitesse considérée dépendrait de la différence entre cette vitesse et la vitesse maximale possible avec une reconstitution de l'énergie par oxydation, appelée la «vitesse critique» par Ettema, par extension aux travaux de Scherrer et Monod [51]. Ettema calcula les vitesses critiques (m/s) pour la natation, la course, le patinage et le cyclisme à partir des records mondiaux à la date de 1965. Il obtint ainsi les valeurs respectives à chacune de ces locomotions humaines de 1,43, 5,85, 10,6 et $13,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ces vitesses sont celles du record de l'heure pour la course, alors que celle du cyclisme est très en deçà. Ettema n'avait peut-être pas suffisamment pris en compte la composante aérodynamique du coût énergétique du cyclisme, qui compte pour 90 % du coût énergétique de ce type de déplacement (contre 10 % en course à pied jusqu'à 20 km/h selon Pugh [48]). Les valeurs du coefficient «a» calculées par Ettema pour la natation, la course, le patinage et le cyclisme à partir des records du mondiaux sont respectivement de 40, 240, 180 et 200 m. Ettema concluait que les lois de la fatigue mises en évidence, à partir de la relation puissance-durée du déplacement, par

Kennelly [30] recouvraient en fait les mécanismes physiologiques de renouvellement de l'ATP. Si l'on assimile le muscle à un transformateur d'énergie chimique en énergie mécanique, on peut prendre cette conclusion comme une évidence.

On peut noter, pour les années 1970, le modèle d'endurance exponentiel de Gleser et Vogel [21]:

$$\log(t) = A \cdot L_r + B$$

où t est le temps en minutes, A et B des constantes; L_r est la charge relative (*relative load*), soit un travail imposé au sujet rapporté à la $\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{kpm}/\dot{V}O_{2\max}$). Bien que cette équation ait été établie de façon empirique, comme celle de Grosse-Lordemann et Müller [22], elle prenait en compte:

- le début d'accumulation lactique à des charges aussi basses que 50-60 % de $\dot{V}O_{2\max}$;
- l'accroissement moindre du débit cardiaque à partir du plafonnement du volume d'éjection systolique à environ 60 % de $\dot{V}O_{2\max}$;
- le glycogène musculaire épuisé pendant les courses de longues durées.

Cette équation prévaut pour les intensités d'exercice comprises entre 50 et 110 % de $\dot{V}O_{2\max}$. D'après ces auteurs [21], il était possible de comparer les sujets entre eux ou à eux-mêmes pour leurs suivis de l'entraînement grâce aux paramètres A et B. Ils montrèrent que l'augmentation de A était dépendante de celle de B et que la seule augmentation de $\dot{V}O_{2\max}$ ne pouvait affecter A et B.

Peu de temps après, Margaria et al. [36] publiaient un modèle physiologique permettant de prédire le temps nécessaire pour couvrir une distance en considérant que le coût énergétique de la course est indépendant de la vitesse entre 10 et $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, le coût énergétique de la course étant égal à $0,9 \text{ cal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ [35]. En effet, en dessous de cette zone, la foulée devient moins économe et marcher devient deux fois moins coûteux que courir pour couvrir la même distance; alors qu'au dessus de $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, ainsi que nous l'avons précédemment noté, le coût énergétique augmente avec le coût aérodynamique. De plus, ce modèle postule que pour 1 minute d'exercice maximal, l'énergie fournie par la glycolyse anaérobie est équivalente à celle fournie par les processus oxydatifs (le $\dot{V}O_{2\max}$); ainsi, selon Margaria [35], un athlète ayant un $\dot{V}O_{2\max}$ de $70 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ possède un déficit maximal d'oxygène accumulé de $70 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$. Cette estimation a été confirmée par Medbo et al. [40] qui ont réactualisé le concept de déficit d'oxygène comme un moyen de mesurer directement la capacité anaérobie; 1 litre d'oxygène (soit environ 21 kJ pour un quotient respiratoire de 0,96) non consommé étant fourni par le métabolisme anaérobie.

Ce modèle est le suivant:

$$m = 5 (\dot{V}O_{2\max} - 6) t + 5 \dot{V}O_{2\max}$$

où m est la distance maximale (en mètres) couverte dans le temps t (minutes) pour un $\dot{V}O_{2\max}$ donné ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$). Bien que l'équation originale soit sous la forme proposée ci-dessus, elle peut apparaître douteuse dans ses dimensions. En effet, le membre de droite de l'équation correspond à la différence d'une distance (triple produit d'un coût énergétique, d'un débit d'énergie et d'un temps) et d'une vitesse (produit d'un coût énergétique et d'un débit d'énergie). En fait, pour conserver une cohérence sur le plan dimensionnel, il convient d'écrire l'équation de Margaria sous cette forme :

$$m = 5 (\dot{V}O_{2\max} - 6) t + 5 \dot{V}O_{2\max} * k$$

où la valeur de la constante 5 correspond en fait au coût en oxygène de 1 mètre et où la valeur de k est égale à 1 minute.

En appliquant numériquement ce modèle, on peut calculer que si une athlète (demi-fondeuse de bon niveau) à un $\dot{V}O_{2\max}$ de $65,6 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, le temps prédit sur 3 000 m par cette équation est de 8 minutes 58 secondes.

En effet, on a alors :

$$3\,000 = 5 (65,6 - 6) t_{3000} + 5 \times 65,6 = 5 \times 59,6 \times t_{3000} + 328$$

$$3\,000 = 298 \times t_{3000} + 328$$

$$t_{3000} = (3\,000 - 328) / 298 = 8,97 \text{ min soit } 8 \text{ min } 58 \text{ s}$$

Ce temps sur 3 000 m correspond à une performance de niveau internationale réalisée par des coureuses possédant des consommations maximales d'oxygène très supérieures (au-delà de $70 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$). À l'inverse, pour une consommation maximale d'oxygène de $65,6 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ (caractérisant des coureuses de l'équipe de France des années 1980), on relève des performances sur 3 000 m comprises entre 9 minutes 10 secondes et 9 minutes 35 secondes [46]. L'optimisme de ce modèle peut provenir d'un coût énergétique sous-estimé pour ces vitesses de course. En examinant les paramètres de l'équation du modèle, Margaria et al. [36] précisèrent toutefois que cette équation pouvait être modifiée selon l'état nutritionnel du sujet, le coût énergétique de sa course et sa capacité à maintenir son $\dot{V}O_{2\max}$ tout au long de l'épreuve.

Au début des années 1980, Moritani et al. [42] reprenaient le modèle de Scherrer et Monod [51] concernant le travail dynamique local et l'ont appliqué et validé pour un exercice général supramaximal réalisé sur ergocycle. Moritani et al. constatèrent que la puissance critique (80 % de la puissance maximale aérobie) était hautement corrélée et proche de la puissance d'exercice correspondant au « seuil anaérobie » (ventilatoire). De plus, la puissance critique était d'autant plus abaissée que l'hypoxie était marquée (la valeur du paramètre « a » n'étant pas modifiée). Cela confirmant l'hypothèse selon laquelle « a » représentait la réserve d'énergie

anaérobie. À partir de ces résultats, on pouvait donc écrire :

$$W_{\text{lim}} = a + b \cdot t_{\text{lim}} = A_{\text{MAX}} + S_{\text{VENT}} t_{\text{lim}}$$

où S_{VENT} est la puissance correspondant au seuil anaérobie ventilatoire et A_{MAX} la capacité maximale anaérobie.

Cependant, Housh et al. [27] montrèrent, plus tard, que la puissance critique ne pouvait être maintenue au-delà de 30 minutes (chez des sujets moyennement entraînés). Par ailleurs, au plan théorique, le lien entre la puissance critique et le seuil anaérobie n'était pas évident si la puissance critique était déterminée à partir d'exercices dont la puissance est supérieure à la puissance maximale aérobie d'une durée inférieure à 4 minutes.

En 1988, Camus et al. [9] établirent une relation inverse entre l'intensité d'exercice supramaximale (exprimé en pourcentage de la consommation d'oxygène) et le temps d'exercice (temps limite). Ils considérèrent que le temps pouvait être prédit par l'intensité d'exercice exprimée en fonction de sa différence avec $\dot{V}O_{2\max}$ ($\dot{E}_{\text{ox}}^{\text{max}}$) selon l'équation :

$$t_{\text{lim}} = a \times \exp [-b (\dot{E} - \dot{E}_{\text{ox}}^{\text{max}})]$$

où t_{lim} est exprimé en secondes, \dot{E} et $\dot{E}_{\text{ox}}^{\text{max}}$ sont respectivement la puissance (débit d'énergie) considérée et la puissance maximale aérobie (puissance maximale atteinte par le métabolisme aérobie appelé « ox » comme oxydatif) et sont exprimés en W/kg de poids corporel. « a » est le temps limite à $\dot{V}O_{2\max}$ et « b » est le délai d'atteinte de $\dot{V}O_2$ à $\dot{V}O_{2\max}$ et sont respectivement égal à 330,8 et 0,14 secondes. Ce modèle a été mis au point sur bicyclette ergométrique, difficilement transférable à la course à pied, sauf concernant le temps limite à $\dot{V}O_{2\max}$. En effet, si on considère une puissance « E » qui est la puissance maximale aérobie ($\dot{E}_{\text{ox}}^{\text{max}}$), on obtient la valeur de l'exponentielle égale à 1 (puisque \dot{E} et $\dot{E}_{\text{ox}}^{\text{max}} = 0$ et $\exp 0 = 1$ alors $t_{\text{lim}} = a = 330,8$ secondes).

Ces résultats montrent clairement que plus $\dot{V}O_{2\max}$ est élevé, plus le temps limite à une intensité supramaximale donnée est important.

Enfin, le modèle décrivant et expliquant le mieux la relation temps-vitesse de course est celui de Péronnet et Thibault [45]. De même qu'Ettema [15], ces auteurs considérèrent qu'il était possible d'établir, ainsi que nous l'avions constaté empiriquement au début de cet exposé, des relations entre les temps, les distances et les vitesses à partir des records masculins mondiaux pour des activités de type cycliques (du 60 m au marathon). Ce modèle est fondé sur les travaux de Llyod [34]. Cependant, davantage qu'une description, simple formulation mathématique, entre la vitesse de course et la distance au moyen d'une somme de fonctions exponentielles, le modèle de Péronnet et Thibault [44, 45] tente d'expliquer les records sur des distances les plus courtes aux plus longues (du 60 m au marathon) à partir de considé-

rations physiologiques. Ce modèle explicatif est fondé sur les connaissances actuelles des capacités maximales des différents métabolismes.

Dans ce modèle, la quantité de travail effectué au moment de l'épuisement est égale à la somme du travail dont l'énergie est fournie par le métabolisme anaérobie et aérobie. Soit «Amax» l'équivalent en travail de la capacité maximale anaérobie (quantité maximale d'énergie pouvant être fournie à partir du métabolisme anaérobie), la quantité totale de travail produit grâce au métabolisme anaérobie «A» est inférieure à «Amax» pour les exercices très courts et très longs. En effet, pour les exercices très courts (moins de 30 secondes), il n'est pas possible d'épuiser les réserves d'énergie d'origine anaérobies. Dans le modèle de Péronnet et Thibault, l'énergie anaérobie disponible lors d'exercices supra-maximaux de très courtes durées «A» est donnée par la formule suivante :

$$A = A_{\max} (1 - e^{-t_{\text{lim}}/k_a})$$

où k_a représente la constante de temps de l'utilisation de ces réserves anaérobies. La valeur de k_a étant de l'ordre de 20 secondes, A est très proche de «Amax» pour un temps limite (tlim) égal à 1 minute.

Péronnet et Thibault proposent l'équation suivante entre tlim et la quantité d'énergie anaérobie disponible pour les exercices d'une durée supérieure à 7 minutes (estimation de la valeur moyenne du temps limite à la puissance maximale aérobie [PMA]):

$$A = A_{\max} [1 + f \ln(t_{\text{lim}}/t_{\text{PMA}})]$$

où f, dont la valeur est négative, est le taux de décroissance de A avec le logarithme népérien (ln) du temps limite (tlim).

Ainsi :

$$A = A_{\max} (1 - e^{-t_{\text{lim}}/k_a}) \text{ pour } t_{\text{lim}} < t_{\text{lim PMA}}$$

$$A = A_{\max} [1 + f \ln(t_{\text{lim}}/t_{\text{PMA}})] \text{ pour } t_{\text{lim}} > t_{\text{lim PMA}}$$

Concernant le métabolisme aérobie, ce modèle tient compte de deux faits : d'une part que le métabolisme oxydatif n'atteint pas son débit maximal de façon instantanée et, d'autre part, que la valeur du plateau de consommation d'oxygène est d'autant plus basse que la durée de l'exercice épuisant est prolongée.

Pour les exercices de courte durée ($t_{\text{lim}} < t_{\text{PMA}}$), la valeur du plateau de consommation d'oxygène est supposée égale à $\dot{V}O_{2\max}$ et la valeur de la puissance aérobie à l'instant t est donnée par l'équation suivante :

$$P_{\text{aérobie}} = PMA (1 - e^{-t_{\text{lim}}/k_b})$$

où k_b représente la constante de temps du métabolisme aérobie (de l'ordre de 30 secondes). La décroissance de la valeur du plateau de puissance aérobie plateau (P plateau) en fonction de tlim pour les exercices épuisant les

sujets en un temps supérieur à tlim PMA est donnée par l'équation suivante :

Pour $t_{\text{lim}} > t_{\text{lim PMA}}$ on a :

$$P_{\text{plateau}} = PMA + E [\ln(t_{\text{lim}}/t_{\text{lim PMA}})]$$

$$P_{\text{plateau}} = PMA + E [\ln(t_{\text{lim}}) - \ln(t_{\text{lim PMA}})]$$

où E représente le taux de décroissance du pourcentage de la consommation maximale d'oxygène. La valeur de E (négative) est considérée comme un indice d'endurance aérobie.

En résumé, Péronnet et Thibault ont formulé un modèle très complet sur le plan physiologique, celui-ci permettant de prédire les records du monde du 60 m au marathon.

Pour cela, ils prennent en compte d'une part la diminution de la quantité d'énergie provenant du métabolisme anaérobie lors d'exercices prolongés et, d'autre part, l'impossibilité de maintenir longtemps la puissance maximale aérobie (durée qu'ils n'avaient d'ailleurs pas réellement mesurée). Ces auteurs supposent :

– que la vitesse correspondant à la puissance maximale aérobie pouvait être maintenue pendant un temps limite de 7 minutes (tlim PMA), en s'appuyant sur les données de la littérature ;

– que la puissance d'origine aérobie utilisable pendant la durée tlim (P plateau) décroissait de façon logarithmique pour tlim supérieur à 7 minutes.

$$P_{\text{plateau}} = PMA + PMA \cdot S_1 \cdot \ln(tr) = PMA \cdot (1 + S_1 \cdot \ln(tr))$$

où « S_1 » est une constante négative et tr la valeur de tlim exprimée en multiple de la durée maximale de maintien de la puissance maximale aérobie (tPMA) c'est-à-dire un multiple de 7 minutes. Pour tlim égal à 7 minutes (420 secondes) tr vaut 1, ln (tr) vaut 0 et P plateau est égal à PMA. Le produit $PMA \cdot S_1$ est l'équivalent de l'indice E : indice d'endurance de Péronnet qui permettrait d'apprécier l'endurance du sujet : c'est-à-dire sa capacité à utiliser la plus grande fraction de $\dot{V}O_{2\max}$ le plus longtemps possible. Les meilleurs marathoniens mobilisent environ 85 % de leur $\dot{V}O_{2\max}$ sur les 42,195 km du marathon. Ainsi, à l'image de ce que Vogel et al. avaient amorcé en 1973, Péronnet et Thibault donnent une méthode de calcul de l'endurance humaine.

La même année, di Prampero [14] reformula l'équation de Wilkie [57] décrite précédemment. La puissance métabolique maximale était calculée de la façon suivante :

$$\dot{E}_{\max} = AnS e^{-l} + MAP - MAP k^{-l} (1 - e^{-k t e}) t e^{-l}$$

où \dot{E}_{\max} est la puissance métabolique maximale, AnS la quantité d'énergie maximale fournie par les métabolismes anaérobies (alactique et lactique) et MAP la puissance métabolique aérobie maximale (correspondant à $\dot{V}O_{2\max}$) ; k est une constante de temps à laquelle $\dot{V}O_{2\max}$

est atteinte (égale à $0,1 \text{ s}^{-1}$) et t est la durée de l'exercice considérée.

Di Prampero [12] avait décrit également l'énergie par unité de temps nécessaire pour la locomotion :

$$Er = CV$$

où Er est la puissance mécanique requise pour se déplacer à la vitesse V et C le coût énergétique de la locomotion.

Son modèle fut validé de deux façons. Premièrement, ses résultats indiquent que Er et E_{max} étaient très corrélés. Deuxièmement, sur la base de caractéristiques bioénergétiques connues ou estimées (MAP, AnS...), il obtint ainsi des temps prédits respectivement égaux à 100,2; 89,2; 91,5 % des records de l'époque (1987 et 1989) en course à pied, patinage et nage libre. Ce modèle s'applique pour des durées d'exercice comprises entre 90 secondes et 30 minutes puisque ce modèle suppose une utilisation complète de la capacité anaérobie (d'où T supérieur à 90 secondes; 400–800 m en course à pied pour un champion), et qu'il n'intègre pas la diminution de la puissance maximale aérobie pour des durées d'exercice supérieures au $tlim$ à $\dot{V}O_{2max}$ (d'où T inférieur à 30 minutes) car di Prampero pensait à l'époque que le temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ était de 20 à 30 minutes (il est en fait beaucoup plus faible, ainsi que nous l'avons vu précédemment).

PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION DE LA MODÉLISATION DE L'ENDURANCE HUMAINE: NOUVEAUX PARAMÈTRES PHYSIOLOGIQUES À PRENDRE EN COMPTE

Dans l'estimation de la fraction d'utilisation de la consommation maximale d'oxygène atteinte en plateau pour une certaine durée d'exercice, la prise en compte des effets de la composante lente de $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2 \text{ slow component}}$), mise en évidence dès 1972 par Whipp et Wasserman [53] pour des exercices dont la puissance est supérieure à la puissance au seuil anaérobie, apparaît un développement utile des modèles futurs. En effet, pour les exercices inférieurs ou égaux au seuil anaérobie, un $\dot{V}O_{2max}$ additionnel apparaît au bout de 1 heure et plus d'exercice ($\dot{V}O_2 \text{ drift}$). Gaesser et Poole [20] rappellent la différence entre ces deux grandeurs de consommation d'oxygène additionnelles en fonction du temps. La composante lente de $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2 \text{ slow component}}$) serait due au travail musculaire périphérique (à 86 % selon Poole et al. [47]), avec notamment le recrutement des fibres rapides (la composante lente est supérieure pour des sujets ayant un pourcentage de fibres rapides important). Cette composante lente conduirait inexorablement à la valeur de $\dot{V}O_{2max}$ et donc à la fatigue imminente objectivée par l'arrêt de l'exercice [54]. En revanche, la dérive de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2 \text{ drift}$) serait due à des adaptations thermoré-

gulatoires, avec notamment l'augmentation du débit sanguin cutané. Ainsi, la composante lente de la cinétique de $\dot{V}O_2$ apparaît pour des exercices de durée de l'ordre de 8 à 15 minutes et concerne des intensités entraînant une accumulation d'acide lactique, alors que la dérive de $\dot{V}O_2$ se développe lors d'exercices plus longs, avec une augmentation marquée de la température corporelle. Il faut cependant souligner que la plupart de ces études qui ont mis en évidence la composante lente de $\dot{V}O_2$ ont été réalisées en utilisant des exercices de pédalage. Or, récemment, Billat et al. [6] ont montré que, pour la course à pied, des triathlètes avaient une composante lente cinq à dix fois inférieure à celle obtenue lors d'un exercice de pédalage à la même puissance relative (puissance intermédiaire entre la puissance au seuil lactique et la puissance associée à $\dot{V}O_{2max}$) [5]. Cependant, pour des coureurs moins entraînés (ayant un $\dot{V}O_{2max}$ inférieur à $60 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), on observe ce phénomène d'augmentation de la consommation d'oxygène au-delà de 3 minutes d'exercice pour des vitesses constantes supérieures à leur vitesse au seuil lactique.

Quoi qu'il en soit, il paraît improbable d'être en mesure de prévoir la valeur de la consommation d'oxygène en fin d'exercice à partir du modèle de Péronnet et Thibault [45]. De plus, les valeurs de temps limite à puissance maximale aérobie sont très variables entre les sujets, pourtant homogènes quant à leur valeur de $\dot{V}O_{2max}$: de 4 à 11 minutes [2] avec un coefficient de variation de 25 % contre 5 % pour $\dot{V}O_{2max}$. Cette variabilité interindividuelle de l'endurance à 100 % de $v\dot{V}O_{2max}$ peut être expliquée par le modèle de Monod et Scherrer [41] modifié par Ettema [15] alimenté par les données expérimentales que nous avons obtenus ces 5 dernières années [4,6]. En reprenant l'équation de Ettema [15]: $tlim = a / V - b$, on a:

$$tlim = \frac{a}{v\dot{V}O_{2max} - F\dot{V}O_{2max}}$$

où $tlim$ est le temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ et $F\dot{V}O_{2max}$ la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ au seuil lactique

Dans ce modèle, la plus haute valeur du temps limite à $v\dot{V}O_{2max}$ est obtenue avec une haute valeur de «a» et/ou une valeur basse de «P – b» (qui est ici la différence entre $v\dot{V}O_{2max}$ et la puissance/vitesse critique). En effet, nous constatons [3] que les coureurs qui ont le plus grand temps limite à $v\dot{V}O_{2max}$ sont ceux qui ont la plus petite valeur de la différence entre $v\dot{V}O_{2max}$ et la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ au seuil lactique et donc, la plus petite valeur de $v\dot{V}O_{2max}$. En outre, Faina et al. [16] ont montré que de longs temps limites à $v\dot{V}O_{2max}$ étaient corrélés de façon positive au déficit d'oxygène accumulé pendant l'épreuve (à 100 % de $v\dot{V}O_{2max}$). Cela conforte le modèle de Monod et Scherrer puisque le numérateur «a» repré-

sente la valeur de la capacité anaérobie (distance ou quantité d'énergie qu'il est possible de couvrir ou dépenser sans avoir recours à la phosphorylation oxydative pour la resynthèse de l'ATP. Ainsi, un long temps limite à 100 % $\dot{V}O_{2max}$ peut être atteint par des coureurs de type «aérobie» (qui ont un dénominateur faible, c'est-à-dire un faible écart entre la vitesse au seuil lactique et la vitesse associée à $\dot{V}O_{2max}$) et par des coureurs de type «anaérobie» qui sont capables d'accumuler un déficit d'oxygène élevé.

Enfin, tout récemment, Morton [43] apporta une modification du modèle hyperbolique original de Monod et Scherrer [41]. Celle-ci permettait de prédire de façon plus fiable les puissances d'exercice correspondant à des temps limites inférieurs à 2 minutes ou supérieurs à 30 minutes. Le modèle comprend alors trois composantes (a, b et k):

$$t = a / (P - b) + k$$

où t est le temps d'exercice, «a» la réserve d'énergie anaérobie, P la puissance de l'exercice, «b» la puissance critique de l'exercice et k, mesurée en secondes, est la nouvelle position de l'asymptote horizontale du temps.

Morton [43] démontre que k est inférieur à 0, ce qui signifie que l'hyperbole croise le temps zéro à une valeur de puissance instantanée, maximale: $P^* = P_{max}$. Il est alors possible de paramétrer l'équation pour inclure P^* à la place de k, ce qui donne une signification à l'ensemble des paramètres de l'équation puisque «a» est l'énergie fournie par le métabolisme anaérobie, «b» est la puissance critique (proche de la puissance maximale d'état stable de la lactatémie déterminée selon le protocole de Chassain, selon Lechevalier et al. [31]) et P^* est la puissance maximale instantanée fournie à partir des réserves d'ATP. On obtient ainsi:

$$t = \frac{a}{P - b} + \frac{a}{P - P_{max}}$$

Les valeurs de «a» et de P_{max} obtenues selon ce modèle sont cohérentes avec les valeurs mesurées chez des cyclistes de même niveau ayant réalisé des tests de charge-vitesse. Cette approche permet, en outre, d'évaluer la puissance instantanée d'un sportif et ses qualités de détente et de force explosive par la valeur P_{max} . En outre, la puissance critique (b) calculée avec ce modèle à trois composantes (a, b et k) est inférieure à celle calculée par le modèle hyperbolique classique [51] et se rapproche alors davantage de la vitesse maximale d'état stable de la lactatémie [3]. Ce modèle est validé en course à pied et la valeur de P_{max} est environ supérieure de 2 m·s⁻¹ à la vitesse maximale obtenue sur une course de 20 m départ lancé (communication personnelle). À l'inverse, la valeur de «a» du modèle de Morton était

supérieure à celle calculée avec le modèle classique à deux composantes [51], ce qui est plus conforme aux valeurs de «a» estimée par Wilkie.

CONCLUSION

L'analyse de la relation liant la puissance d'un exercice avec sa durée limite, en prenant généralement pour référence les records du monde en course à pieds, a suscité différents modèles au cours du XX^e siècle. L'endurance peut être alors caractérisée par la pente de la relation puissance-temps [44,45] et non plus seulement par la plus haute intensité pouvant être développée en un temps donné ou la plus grande durée pouvant être effectuée à une intensité donnée.

L'examen de cette relation intensité-durée permet non seulement de comprendre les déterminants de l'endurance humaine, tels que ces modèles bioénergétiques ont tenté de le faire, mais également de conseiller un sportif dans le choix d'une distance de compétition, selon que ses temps records sont situés plus ou moins en dessous de la courbe des records mondiaux. Toutefois, il ne faut pas oublier d'intégrer son histoire (type d'entraînement pratiqué...).

La prédiction des records humains sur les distances futures de compétition semble possible grâce au modèle de Péronnet et Thibault [45], qui reste le plus performant actuellement du point de vue de l'appréhension des métabolismes et de la performance sportive. Toutefois, ce modèle postule comme invariant le temps limite à $\dot{V}O_{2max}$ (7 minutes), ce qui n'est pas le cas. Le tout récent modèle à trois composantes de Morton, qui a repris le modèle historique de Monod et Scherrer [41], permet de calculer une puissance maximale instantanée en plus de l'énergie anaérobie et de la puissance critique (proche de la puissance au seuil lactique).

RÉFÉRENCES

- 1 Billat V. Physiologie et méthodologie de l'entraînement sportif. Paris : De Boeck ; 1998.
- 2 Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux JC, Koralsztein JP. Reproducibility of running time to exhaustion at $\dot{V}O_{2max}$ in sub-elite runners. Med Sci Sports Exerc 1994a ; 26 : 254-7.
- 3 Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux JC, Koralsztein JP. Time to exhaustion at 100% of velocity at $\dot{V}O_{2max}$ and modelling of the time limit/velocity relationship in elite long distance runners. Eur J Appl Physiol 1994b ; 69 : 271-3.
- 4 Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux JC, Koralsztein JP. Speed and time to exhaustion at $\dot{V}O_{2max}$ contribution to long distance performance in sub-elite runners. Science et Motricité 1995 ; 27 : 40-50.
- 5 Billat V, Richard R, Binsse VM, Koralsztein JP, Haouzi P. The $\dot{V}O_2$ slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue. J Appl Physiol 1998 ; 85 : 2118-24.
- 6 Billat V, Beillot J, Rochcongar P, Carré F. Gender effect on the relationship of time limit at 100% $\dot{V}O_{2max}$ with other bioenergetics characteristics. Med Sci Sports Exerc 1996b ; 28 : 1049-55.

- 7 Billat V, Faina M, Sardella F, Marini C, Fanton F, Faccini P, et al. A comparison of time to exhaustion at $\dot{V}O_{2max}$ in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers, runners. *Ergonomics* 1996c ; 2 : 267-77.
- 8 Billat V, Blondel N, Berthoin S. The velocity associated with $\dot{V}O_{2max}$ for all supra critical run is the velocity which elicits the longest time to exhaustion at $\dot{V}O_{2max}$. *Eur J Appl Physiol* 1999 ; in press.
- 9 Camus G, Juchmès J, Thys H, Fossion A. Relation entre le temps limite et la consommation maximale d'oxygène dans la course supramaximale. *J Physiol (Paris)* 1988 ; 83 : 26-3.
- 10 Craig AB. Evaluation and predictions of world running and swimming records. *J Sports Med Phys Fitness* 1963 ; 3 : 14-21.
- 11 Daniels J, Scardina N, Hayes J, Foley P. Elite and subelite female middle middle- and long-distance runners. In: Landers DM, ed. *Sport and elite performers. Proceedings of the Olympic Scientific Congress, 1984. Champaign; Eugene Human Kinetics: 1986. p 57-72.*
- 12 di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 1986 ; 7 : 55-72.
- 13 di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC, Moi C. The energetic of endurance running. *Eur J Appl Physiol* 1986 ; 55 : 259-66.
- 14 di Prampero PE. Energetics of world records in human locomotion. In: Wieser, Gnaiger, eds. *Energy transformations in cells and organisms. Amsterdam: Elsevier; 1989. p 248-53.*
- 15 Ettema JH. Limits of human performance and energy-production. *Int Z angew Physiol einschl Arbeitsphysiol* 1966 ; 2 : 45-54.
- 16 Faina M, Billat V, Squadrone R, De Angelis M, Koralsztein JP, Dal Monte A. Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakers and swimmers. *Eur J Appl Physiol* 1997 ; 76 : 13-20.
- 17 Francis AW. Running records. *Science* 1943 ; 93 : 315-6.
- 18 Frederick WSF. Physiological aspects of human fatigue. *Arch Industr Health* 1959 ; 20 : 297-302.
- 19 Frederick. Statistical model of endurance in running. *Can J Appl Sport Sci* 1977 ; 2 : 127-32.
- 20 Gaesser GA, Poole D. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exercise Sport Sci Rev* 1996 ; 24 : 35-70.
- 21 Gleser MA, Vogel JA. Endurance capacity for prolonged exercise on the bicycle ergometer. *J Appl Physiol* 1973 ; 34 : 438-42.
- 22 Grosse-Lordemann H, Müller EA. Der einfluss der leistung und der arbeitgeschwindigkeit auf das arbeitsmaximum und den wirkungsgrad beim radfahren. *Arbeitsphysiol* 1937 ; 9 : 454-75.
- 23 Harman EA, Knuttgen HG, Frykman PN, Patton JF. Exercise endurance time as function of percent maximal power production. *Med Sci Sports Exercise* 1987 ; 19 : 480-5.
- 24 Hill AV. *Muscular movement in man. New York: Mc Graw Hill: 1992.*
- 25 Henry FM, Farmer DS. Condition ratings and endurance measures. *Res Q Am Assoc Health Phys Educ Recreat* 1949 ; 20 : 126-33.
- 26 Henry FM. Time-velocity equations and oxygen requirements of "all-out" and "steady-pace" running. *Res Q Am Assoc Health Phys Educ Recreat* 1954 ; 25 : 164-77.
- 27 Housh DJ, Housh TJ, Bauge SM. The accuracy of critical power test for predicting time to exhaustion during cycle ergometry. *Ergonomics* 1989 ; 32 : 997-1004.
- 28 Keller J.B. A theory of competitive running. *Physics Today* 1973 ; 26 : 42-7.
- 29 Kennelly AE. An approximate law of fatigue in the speeds of racing animals. *Proc Am Acad Arts Sci* 1906 ; 42 : 275-331.
- 30 Kennelly AE. An approximate law of fatigue in the speeds of racing animals. *Proc Am Acad Arts Sci* 1926 ; 61 : 487-510.
- 31 Lechevalier JM, Vandewalle H, Chatard JC, Moreaux A, Gandrieu V, Besson F, et al. Relationship between the 4 mMol running velocity, the time-distance relationship and the Leger-Boucher's test. *Arch Int Physiol Biochim* 1989 ; 97 : 355-60.
- 32 Lietzke MH. An analytical study of world and olympic racing records. *Science* 1954 ; 119 : 333-6.
- 33 Lietzke MH. Consistent set of running times. *Science* 1956 ; 124 : 178.
- 34 Llyod BB. The energetics of running: an analysis of world records. *Adv Sci* 1966 ; 22 : 515-30.
- 35 Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P, Sassi G. Energy cost of running. *J Appl Physiol* 1963 ; 18 : 367-70.
- 36 Margaria R, Aghemo P, Pinares Limas F. A simple relation between performance in running and maximal aerobic power. *J Appl Physiol* 1975 ; 38 : 351-2.
- 37 Meade GP. An analytical study of athletic records. *Sci Monthly* 1916 ; 2 : 596-600.
- 38 Meade GP. (No title available). New York University Alumnus, February 1934.
- 39 Meade GP. Consistent running records. *Science* 1956 ; 124 : 1025.
- 40 Medbo JJ, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O_2 deficit. *J Appl Physiol* 1988 ; 64 : 50-60.
- 41 Monod H, Scherrer J. The work capacity of synergy muscular groups. *Ergonomics* 1965 ; 8 : 329-38.
- 42 Moritani T, Nagata A, De Vries HA, Muro M. Critical power as a measure of physical working capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics* 1981 ; 24 : 339-50.
- 43 Morton RH. A 3-parameter critical power model. *Ergonomics* 1996 ; 39 : 611-9.
- 44 Péronnet F, Thibault G. Analyse physiologique de la performance en course à pied, révision du modèle hyperbolique. *J Physiol (Paris)* 1987 ; 82 : 52-60.
- 45 Péronnet F, Thibault G. Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol* 1989 ; 67 : 453-65.
- 46 Péronnet F, Thibault G, Ledoux M, Brisson GR. Le marathon. Paris : Vigot ; 1991. p 200-10.
- 47 Poole DC, Schaffartzik W, Knight DR, Derion T, Kennedy B, Guy HJ, et al. Contribution of exercising legs to the slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *J Appl Physiol* 1991 ; 71 : 1245-53.
- 48 Pugh LG. The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *J Physiol (London)* 1971 ; 213 : 255-76.
- 49 Ryder HW, Carr HJ, Herget P. Future performance in footracing. *Sci Am* 1976 ; 234 : 108-19.
- 50 Scherrer J, Samson M, Paléologue A. Étude du travail musculaire et de la fatigue. *J Physiol (Paris)* 1954 ; 46 : 887-916.
- 51 Scherrer J, Monod H. Le travail musculaire local et la fatigue chez l'homme. *J Physiol (Paris)* 1960 ; 52 : 419-501.
- 52 Tornvall G. Assessment of physical capabilities. *Acta Physiol Scand* 1963 ; 58 : Suppl 201.
- 53 Whipp BJ, Wasserman K. Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J Appl Physiol* 1972 ; 5 : 351-6.
- 54 Whipp BJ. The slow component of O_2 uptake kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exercise* 1994 ; 26 : 1319-26.
- 55 Whipp BJ, Ward SA. Will women soon out run men? *Nature* 1992 ; 355 : 25.
- 56 Wilkie DR. Man as a source of mechanical power. *Ergonomics* 1960 ; 3 : 1-8.
- 57 Wilkie DR. Equations describing power input by humans as a function of duration of exercise. In: Cerretelli P, Whipp BJ, eds. *Exercise bioenergetics and gas exchange. Amsterdam: Elsevier; 1980. p 75-81.*