

Véronique Billat

$\dot{V}O_2\text{max}$ à l'épreuve du temps



de boeck

SPORT SCIENCES

$\dot{V}O_2$ max à l'épreuve du temps

POUR UNE NOUVELLE VISION DE L'ENTRAÎNEMENT

SCIENCES ET PRATIQUES DU SPORT

Collection dirigée par le Pr. VÉRONIQUE BILLAT (Université d'Évry, Val d'Essonne Genopole®,
directrice de l'Unité Inserm 902 de Biologie Intégrative des Adaptations à l'Exercice)
et le Dr JEAN-PIERRE KORALSZTEIN (Centre de médecine du sport CCAS, Paris)

La collection Sciences et pratiques du sport réunit essentiellement des ouvrages scientifiques et technologiques pour les premier et deuxième cycles universitaires en sciences et techniques des activités physiques et sportives (STAPS), sans omettre les professionnels du sport (médecins, entraîneurs, sportifs).

La collection a pour objectifs de :

- consolider un objet scientifique au champ des activités physiques et sportives ;
- conforter un champ nouveau de connaissances. Il s'agit d'explorer les activités physiques et sportives pour en faire un objet de recherche et de formation.

Cette collection comprend deux séries d'ouvrages, dans deux formats différents :

- une série PRATIQUES DU SPORT des activités physiques et sportives (APS) confrontant les savoirs faire aux méthodologies scientifiques cela pour une APS particulière ;
- une série SCIENCES DU SPORT composée d'ouvrages donnant les bases des sciences d'appui appliquées à la performance sportive.

SCIENCES DU SPORT

COLLECTIF	<i>Optimisation de la performance sportive en judo</i>
V. BILLAT	<i>Physiologie et méthodologie de l'entraînement. De la théorie à la pratique, 3^e édition</i>
F. GRAPPE	<i>Puissance et performance en cyclisme</i>
F. GRAPPE	<i>Cyclisme et optimisation de la performance. Science et méthodologie de l'entraînement, 2^e édition</i>
P. GRIMSHAW	<i>Biomécanique du sport et de l'exercice</i>
T.W. ROWLAND	<i>Physiologie de l'exercice chez l'enfant</i>
N. BOISSEAU, M. DUCLLOS, M. GUINOT	<i>La femme sportive. Spécificités physiologiques et physiopathologiques</i>
D.L. COSTILL	<i>Physiologie du sport et de l'exercice. Adaptations physiologiques à l'exercice physique, 5^e édition</i>
J.R. POORTMANS, N. BOISSEAU	<i>Biochimie des activités physiques et sportives, 2^e édition</i>
D. RICHÉ	<i>Micronutrition, santé et performance. Comprendre ce qu'est vraiment la nutrition</i>

PRATIQUES DU SPORT

G. MILLET, L. SCHMITT	<i>S'entraîner en altitude. Mécanismes, méthodes, exemples, conseils pratiques</i>
V. BILLAT	<i>L'Entraînement en pleine nature</i>
V. BILLAT, C. COLLIOT	<i>Régal et performance pour tous</i>
M. RYAN	<i>Nourrir l'endurance</i>
K. JORNET BURGADA, F. DURAND	<i>Physiologie des sports d'endurance en montagne</i>

Véronique **Billat**

$\dot{V}O_2$ max à l'épreuve du temps

POUR UNE NOUVELLE VISION DE L'ENTRAÎNEMENT

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web : www.deboeck.com

© Groupe De Boeck supérieur s.a., 2013
Rue des Minimes, 39
B-1000 Bruxelles

Tous droits réservés pour tout pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Imprimé en Belgique

Dépôt légal :
Bibliothèque nationale, Paris : octobre 2013
Bibliothèque royale de Belgique : 2013/0074/152
ISBN : 978-2-8041-8169-7

Avant-propos

$\dot{V}O_2\text{max}$ est non seulement le meilleur prédictateur de performance de la plupart des sports de locomotion, mais nous savons à présent qu'il l'est également de la mortalité (nombre de décès annuel rapporté au nombre d'habitants d'un territoire donné), de la morbidité (nombre de personnes souffrant d'une maladie donnée pendant un temps donné). Le concept $\dot{V}O_2\text{max}$ a été inventé par un physiologiste scientifique qui avait une solide formation et culture en mathématique et physique, qui plus est, à Cambridge. Archibald Vivian Hill est le pionnier de la physiologie de l'exercice, qui n'était pas, nous l'avons vu, toujours prise au sérieux, mais il le fallait bien puisque Hill s'affirma comme le spécialiste du muscle. Or le muscle est précisément là pour produire de l'énergie mécanique et du mouvement que l'on peut qualifier d'« exercice ». Il a même modélisé la performance sportive, sorte d'exercice codifié permettant de jauger les qualités physiques humaines.

En effet $\dot{V}O_2\text{max}$ est le concept central de l'énergétique humaine qui est le point d'achoppement de la physiologie. La physiologie de l'exercice est en fait la physiologie de référence si l'on admet enfin que la normalité est le mouvement, que nous sommes génétiquement programmés pour bouger au moins sept kilomètres par jour et que la sédentarité est identifiée par l'organisme comme étant un état anormal dû à une immobilisation par blessure. Cependant $\dot{V}O_2\text{max}$, concept centenaire, est devenu

consensuel, mais reste mal connu car trop longtemps débattu seulement sur des points de détail. C'est pourquoi, après vingt-cinq ans passés à comprendre et améliorer $\dot{V}O_2\text{max}$, j'ai décidé d'écrire cet ouvrage entièrement dédié à $\dot{V}O_2\text{max}$ en proposant une nouvelle vision de celui-ci et de son entraînement.

Ce livre n'est donc pas un manuel de physiologie de l'exercice classique, mais une nouvelle perspective de ce concept que nous avons soumis à l'épreuve du temps afin de découvrir cette nouvelle vision de $\dot{V}O_2\text{max}$.

Nous avons donc soumis $\dot{V}O_2\text{max}$ à l'épreuve du temps :

- le temps de son invention ;
- le temps du débat actuel ;
- l'introduction du temps limite à $\dot{V}O_2\text{max}$;
- le temps du dépassement de $\dot{V}O_2\text{max}$;
- le temps de l'entraînement à $\dot{V}O_2\text{max}$;
- le temps : la quatrième dimension de $\dot{V}O_2\text{max}$;
- le $\dot{V}O_2\text{max}$ à l'épreuve du temps (celui de la vie d'un homme de 100 ans).

Nous vous présenterons aussi comment, par un jeu de rotation autour de l'axe du temps d'effort, il est possible d'augmenter le $\dot{V}O_2\text{max}$ de référence

d'une personne PENDANT l'exercice lui-même et pas seulement après un entraînement de plusieurs semaines. En effet, nous avons tout d'abord exercé une expérience de pensée puis une véritable expérimentation pour se donner de nouvelles perspectives de progrès conceptuel du $\dot{V}O_2$ max chez un homme mais également dans la théorie bioénergétique elle-même. Pour cela, nous avons travaillé en interdisciplinarité pour confronter nos idées avec des biologistes moléculaires, généticiens et surtout mathématiciens.

L'objectif de cet ouvrage est donc de proposer une nouvelle méthode d'entraînement basée sur l'intégration de la force et de l'endurance par la démonstration que $\dot{V}O_2$ max est le CONCEPT central de l'énergétique moderne puisque dépendant de la force qui elle-même dépend de $\dot{V}O_2$ max. Cet attracteur (dans l'étude des *systèmes dynamiques*, un attracteur ou ensemble-limite est un *ensemble* ou un *espace* vers lequel un système évolue de façon irréversible en l'absence de *perturbations*) n'est pas étrange mais familier car intégré à la vie quotidienne, réaliste et efficace pour plus de plaisir en course, dans un contexte de compétition ou de loisir et ce tout au long de la vie. Cette méthode intègre les nouvelles technologies, avec des

repères de vitesse, d'accélération, de fréquence qui seront très vite intégrés à notre image mentale, car nous visualisons des séquences de film avant de prendre le départ d'un footing, d'une compétition.

Après tout l'énergie humaine est la seule énergie qui, plus on s'en sert, plus elle se renouvelle, inépuisable si l'on prend le soin de l'alimenter et de la stimuler. Comme le disait de façon imagée Antoine-Laurent de Lavoisier qui fût, en 1790, le premier à mesurer la consommation d'oxygène : « C'est la substance même de l'animal, c'est le sang, qui fournit le combustible, si les animaux ne réparaient pas habituellement par les aliments ce qu'ils perdent par la respiration, l'huile manquerait bientôt à la lampe, et l'animal périrait, comme une lampe s'éteint lorsqu'elle manque de nourriture. » (Lavoisier, *Œuvres*, tome II, p. 691, *Mémoire sur la respiration des animaux*, présentation à l'Académie des sciences, le 17 novembre 1790).

Notre endurance nous a fait homme, puis elle l'a annihilé par le progrès technologique ; la même intelligence va nous permettre de stimuler l'endurance à nouveau de façon simple, efficace intégrée dans la vie quotidienne qui n'est plus celle des chasseurs-cueilleurs que nous fûmes.

Véronique Billat

Introduction

Archibald Vivian Hill, prix Nobel de médecine et de physiologie pour ses travaux sur le muscle, inventa, en 1920, le concept de $\dot{V}O_2\text{max}$. Il s'est passionné pour l'homme en mouvement à travers la performance en analysant la relation vitesse-temps d'effort pour comprendre l'énergétique humaine. Il proposa les facteurs limitants de $\dot{V}O_2\text{max}$ que nous allons rappeler, mais ne les testait pas dans le temps de l'exercice et de l'entraînement. En effet, Hill n'envisageait pas qu'il fût possible de briser les facteurs limitants de $\dot{V}O_2\text{max}$ par l'entraînement. Pourtant à cette époque, des coureurs à pied finlandais (Kolehmainen, champion olympique des 5 000 m en 1912, 1920, Ritola et surtout Paavo Nurmi [médaillé d'or sur 1 500 et 5 000 m aux Jeux olympiques de 1924, à seulement deux heures d'intervalle]) révolutionnaient les méthodes d'entraînement. En effet, ils y intégraient beaucoup de renforcement musculaire ainsi que des sessions de courses accélérées en conservant des longues sorties à très faibles vitesses. Au début des années 1980, un Français qui réalisa 3'35"8 et 3'34"52 aux 1 500 m avec un dernier 500 m en 1'04"7 (les spécialistes apprécieront !) avait lui aussi adopté les charges de musculation au sein même de son entraînement sur piste. Educateur et entraîneur travaillant dans l'anonymat d'un club et des écoles municipales, il nous a donné sa confiance et son témoignage avec ses incroyables séances d'entraînement que nous vous détaillerons avec des commentaires sur

le plan de la justification scientifique. Ce croisement des expériences empiriques et scientifiques donne une nouvelle perspective à la révolution de l'entraînement, qui n'est pas un pur jus de crâne mais l'élaboration d'expérimentations basée sur des hypothèses, selon les méthodes scientifiques qui procèdent également par intuition puisque issues de l'expérience de l'auteur qui fut d'abord athlète, puis étudiant, puis professionnelle dans la compréhension dite « clef » d'un entraînement minimaliste et efficace.

Cet entraînement en accélération balayant de très larges spectres de vitesse (de la marche au sprint) au sein même d'un footing est actuellement la garantie du succès des coureurs de l'Afrique de l'Est. Mais, à l'époque, Londres, et son University College dans laquelle Hill avait succédé à Ernest H. Starling (qui décrit en 1914 le travail du cœur et ses propriétés d'étirement et de contractilité) à la chaire de physiologie, était loin de la Finlande et de ses champions, et le progrès actuel réside d'abord dans la possibilité de faire rencontrer pratiquants et chercheurs qui ont souvent eux aussi une culture sportive de bon niveau. La vocation de chercheur dans le domaine de la physiologie de l'exercice peut également se nourrir des questions mûries au fil de tours de stade parfois bien inutiles.

Pour améliorer $\dot{V}O_2\text{max}$, il faut considérer et utiliser le concept

de $\dot{V}O_{2\text{max}}$, qui est l'accélération du volume d'oxygène consommé chaque minute, alors que $\dot{V}O_{2\text{max}}$ est le débit d'oxygène consommé par minute. Il faut développer la capacité d'augmenter $\dot{V}O_{2\text{max}}$ grandement et très vite pour supporter des variations de vitesse permettant de régénérer les phosphates nécessaires à... l'augmentation de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ et bien sûr de la vitesse moyenne.

Le but est en effet de diminuer le temps mis sur une distance de course par une adaptation à la distance, au dénivelé, à l'environnement, avec l'avènement des courses hors stade dont l'équation se corse mais reste simple : l'amélioration de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ par la force. Cette amélioration s'appuie sur une méthode fondée sur l'accélération que nous allons révéler dans ces pages tout au long des sept chapitres considérant le concept de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ à l'épreuve du temps, en rupture avec les paradigmes d'états stables et de dette d'oxygène, ses fonds baptismaux qui l'ont empêché d'évoluer :

1. **Le temps historique** de l'invention de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ sur le paradigme de l'état stable et de la dette d'oxygène. De Lavoisier à Astrand en passant par Hill, ce chapitre analyse l'héritage de ces grands précurseurs. Que nous ont-ils légué et comment leurs pensées influencent-elles toujours notre réflexion ?
2. **Le temps du débat actuel** sur les facteurs limitants de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ et les méthodes d'amélioration qui en découlent. Ce débat aborde les grands concepts communément admis et utilisés par la communauté scientifique au plan physiologique, énergétique, biochimique et cellulaire ;
3. **L'introduction du temps limite à $\dot{V}O_{2\text{max}}$** ou le recul de vingt-cinq années de recherches expérimentales et de modélisation.

Je vais, à travers ma démarche et mes bribes de vie de chercheurs, vous faire partager dans cet ouvrage le cheminement de ma pensée qui m'a amené à comprendre l'aboutissement, momentanément, de la théorie du « $\dot{V}O_{2\text{max}}$ temporel » que je délivre aux jeunes chercheurs pour l'affirmer ou l'infirmer expérimentalement ;

4. **Le temps du dépassement de $\dot{V}O_{2\text{max}}$.**

Nous allons proposer une nouvelle vision de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ qui introduit la flèche du temps que nous allons suivre pour se déplacer de cube en cube traduisant un état physiologique donné dans une capsule de temps propre à chacun. Chaque

cube est notre espace physiologique tridimensionnel, matrice de la relation entre $\dot{V}O_{2\text{max}}$ et ses facteurs limitants :

- la puissance cardiaque, approchée par la fréquence cardiaque (Starling n'est pas loin) ;
- la puissance mécanique (qui va traduire la possibilité de resynthétiser la créatine phosphate au fur et à mesure de l'exercice pour accélérer et aller au-delà de $\dot{V}O_{2\text{max}}$) ;
- l'efficacité respiratoire estimée par la fréquence respiratoire.

Nous avons expérimentalement, par un jeu d'accélération positives et négatives, augmenté $\dot{V}O_{2\text{max}}$ en cours d'exercice et élevé la puissance moyenne de celui-ci par rapport à un exercice à puissance constante réalisé à PMA (puissance maximale aérobie) ou $\dot{V}O_{2\text{max}}$ (vitesse normale sollicitant $\dot{V}O_{2\text{max}}$). Effectivement nous ne sommes pas restés au stade de l'expérience de pensée et proposons même un modèle d'optimisation de la variation de puissance ou vitesse de course en contradiction avec le modèle du mathématicien et physicien Joseph Keller (qui aura 90 ans en 2013) qui était récipiendaire du prix Wolfe (Ricardo) en 1997, prix considéré comme le plus prestigieux après celui de la médaille Field. Joseph Keller avait proposé un modèle idéal de course à vitesse constante dans son célèbre article de 1974 (Keller, 1974). Il était mathématicien et physicien, notamment spécialiste de la diffraction des ondes utilisée dans les techniques de radar, et s'intéressait à la résolution de problématiques industrielles, l'étude de la course optimale étant pour lui une sorte de respiration dans sa riche bibliographie qui ne traitait aucunement de telle question, au contraire de Hill qui a dédié sa vie à la compréhension des fondements énergétiques de la locomotion humaine. Notons que Keller est né en 1923 en pleine période de la découverte de $\dot{V}O_{2\text{max}}$, concept qu'il a d'ailleurs intégré dans son équation de la vitesse optimale de course mais en postulant que $\dot{V}O_{2\text{max}}$ est fixe tout comme la vitesse de course ;

5. **Le temps de l'entraînement.** Cet entraînement fondé sur cette nouvelle approche de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ a pour objectif de progresser

sur l'ensemble du continuum énergétique de 50 à 150 % de $\dot{V}O_2\text{max}$ (vitesse associée à $\dot{V}O_2\text{max}$) et plus pour le sprint. Nous vous livrerons le témoignage d'un champion précurseur qui avait trouvé la méthode d'entraînement en accélération et force mais qui n'a pas su la doser et s'est ainsi brûlé les ailes, à l'image de certains qui, à l'opposé, font trop de kilomètres et d'heures d'entraînement lent et qui s'oxydent. Le stress oxydant (ou stress oxydatif) est un type d'agression des constituants de la cellule dû aux radicaux libres produit en excès par la phosphorylation oxydative en état de surentraînement. Nous ne traiterons pas de ce sujet ici, mais soulignons qu'il a été démontré (Snyder *et al.*, 1993) que le surentraînement était hautement corrélé à la monotonie de la vitesse d'entraînement, c'est-à-dire le faible écart-type de sa vitesse moyenne sur une semaine. C'est pourquoi, le balayage en accélération des vitesses de course permet de prévenir cet état de surentraînement. En outre, nous recherchons un entraînement de type minimaliste qui puisse être agréable car bien récupéré (même s'il demande beaucoup d'engagement dans sa réalisation) et qui nous laisse suffisamment d'énergie pour notre vie sociale et personnelle, et à l'envie de participer à des courses sans se sentir las sur la ligne de départ ;

6. Le temps : la quatrième dimension de $\dot{V}O_2\text{max}$ ou $d\dot{V}O_2\text{max}/dt$.

Ce chapitre au contenu novateur positionne d'abord la question d'une nouvelle lecture de $\dot{V}O_2\text{max}$ puis introduit les concepts de fractalité, de dimension temporelle de $\dot{V}O_2\text{max}$ et enfin d'accélération dans la physiologie de l'exercice.

Enfin ces concepts sont mis en application pour l'entraînement ;

7. $\dot{V}O_2\text{max}$, à l'épreuve du temps de la vie humaine, une nouvelle façon d'approcher les limites de $\dot{V}O_2\text{max}$. En effet, l'examen des facteurs limitant $\dot{V}O_2\text{max}$ au cours du vieillissement est le signe de l'adaptation de ses facteurs limitants à l'espérance de vie et surtout de la vie active. Mourir en bonne santé est le rêve de beaucoup d'entre nous, cela serait une satiété existentielle qui nous dirait que l'on a décidément goûté à un peu de tout. Mais la recherche scientifique est une longue chaîne de chercheurs affamés de curiosité. Nous verrons que notre centenaire sportif est surtout animé de la farouche appétence de connaître ses limites et, m'ayant avoué qu'il n'avait toujours pas confiance en lui, chercher revient à le rassurer en lui donnant des indices sur ses possibilités et celles de notre humanité.

Le temps historique de l'invention de $\dot{V}O_2\text{max}$

1

En pleine Révolution française, un tout jeune homme issu de la noblesse, Antoine-Laurent de Lavoisier – qui avait déjà, en 1770, à 27 ans, réussi à synthétiser de l'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène, à 34 ans et détermine la composition exacte de l'air. À partir de 1776, Lavoisier, devenu régisseur des poudres et salpêtres et fermier général, occupe de somptueux appartements dans l'hôtel des Régisseurs situé au Petit-Arsenal, non loin de la Bastille. Il y aménage sous les combles un vaste laboratoire, l'un des mieux équipés d'Europe, ce qui reste déterminant pour la recherche qui doit paradoxalement s'appuyer de nos jours de plus en plus sur les fortunes personnelles des *business angels*. En quelque sorte, Lavoisier était son propre *business angel*. En effet, sa fortune personnelle et ses traitements de fermier général et de régisseur lui procurent l'argent nécessaire à l'achat d'instruments très fiables qu'il fait construire sur mesure par les meilleurs artisans : gazomètres, balances de précision, séries de poids, baromètres. Ces instruments vont lui permettre de faire des mesures très fines, de peser les éléments mis en jeu, avant et après chaque expérience, et d'arriver ainsi à la confirmation de la loi de la conservation de la matière. Pendant les seize années passées à l'Arsenal, nombreuses sont les personnalités qui visitent son laboratoire : savants éminents, écrivains, artistes, économistes, ce qui en science moderne fait cruellement défaut en

raison d'un cloisonnement académique dû au fameux conseil national des universités (CNU) qui régit la carrière des enseignants-chercheurs en valorisant l'hyperspécialisation disciplinaire plutôt que l'approche de problématiques par l'interdisciplinarité indispensable pour l'invention de nouveaux paradigmes souvent fondamentaux. Pour élaborer notre révolution de $\dot{V}O_2\text{max}$ et de l'énergie humaine, nous avons consacré de nombreuses heures à contacter, convaincre et visiter des mathématiciens de renom, dont Yves Meyer et Cédric Villani, respectivement lauréats du prix Gauss et de la médaille Field 2010 de mathématiques, qui nous ont ouvert la porte de leur laboratoire et institut (ENS Cachan et Henri-Poincaré) pour nous conforter dans notre approche, qui parfois nous effrayait nous-mêmes par son audace. En effet, considérer que notre espace, dimension énergétique, était au moins en 4 dimensions, et peut-être davantage sans doute si l'on s'en réfère à nos capacités de vibration (fréquences du corps : cardiaques, respiratoires, foulées) qui selon la théorie des cordes nous ouvrirait à 12 dimensions, est révolutionnaire (Aflalo et Graziano, 2008). Tout cela enfraint le mode de pensée d'un siècle d'approche par état stable selon la seule dimension soit du temps soit de la puissance de l'exercice soit, peut-être de façon déjà plus osée, par la perception de la pénibilité de l'exercice comme variable de contrôle d'un équilibre physiologique dynamique.

Mais Lavoisier à qui l'on doit la première mesure de la consommation d'oxygène au repos mais aussi à l'exercice (soulèvement de charges) avait eu l'audace de contester l'existence de « la théorie du phlogistique », développée principalement par l'allemand Georg Ernst Stahl au XVIII^e siècle, qui expliquait alors le phénomène de la combustion de la façon suivante. Selon cette théorie, tous les corps renferment en eux un principe de combustibilité invisible appelé phlogistique qui, quand il s'échappe lors d'une combustion, devient visible : c'est le feu, accompagné de lumière et de chaleur. Mais ce postulat soulève un problème : la calcination d'un métal, par exemple, devrait impliquer une perte de poids. En fait, c'est l'inverse qui se produit. Pour expliquer cette augmentation, Stahl parle du poids négatif du phlogistique ! Dans la réalité, la combustion d'un corps impliquant sa combinaison avec l'oxygène de l'air, il est normal que son poids augmente après calcination. Lavoisier n'est bien entendu pas d'accord avec la théorie du phlogistique qu'il juge erronée. Il la combattra sans relâche, elle s'éteindra dans les dernières années du XVIII^e siècle. Il pense que la chimie de son époque repose sur beaucoup d'idées incohérentes et peu de faits établis. Toute sa vie, il s'efforcera de démontrer par l'expérience les théories qu'il avance. Ses expériences sur la décomposition de l'air atmosphérique amènent Lavoisier, dès 1773, à la respiration des animaux. Il constate que l'air fixe le gaz carbonique (CO₂) et ne permet pas aux animaux de vivre et annonce, en 1775, avoir identifié la partie de l'air propre à la respiration, l'« oxygène ». Quelques années plus tard, aidé du mathématicien Laplace, il reprend ses recherches sur la chaleur. Les deux scientifiques démontrent que la respiration est comparable à une combustion lente qui se produit dans les poumons, consomme de l'oxygène, émet du CO₂, de l'eau, et dégage de la chaleur qui se diffuse dans l'organisme. Alors équipés de balances très précises et de calorimètres, instrument inventé avec Laplace en 1782 (cela démontre la nécessité de ne pas séparer la culture scientifique et technique), ils mesurent la chaleur d'un individu au repos, en activité et à jeun, placé dans des environnements à différentes températures. Il mesure la transpiration et montre le rôle de ce phénomène dans la régulation de la chaleur du corps et la met en relation avec la consommation d'oxygène et la quantité de travail mécanique. Il applique la fameuse théorie selon laquelle « rien ne se perd rien ne se crée tout se transforme » (phrase qu'il n'a pas lui-même prononcée mais qui résume sa

théorie qui sous-tend sa démarche scientifique). Il mesurait la consommation d'oxygène en appliquant un masque en fin d'exercice. Lavoisier mesurait la consommation d'oxygène en milieu fermé à partir de l'augmentation du volume de CO₂ dans l'air rejeté, analysé en continu, en absorbant le CO₂ par une solution d'hydroxydes alcalins (OH⁻).

Dans le premier *Mémoire sur la respiration des animaux*, il présente à l'Académie, seulement quatre ans avant sa mise à mort, le 17 novembre 1790, la synthèse de ses connaissances :

- la respiration est une combustion lente de carbone et d'hydrogène, qui est semblable, en tout, à celle qui s'opère dans une lampe ou dans une bougie allumée et, sous ce point de vue, « les animaux qui respirent sont de véritables corps combustibles qui brûlent et se consomment. » (Lavoisier, 1790 ; Seguin et Lavoisier. *Premier mémoire sur la transpiration des animaux*, Œuvres de Lavoisier, Vol. II, Paris : Imprimerie Impériale, tome II, p. 691, 1862) ;
- c'est l'air de l'atmosphère qui fournit l'oxygène nécessaire à cette combustion ; le sang fournit le combustible, et son oxydation dans le poumon explique son changement de couleur. Cette combustion produit du gaz carbonique et de l'eau, elle est la source de la chaleur animale et elle a un coût énergétique : les variations de la concentration en oxygène dans l'air ne changent pas sa consommation par l'organisme, et l'azote n'est pas un gaz respiratoire. Il entre dans le poumon et en ressort comme il y est entré, sans changement ni altération.

Nous nous servions des propriétés de l'azote pour calculer la consommation d'oxygène lorsque nous ne pouvions, il y a seulement vingt-cinq ans, mesurer le volume d'air inspiré mais seulement celui expiré. Actuellement nous utilisons un réservoir d'azote de 30 litres (Altitrainer®, SMTEC, Genève, Suisse) dosant la fraction inspirée d'azote pour simuler l'altitude ; en effet, une augmentation de la fraction inspirée d'azote de 79 à 85 % permet de simuler une altitude de 3 200 m.

Lavoisier démontre également qu'une relation existe entre le travail mécanique effectué par un être vivant et les phénomènes biochimiques mesurables qui en sont le moteur. Désireux de mesurer ces échanges gazeux et l'effet sur eux

du repos, de la digestion, du travail musculaire, Lavoisier invente avec Laplace le calorimètre à glace : il peut ainsi mesurer la chaleur dégagée par un animal, la comparer à celle libérée par la combustion du charbon et connaître la dépense énergétique ; puis il mesure la consommation d'oxygène correspondant à cette dépense. Il établit ainsi plusieurs données générales sur la respiration : les mouvements et la digestion augmentent son rythme et la consommation d'air.

Grâce à un vêtement spécial, fait de tafetas enduit de gomme élastique qui ne laisse pénétrer ni l'air ni l'humidité, fermé au-dessus de la tête par une forte ligature – un tuyau collé autour des lèvres par du mastic qui lui permet de respirer –, il mesure précisément un $\dot{V}O_2$ au repos et à jeun, à une température ambiante de 32,5 degrés centigrades, de 400 mL d'oxygène consommés par minute, ce qui est parfaitement conforme aux valeurs actuelles et qui est la référence pour le métabolisme basal (quantité d'énergie dont l'organisme a besoin au repos) puisque 0,4 litre (L) d'oxygène à la minute représente $0,4 \times 5 = 2$ kilocalories (kcal) (1 litre d'oxygène permettant de brûler des glucides pour libérer 5 kcal). Effectivement, nous dépensons seulement $60 \times 2 = 120$ kcal à l'heure (pour un homme de 1,80 m et de 75 kg et moins pour une femme selon la formule de Black *et al* [1996] qui est actuellement la référence en particulier dans le cas des sujets en surpoids et des personnes âgées [de plus de 60 ans]) :

- femme : $\text{kcal} = [0,963 \times \text{Poids (kg)}^{0,48} \times \text{Taille (m)}^{0,50} \times \text{Âge (an)}^{-0,13}] \times (1000/4,1855)$;
- homme : $\text{kcal} = [1,083 \times \text{Poids (kg)}^{0,48} \times \text{Taille (m)}^{0,50} \times \text{Âge (an)}^{-0,13}] \times (1000/4,1855)$.

Lavoisier démontre même que la consommation augmente pendant la digestion, avec le froid et au cours de l'exercice musculaire. De plus, il établit le lien entre la consommation d'oxygène, la dépense énergétique par unité de temps (puissance) et l'augmentation de la fréquence cardiaque. Il affirme à l'Académie des sciences que « nous sommes parvenus à constater deux lois de la plus haute importance : la première, c'est que l'augmentation du nombre des pulsations est assez exactement en raison directe de la somme des poids élevés à une hauteur déterminée ; la seconde, c'est que la quantité d'air vital consommé est en raison directe du produit des inspirations par les pulsations ». (Lavoisier, 1790, Seguin et Lavoisier. *Premier mémoire sur la transpiration des animaux*, Œuvres de Lavoisier, Vol. II, Paris : Imprimerie Impériale, tome II, p. 696, 1862).

Puis, Lavoisier donne la description des travaux d'Armand Seguin, son jeune collaborateur (à peine 30 ans à l'époque et qui était à la fois chimiste, industriel et financier), élevant pendant un quart d'heure avec un bras un poids de 15 livres à une hauteur de 650 pieds, soit en unités actuelles du système international une masse (m) de $15 \times 453,59237 = 6,8$ kg sur une hauteur (h) de $650 \times 30,48 \text{ cm} = 198 \text{ m}$. Soit une quantité d'énergie potentielle :

$$E = mgh = 6,8 \times 9,81 \times 198 = 13\,216 \text{ Joules (J)},$$

où : g est la constante universelle de gravitation soit $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ pendant 15 minutes (900 secondes) ; m la masse du poids ; et donc une puissance moyenne de $13\,216/900 = 15$ Watts (W). En outre, les deux chercheurs avaient clairement établi, d'une part, la relation entre la fréquence cardiaque et la puissance mécanique développée au cours de l'exercice, d'autre part, la relation entre la consommation d'oxygène et les fréquences respiratoire et cardiaque. À cette occasion, Lavoisier formule aussi une des premières lois de la physiologie du travail et invente les méthodes modernes de mesure objective des tâches qui sont utilisées en médecine du travail : évaluation de la fréquence cardiaque, évaluation de l'oxygène consommé. Cependant, Lavoisier ignorait encore dans quelle partie de l'organisme se déroule la combustion entretenue par la respiration et se demandait si le gaz carbonique se forme « dans le poumon ou dans le cours de la circulation, par la combinaison de l'oxygène de l'air avec le carbone du sang ». Ou bien, ce qui est plus conforme à la réalité : « Il serait possible, écrit-il, qu'une partie de cet acide carbonique se formât par la digestion, qu'il fût introduit dans la circulation avec le chyle (liquide blanchâtre d'aspect laiteux présent dans les vaisseaux lymphatiques de l'intestin grêle) ; enfin que, parvenu dans le poumon, il fût dégagé du sang à mesure que l'oxygène se combine avec lui par une affinité supérieure. » (Lavoisier, 1862). Mais au terme de cette démarche, Lavoisier a identifié les régulateurs biologiques dont l'équilibre assure l'état de santé : la respiration, qui apporte le carburant, l'oxygène ; la nutrition, qui fournit les combustibles, l'hydrogène et le carbone ; la thermogénèse, ou production de chaleur résultant de cette combustion ; il reste à définir son contrepoids, la thermolyse (l'ensemble des systèmes mis en jeu par les organismes homéothermes afin de dissiper le surplus de chaleur et de maintenir stable la température interne), assurée par la transpiration, qu'il mesure par sa méthode des bilans et l'emploi de la balance. En effet, pour connaître

le poids de l'eau perdue par la transpiration, il lui suffisait de déterminer la perte globale de poids d'un individu dans un temps donné et d'en soustraire la quantité d'eau perdue par la respiration. Au bilan, en seulement dix-huit années d'études et de réflexions, il aura pourtant abordé les questions essentielles : le rôle de la ventilation pulmonaire ; ses relations avec la circulation sanguine ; l'analogie entre respiration et combustion ; le mécanisme de la chaleur animale et de l'homéothermie (ce terme s'applique à des organismes dont le milieu intérieur conserve une température corporelle constante) ; la régulation de la fonction respiratoire et ses rapports avec la transpiration et la nutrition.

Nous savons à présent que l'hyperthermie qui peut conduire à une température corporelle de fin de marathon à plus de 41°C est un facteur limitant de l'exercice avec une valence létale. Lavoisier étant un grand spécialiste de la mesure, il pèse tous les aliments consommés en formulant l'hypothèse que ces aliments ingérés compensent la perte de carbone et d'hydrogène engendrée par la respiration. À 47 ans, en pleine Révolution française qui lui sera fatale, il identifie les trois régulateurs biologiques dont l'équilibre assure le bon état de santé du corps humain : la respiration qui apporte le carburant : l'oxygène, la nutrition qui fournit les combustibles : l'hydrogène et carbone, et enfin la thermogenèse et la transpiration qui maintiennent la température du corps constante. Deux ans plus tard, il présentait également, suite à ses travaux sur les végétaux, la première théorie de la photosynthèse

simplifiée. Pour la petite histoire avant d'être guillotiné à seulement 51 ans, ce génie scientifique, économiste et politique, avait un emploi du temps très rigoureux. En effet à partir de 1776, Lavoisier qui vient d'être nommé régisseur des Poudres et Salpêtres (qui deviendra l'usine des poudres) s'installe au Petit-Arsenal, dans l'hôtel des Régisseurs. Il va y installer dans les combles un laboratoire de recherche ultramoderne, l'un des mieux équipés d'Europe (figure 1). Depuis 1768, il est également administrateur à la Ferme générale et académicien des sciences. (Seguin et Lavoisier, 1862).

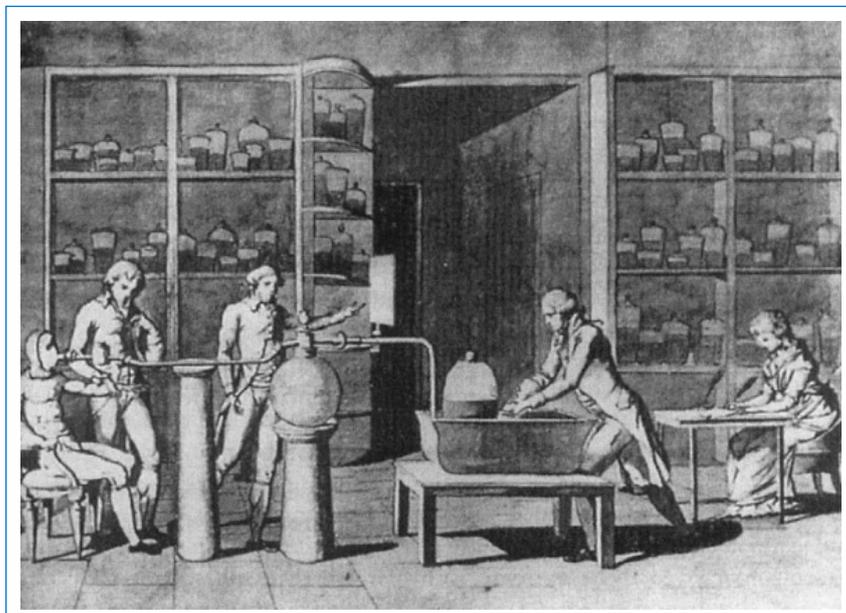
Sa triple carrière lui impose un travail intense et donc un emploi du temps très strict.

Levé dès 5 heures, il travaille à son laboratoire de 6 à 9 heures, puis se rend à la *Ferme Générale* jusqu'à la mi-journée. Il sera ensuite jusqu'à 17 heures à la Régie des Poudres ou à l'Académie, selon les priorités du moment. De retour chez lui, il soupe puis retourne à ses recherches de 19 à 22 heures. Toute la journée du samedi est consacrée aux expériences. Mais Lavoisier n'est pas « seulement » un scientifique et un grand commis de l'État. Son couple mène aussi une intense vie mondaine. Marie-Anne, sa femme, tient salon tous les lundis et attire chez elle les plus grands savants de l'époque. Les Anglais Watt, Hall et Priestley y croisent le Suisse de Saussure, les Américains Franklin et Morris, le Suédois Lexell, astronome et mathématicien. Aujourd'hui, ce type de confrontation est de plus en plus rare, car la théorie du *publish or perish* impose une productivité de la publication (nombre d'articles publiés chaque année par chercheur d'un laboratoire) qui conduit à « l'efficacité » de la publication sûre, donc peu audacieuse et peu dérangeante, et par conséquent hyperspécialisée.

Élu à la Ferme générale (équivalent de nos délégations de service public actuelles) depuis ses 26 ans, Lavoisier sera considéré comme un traître par les révolutionnaires, non pas pour un quelconque militantisme royaliste, mais bien pour avoir servi le roi pendant toutes ces années et essentiellement pour s'être enrichi personnellement de manière « pharaonique » en faisant payer au peuple les différentes taxes dont celle sur le sel (la gabelle des fermiers généraux)... C'est ainsi que par un décret du 5 mai 1794, tous les fermiers généraux ayant servi sous l'Ancien Régime ont été traduits devant le Tribunal révolutionnaire pour y être « jugés ». Ayant demandé un sursis pour pouvoir finir une expérience, Lavoisier entendit cette réponse de la part de

Figure 1

Le laboratoire de Lavoisier au Petit-Arsenal (Seguin et Lavoisier, 1862).



Jean-Baptiste Coffinhal, président du Tribunal révolutionnaire : « La république n'a pas besoin de savants ni de chimistes ; le cours de la justice ne peut être suspendu... » Lavoisier fut guillotiné trois jours plus tard sur la place de la Révolution (l'actuelle place de la Concorde à Paris), en compagnie de quelques autres anciens fermiers généraux comme les Perceval. Quelques instants après sa mort, Louis Lagrange, un autre grand chimiste, prononcera ces paroles : « Il ne leur a fallu que quelques instants pour faire tomber cette tête, et une centaine d'années ne suffiront peut-être pas pour en reproduire une semblable... »

Les révolutions sont impitoyables. Contentons-nous d'opérer notre révolution conceptuelle concernant le concept de $\dot{V}O_2\text{max}$ qui fut inventé par l'Anglais Archibald Vivian Hill, seulement cent cinquante ans après que le concept de $\dot{V}O_2$ le fut par Lavoisier.

En effet, la fin du XIX^e siècle était consacrée à l'invention des ergomètres comme le vélo et le tapis roulant (figures 2 et 3) et au perfectionnement de la mesure des échanges gazeux par notamment le spiromètre du physiologiste français Tissot (1904) et le sac de Douglas (1911, figure 5). À l'époque, on mesurait la consommation d'oxygène selon la technique du circuit fermé qui n'était guère pratique pour mesurer $\dot{V}O_2$ à l'exercice maximal.

En effet, dans le cas de cette méthode dite « en circuit fermé », le sujet inspire le mélange gazeux contenu dans une enceinte, généralement un spiromètre de grand volume, tel que le spiromètre de Tissot (figure 4). À l'expiration, les gaz sont restitués à l'enceinte après leur passage dans un dispositif contenant un absorbateur de CO_2 (le plus souvent de la chaux sodée). La différence entre la quantité d'oxygène présente initialement dans l'enceinte et celle qui demeure à la fin de l'exercice correspond à la quantité d'oxygène prélevée par le sujet. Pour éviter que la teneur en oxygène de l'enceinte ne diminue, le sujet respire généralement de l'oxygène pur.

Bien que ce dispositif permette la mesure des différents indices spirométriques et de la consommation d'oxygène au repos, il présente durant l'exercice certaines limites, telles que l'élimination incomplète du CO_2 par la chaux sodée, l'importance des résistances mécaniques à la ventilation, la nécessité de mesurer en continu la température de l'enceinte pour tenir compte de la dilatation des gaz. Par ailleurs, l'inhalation d'oxygène pur devrait entraîner une surestimation de $\dot{V}O_2\text{max}$



chez les sujets dont le sang artériel est désaturé en air ambiant lors d'exercice ; en particulier, chez les personnes à haute valeur de $\dot{V}O_2\text{max}$ qui développent une hypoxémie induite par l'exercice, essentiellement en raison d'un rapport ventilation/perfusion défavorable à la recharge du sang capillaire artériel en oxygène (nous reverrons cette notion dans les facteurs limitants de $\dot{V}O_2\text{max}$).

Figure 2 ▲

La bicyclette ergométrique déjà très perfectionnée de Benedict et Cady aux États-Unis en 1912 (Benedict et Cady, 1912).

Figure 3 ▼

Un tapis roulant des années 1920 (Smith, 1922).

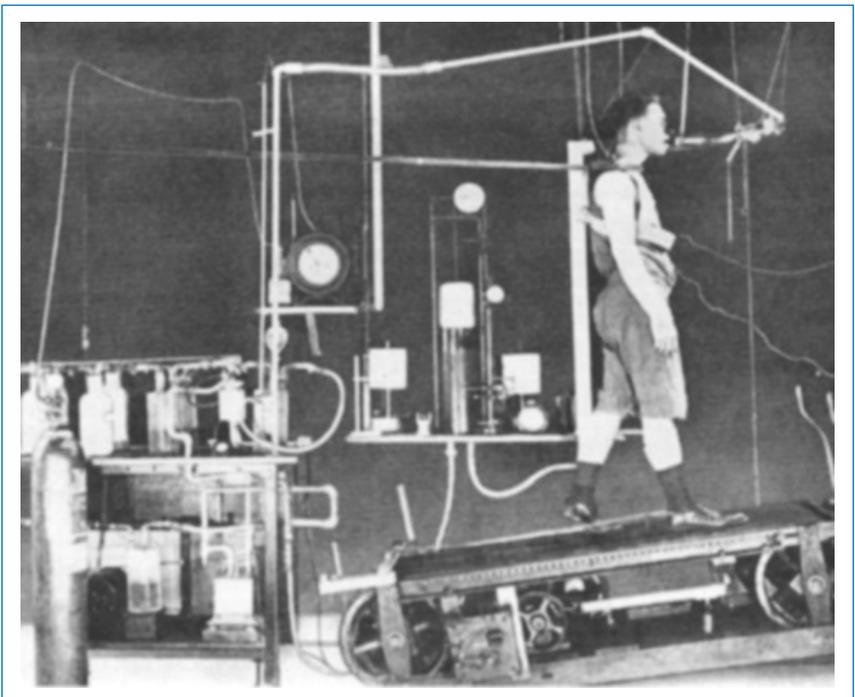


Figure 4

Spiromètre de Tissot (1904).

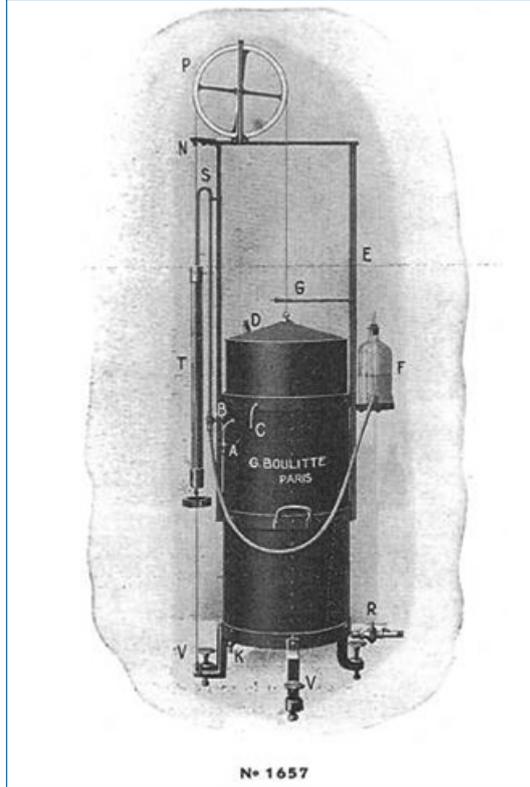
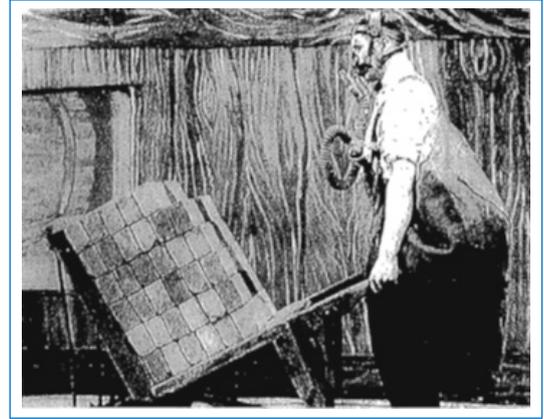


Figure 5

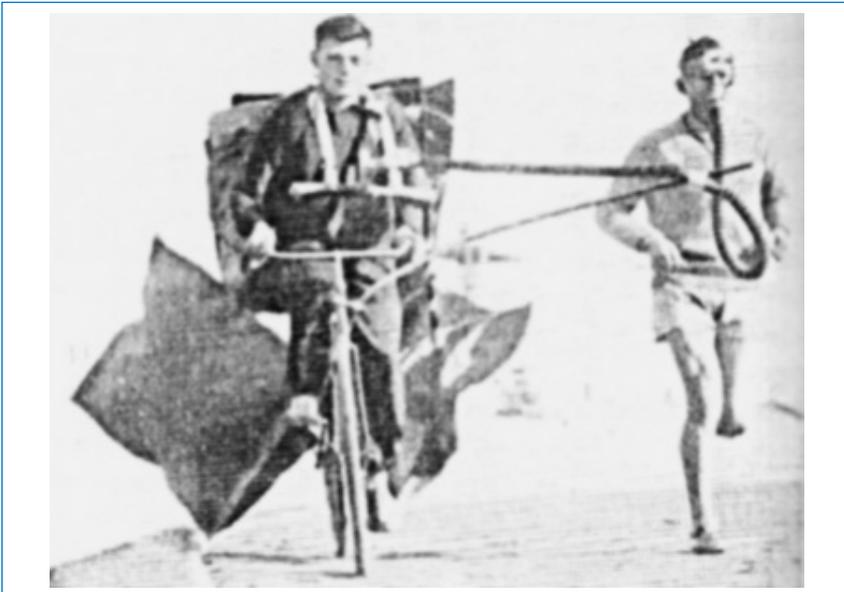
Mesure de la consommation d'oxygène dans un sac de Douglas au début du XX^e siècle (Hill, *Muscular movement in man*, 1927).



Dans la première technique, les gaz sont recueillis, pendant une durée rigoureusement chronométrée, dans des sacs imperméables d'une contenance d'une centaine de litres (ou plus), comme par exemple des sacs de Douglas (Douglas, 1911, figure 5). La mesure des volumes des gaz inspirés ou expirés se fait ensuite à l'aide d'un débitmètre ou d'un gazomètre comme celui de Tissot. La teneur des gaz expirés en oxygène ($F_E O_2$) et en gaz carbonique ($F_E CO_2$) est réalisée soit par méthode chimique sur de petits échantillons, dans les études où une précision maximale est recherchée, soit au moyen d'analyseur automatique, après calibration avec des gaz étalons de très haute précision.

Figure 6

Sac de Douglas posé sur une bicyclette à côté d'un coureur (Herbst, 1928 *in* Hollmann et Hettinger, 2000).



La deuxième technique la plus souvent utilisée actuellement est entièrement automatisée : le débit expiré est mesuré en continu au moyen d'une turbine de haute précision et de faible inertie ou d'un pneumotachographe (appareil qui mesure le débit de gaz instantané à la bouche), et les gaz sont analysés en continu au moyen d'analyseurs rapides. La valeur du prélèvement d'oxygène en circuit ouvert est donnée par la formule suivante :

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_E [(1 - F_E CO_2) F_I O_2 - F_E O_2] / (1 - F_I O_2),$$

Où : $F_I O_2$ est la fraction d'oxygène dans l'air inspiré ; $F_E O_2$ et $F_E CO_2$, respectivement les teneurs des gaz expirés en oxygène et en gaz carbonique, et ; \dot{V}_E le volume d'air expiré exprimé en conditions STPD (*Standard Temperature and Pressure Dry*).

La consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) peut être déterminée sur le terrain selon la méthode du circuit ouvert. Le gaz expiré est recueilli dans un sac de Douglas porté par un cycliste à côté d'un coureur (figure 6) ou d'un skieur (figure 13) ou posé sur un chariot qui se déplace à la même



◀ Figure 7

Mesure de la consommation d'oxygène par un analyseur portable des échanges gazeux respiratoires de type K4b2® (Cosmed) sur un coureur du marathon de Paris 2011.

Figure 8 ▶

Mesures de la consommation d'oxygène au cours du marathon de Paris en 2011 recueillies dans la tente Gaz de France par réception GPRS en « live » des données respiratoires de chaque coureur durant la course. L'auteur monitore préalablement un coureur.

vitesse que l'athlète (cas d'un nageur en piscine, course sur route ou sur piste).

La mise au point récente de chaînes de mesures miniaturisées, comprenant un débitmètre à turbine, une pompe aspirant une petite fraction des gaz expirés, des analyseurs de gaz carbonique et d'oxygène (par exemple de type K4b2®, Cosmed, Rome, Italie, figures 7 et 8), permet d'enregistrer en continu la consommation d'oxygène sur le terrain par télémétrie. Le confort du sportif est nettement meilleur qu'avec la méthode des sacs de Douglas et permet la mesure de la consommation d'oxygène dans les terrains les plus accidentés. La précision de cette méthode ambulatoire est probablement légèrement inférieure à celle de la méthode avec les sacs de Douglas.

L'utilisation de ces techniques au cours d'exercices d'intensité progressive permet de mesurer le coût énergétique et la consommation maximale d'oxygène dans des conditions proches de celles des séances d'entraînement et des compétitions telles que le marathon de Paris, que nous avons suivi régulièrement entre 2000 et 2011.

Malgré toutes ces avancées technologiques, il fallut attendre la fabuleuse période Art

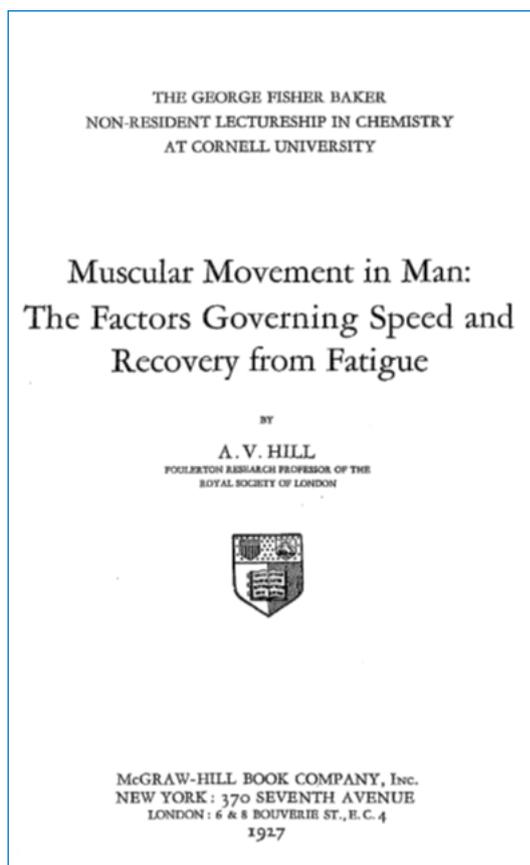
déco pour que le concept de $\dot{V}O_2\text{max}$ avec celui d'état stable (*steady state*) et de dette d'oxygène (*oxygen debt*) naisse. En cette journée de 1922, un homme de 36 ans court autour d'une minuscule piste de 92,5 yards (84,6 m) de circonférence. Il court à la vitesse constante de 16 km.h⁻¹, il est à son quatrième palier de 4 minutes après avoir couru un premier à 10,9 km.h⁻¹ et les deux suivants à 12,2 km.h⁻¹ (figures 9 et 10).

Il mesure sa consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) toutes les minutes et constate qu'à l'arrêt entre les intervalles de course :

- les valeurs de $\dot{V}O_2$ augmentent à chaque palier de vitesse en se stabilisant à des plateaux supérieurs de façon proportionnelle au gain de vitesse après une croissance initiale exponentielle. Nous ajouterons que la pente d'accroissement de la consommation d'oxygène dans cette phase initiale est nettement plus grande pour le palier de vitesse supérieur à 16 km.h⁻¹ ;
- les $\dot{V}O_2$ des deux paliers de même vitesse sont identiques et remarquables de précision. Il est vrai qu'ils mesuraient la consommation d'oxygène avec ce qui fut

Figure 9

Couverture de l'ouvrage *Muscular movement in man* d'Archibald Vivian Hill (1927).



longtemps la méthode de référence des sacs de Douglas (figures 5 et 6) qui sont de grands sacs de caoutchouc naturel d'une capacité de 100 litres correspondant à une

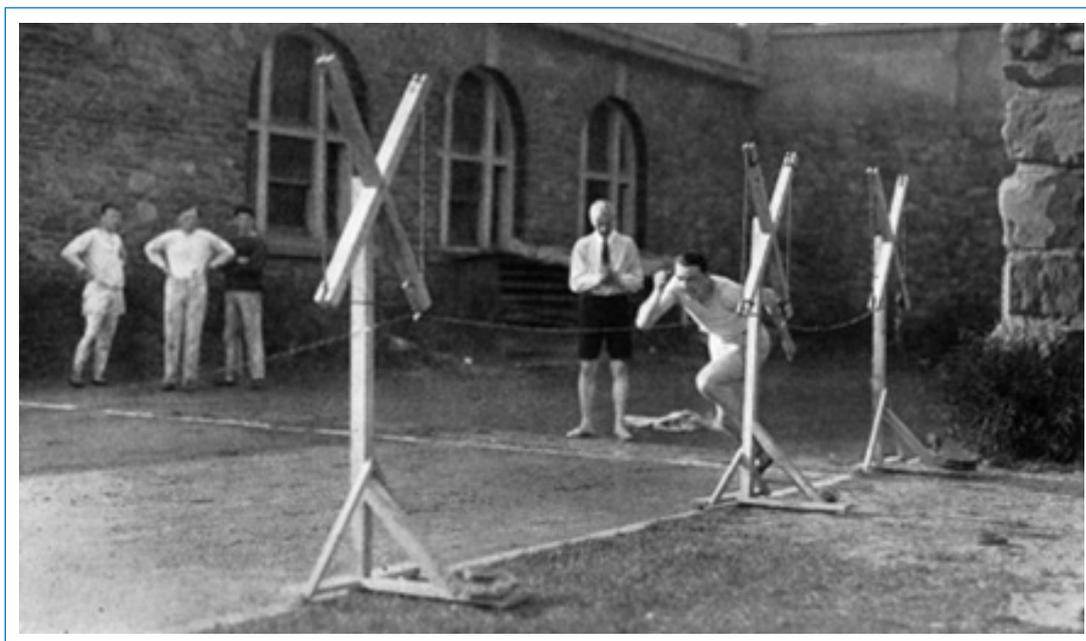
durée de 40 secondes pour un débit ventilatoire de $150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (valeur courante à des niveaux de consommation d'oxygène de $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, puisque nous ventilons environ 35 fois le volume d'oxygène que nous consommons).

Il observe (vous pouvez le faire avec lui) que le dernier palier de vitesse ne permet pas d'état stable réel de la consommation d'oxygène au cours du temps et que ce dernier palier montre une valeur maximale de $\dot{V}O_2$: le concept de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ est né. Il démontre, avant l'heure, l'existence d'une composante lente d'ajustement de la consommation d'oxygène qui fera l'objet de centaines de publications entre 1995 et 2005.

En effet, trois quarts de siècle plus tard, la composante lente était étudiée en la provoquant sous l'effet de l'intensité, de la durée, des produits ingérés modifiant le pH sanguin ou l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène. Nous reviendrons sur ce concept qui a même rassemblé un groupe d'intérêt scientifique international : l'Oxygen Kinetics Group animé par des collègues anglais et américains (Andrew Jones de Manchester et David Poole du Kansas). Le coureur en question n'était pas un étudiant en post-doc mais un titulaire du prix Nobel de physiologie et médecine : Archibald Vivian Hill, qui avait obtenu le prix Nobel de l'année pour avoir mis en évidence la production de chaleur par la contraction musculaire (pendant et après la contraction). La même année, il avait démontré que le muscle pouvait se contracter pendant un court laps de temps

Figure 10

Les premières mesures de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ en situation réelle à l'arrêt entre les intervalles de course (Hill, *Muscular movement in man*, 1927).



sans oxygène en contractant une dette mais qu'il devait ensuite recourir aux oxydations grâce à l'acide lactique. Il ne connaissait pas l'existence de l'adénosine triphosphate ni de la créatine phosphate découvertes en 1930 (figure 11).

En effet, Lundsgaard démontrait, en infusant un inhibiteur de la production d'acide lactique, que le muscle se contractait grâce à un composé phosphate (la créatine phosphate) et il décrivait alors la contraction anaérobie alactique (figure 11).

Hill et Meyerhoff voulurent alors rendre leur prix Nobel et déclaraient la phrase somptueuse que tout humain pourrait faire sienne avec sagesse (voir en anglais dans le texte en figure 12) :

« Nous avons parfois raison et souvent tort. »

La même année, il publiait avec H. Lupton au sein de *The Physiological Society* (la Société de physiologie) un article intitulé « The oxygen consumption during running » (Hill et Lupton, 1922) qui décrit les données évoquées précédemment de $\dot{V}O_2$ mesurées au cours de ces paliers de vitesse de 4 minutes. Hill avait donc une consommation maximale d'oxygène de $57 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ($4,175 \text{ L.mn}^{-1}$ pour un poids de 73 kg). Il suppose qu'il est possible d'atteindre des valeurs supérieures pour des athlètes entraînés. Cet article est le premier qui fait référence au concept de consommation maximale d'oxygène jamais enregistrée... La mesure de la consommation d'oxygène a débuté sur tapis roulant grâce au physiologiste Zuntz qui avait lui-même élaboré l'ergomètre qui sera utilisé pendant de longues années (Gunga, *Nathan Zuntz his Life and work in the fields of high altitude physiology and aviation medicine*, Academic Press, Burlington, MA, 2009).

La première bicyclette ergométrique avait été élaborée par un physiologiste français en 1896 (E. Bouny) qui publia un article intitulé « Mesure du travail dépensé dans l'emploi de la bicyclette » (Paris, Académie des Sciences,

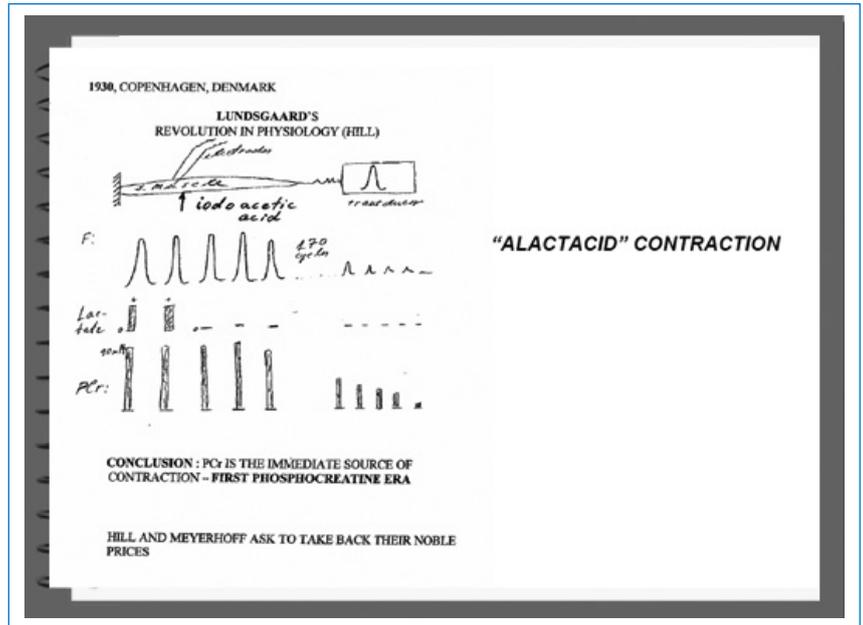


Figure 11

Description par Hill (1932, « Revolution in muscle physiology », *Physiological Review*, 12,56-67, 1932) de la contraction anaérobie alactique (Lundsgaard, 1930).

1896). Cette bicyclette a même été améliorée par Benedict et Cady en 1912 (figure 2) qui remplaça le frein mécanique par un frein électromagnétique. Ces ergomètres étaient déjà très précis si l'on en juge les ratios consommation d'oxygène/Watts rapportés dans les articles de l'époque. Benedict et Cady mesuraient, déjà depuis 1912, le $\dot{V}O_2$ sur leur tapis roulant. Les Européens étaient en pointe dans le domaine de la physiologie de l'exercice dans ces années 1900-1930 avec les suédois Liljestrand et Stenstrom qui avaient même réalisé des mesures en ski de fond (figure 13) démontrant de grandes valeurs de $\dot{V}O_2\text{max}$ dès 1920 (Liljestrand et Stenstrom, 1920).

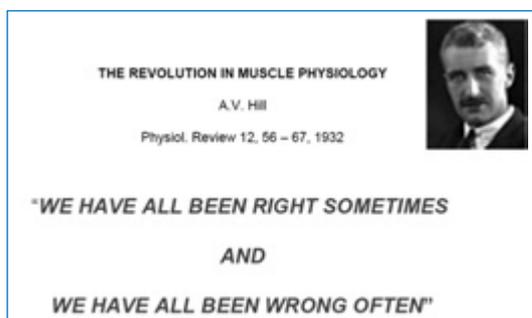


Figure 12

La phrase homérique de Hill qui voulut rendre son prix Nobel après que la contraction anaérobie alactique a été décrite par Einar Lundsgaard en 1930.

Figure 13

Mesure de la consommation d'oxygène en ski de fond avec sac de Douglas (Liljestrand et Stenstrom, 1920).



Ils rapportaient même des chutes de $\dot{V}O_2$ en fin d'exercice, observées à partir d'une certaine vitesse pour laquelle un plateau de $\dot{V}O_2$ était insoutenable, mais soulignons que tous les modèles d'exercice de l'époque, et encore pour bien longtemps, étaient des exercices à vitesse constante avec des paliers de 2 à 40 minutes.

Cette chute de $\dot{V}O_2$ de fin d'exercice était cinquante ans plus tard expliquée par la chute de la saturation du sang artérielle en oxygène due à un mauvais rapport ventilation/perfusion pulmonaire décrit au chapitre des facteurs limitants de $\dot{V}O_2$ max. Hill et Lupton avaient repris tous ces résultats en s'intéressant à cette chute de $\dot{V}O_2$ et à la cinétique d'ajustement de la consommation d'oxygène en début d'exercice. L'originalité de leur recherche fut d'avoir une démarche écologique de l'analyse de la consommation d'oxygène puis, plus tard, de la force, dans des courses en situation réelle de terrain. Hill a d'ailleurs malicieusement repris l'ensemble de ses travaux dans une autobiographie méta-analytique qu'il a intitulé *Trails and trials* (« Chemins et essais ») (Hill, 1966) alors qu'il a effectivement beaucoup cherché le chemin d'analyse de la performance humaine dans une véritable démarche expérimentale de terrain qui était complétée par une analyse mathématique débouchant sur une modélisation de l'énergétique humaine. L'article intitulé : « The air resistance to a runner » (Hill, 1928) dans le *Journal of the Royal Society* était la référence en matière de physiologie de l'époque. L'école de physiologie anglaise appliquée à l'exercice était en pointe et l'est toujours actuellement avec une imbrication entre le monde des chercheurs et celui des sportifs. Les entraîneurs sont formés à l'université depuis trente ans au sein de cursus de sciences du sport avec des dominantes et des travaux pratiques en physiologie et biomécanique. On peut citer Manchester mais également Exeter, Liverpool, Loughborough. Les grandes équipes de football travaillent désormais avec des universitaires et accueillent en stage les étudiants en master pour analyser les déplacements en match à l'aide de logiciels, mis en œuvre voici déjà plus de quinze ans et à présent très répandus.

On voit donc que les origines de la consommation maximale d'oxygène sont européennes, à forte valence anglaise. De plus, à l'époque foisonnante de ce début de XX^e siècle, Hill avait initialement reçu une solide formation en mathématiques à Cambridge où il avait décroché en 1907 (21 ans) sa licence de mathématiques. En 1910, il recevait une bourse en physiologie au prestigieux Trinity College et débutait

des études classiques de biophysique et biochimie sur la contraction musculaire (spécialité qui lui a permis de décrocher en 1922, seulement douze ans plus tard, le prix Nobel de physiologie et médecine).

Entre 1920 et 1923, il avait une chaire de physiologie à Manchester et débutait ses travaux sur l'homme réalisant un exercice musculaire sévère (supérieur à la vitesse d'un 10 km en course à pied, soit en moyenne 85 % de la vitesse à $\dot{V}O_2$ max qui va solliciter entre 85 et 100 % de $\dot{V}O_2$ max). Hill et Lupton confirmaient l'existence d'une chute de $\dot{V}O_2$ à l'exercice intense de 2 à 4 minutes en soulignant que cela ne signifiait pas pour autant une amélioration du rendement musculaire, puisqu'ils montraient en parallèle l'augmentation de la concentration sanguine en acide lactique. Hill développe le concept de dette d'oxygène à la lecture de cette phrase clef : « *From such considerations we see that it is no wonder that the maximum oxygen consumption for a human subject is strictly limited : the wonder is rather that it can attain the values it does.* » Pour Hill, l'important n'est pas de savoir si la consommation d'oxygène est limitée mais s'il consomme le $\dot{V}O_2$ dont il a besoin pour différer la fatigue par l'utilisation du métabolisme anaérobie et l'acidose.

Anecdote amusante et utile : Hill était le gendre de John Maynard Keynes, le grand économiste des années 1920, qui prônait une régulation économique capitaliste par les états. Le nouveau keynésianisme en la personne de Joseph Stiglitz, Georges Akerlof et Michael Spence, qui ont partagé le prix Nobel d'économie en 2001, ont démontré que les marchés ne pouvaient être régulateurs des dettes de par l'asymétrie d'information (dont la caricature est le délit d'initiés sur les marchés). Keynes prônait une démarche volontariste des états pour compenser les délires de la finance et de ses marchés à haute fréquence, de ses ventes à crédits spéculatifs, et ainsi tenter de juguler des dettes abyssales engendrées par une fuite en avant des marchés due à l'endettement des ménages, et enfin des pays. De ces concepts, qui ont engendré la macroéconomie, on peut en déduire la possibilité de politiques économiques interventionnistes de l'État afin d'éviter les récessions et de freiner les emballements de l'économie. Pour les **keynésiens**, il existe une tendance permanente au sous-emploi, et seules les interventions de l'État permettent, dans certaines circonstances, de lutter contre le chômage.

Ainsi, ne pas avoir de dette d'oxygène pendant l'effort est révélateur d'une idée de

Encart 1

Déficit d'oxygène

Si vous courez un 400 m en 1 minute avec une consommation maximale d'oxygène de $60 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, compte tenu du coût énergétique de la course qui requiert $3,5 \text{ mL d'O}_2$ par minute et par kilogramme pour chaque kilomètre/heure de vitesse de course supérieure à la vitesse associée à $\dot{V}O_2\text{max}$, soit $\dot{V}O_2\text{max}$ (correspondant à la $\dot{V}O_2$ basale d'une personne et à la pente de la relation $\dot{V}O_2$ en $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ /vitesse en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), vous aurez une $\dot{V}O_2 = 60/3,5 = 17 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et donc un déficit d'oxygène proportionnel à la différence de vitesse entre la vitesse du 400 m (400 m en 1 minute = $24 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), soit un déficit de vitesse = $24 - 17 = 7 \text{ km/h}$, le coureur couvrant son 400 m à $24/17 = 140 \%$ de $\dot{V}O_2\text{max}$. La demande énergétique de ce différentiel de vitesse représente avec un déficit de $\dot{V}O_2$ égal à $7 \times 3,5$ environ $25 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ de $\dot{V}O_2$ non consommé. Il se trouve que l'exercice (la course de 400 m) dure précisément 1 minute dans notre exemple. Le déficit accumulé qui est le produit du déficit de puissance aérobie (déficit $\dot{V}O_2$) par la durée de l'exercice (1 minute) = $25 \times 1 = 25 \text{ mL d'O}_2 = \text{VO}_2$ (sans point sur le V car il s'agit d'un volume, et non d'un débit dont le point indique un volume utilisé par minute : $\dot{V}O_2$). Ce déficit de 25 mL d'O_2 est donc couvert par les réserves de phosphocréatine qui représente $16 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}$. Au bilan, il reste $25 - 16 = 9 \text{ mL d'O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ à combler avec le métabolisme anaérobie lactique induisant donc une accumulation lactique de seulement $9/2,7 = 3,3 \text{ mM}$. Au-delà de $18\text{-}20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, la

résistance de l'air augmente la dépense énergétique du mètre (distance) à la puissance 2,8 de la vitesse, ce qui représente une augmentation de la puissance requise de 3,8 pour un temps de course donné. Par conséquent, la projection d'un coût énergétique standard de $3,5 \text{ mL d'O}_2$ par kilogramme et par minute, par augmentation de la vitesse de $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ est sous-estimée et il faut retenir qu'une minute d'exercice maximal requiert autant d'énergie aérobie que d'énergie anaérobie. Pour des durées supérieures à 1 minute, la fourniture énergétique aérobie est majoritaire et l'anaérobie minoritaire, mais cette vue est obsolète puisqu'il faut à présent considérer que tous les métabolismes sont nécessaires, dès le début de l'exercice, à leur plus haut débit possible. Plutôt de considérer l'intégral énergétique (le travail, la dépense énergétique) sous la courbe de puissance, il est plus pertinent de considérer la dérivée par le temps, c'est-à-dire la variation, par unité de temps d'exercice, de la puissance, la variation de la consommation d'oxygène, donc sa cinétique. Mais là encore, les modèles d'exercice sont souvent des modèles à vitesse constante (sur tapis roulant) ou à vitesse moyenne constitués d'une succession de variation de vitesses qui ne sont pas prises en compte. Nous reviendrons sur la notion de variations de vitesse et $\dot{V}O_2\text{max}$ dérivé par le temps : ($\ddot{V}O_2\text{max}$) et sur l'importance de la prise en compte des variations de vitesse et des cinétiques de $\dot{V}O_2$ pour envisager un gain performance.

constante raisonnable, d'homéostasie (équilibre du milieu intérieur) par état stable parfait. Les modèles d'exercice à vitesses variées alternant la vitesse supra-maximale (au-delà de la vitesse d'état stable maximal de la consommation d'oxygène $\dot{V}O_2\text{max}$, voire même 90 % de $\dot{V}O_2\text{max}$ pour éviter la composante lente de la cinétique de $\dot{V}O_2$ ou même l'accumulation lactique ou encore la chute de $\dot{V}O_2$) n'étaient pas envisagés. Le consensus reste actuellement que les records sont en parfait état stable physiologique sans oscillations possibles. Et si les records étaient le résultat d'un changement d'état énergétique obtenu par stimulation supra-maximale dans un régime de force et de vitesse qui permet de produire de la masse protéique ? Masse et énergie ne sont que la seule dimension de l'énergie de l'homme.

À cette époque, ainsi que nous l'avons évoqué, la phosphocréatine n'était pas encore connue, il faudra attendre 1930 avec Lundsgaard et Lohmann, respectivement suédois et allemand.

Cette baisse de la consommation d'oxygène est considérée comme un témoin du dépassement du métabolisme aérobie pour la fourniture de l'énergie par unité de temps de course (la puissance). Il écrit que le métabolisme anaérobie (lactique donc) supplée ce manque en comblant le déficit d'oxygène (encart 1). L'ATP et la phosphocréatine n'étant pas connues, l'équivalent énergétique de l'acide lactique accumulé était surestimé. Nous savons depuis les années 1930, grâce à Margaria, grand leader de l'école de physiologie italienne, milanaise puis de ses élèves Paolo Cerretelli et le fameux Conte d'Udine (Italie), Pietro Eugene di Prampero, que 1 mM de lactate accumulé représente $2,7 \text{ mL}$ de $\dot{V}O_2$ par kilogramme de poids de corps (voir les applications encart 1).

Sur la piste de 85 m de l'université (92,5 yards, 1 yard = 3 pieds = 0,9144 m), Hill avait même mis en place, avec ses connaissances en physiques, un ingénieux système électromagnétique (afin d'éliminer l'écart d'intervalle

de temps dû à la sortie des starting-blocks) qui permettait de donner les temps de passage tous les 25 yards (23 m). Il observait déjà des variations de vitesse conséquentes sur un 60 yards de l'ordre de 25 % entre le 10^e et le 60^e yard (Hill, *Muscular movement in man*, 1927). Il est dommage que Hill n'ait pas eu l'idée de mesurer le $\dot{V}O_2$ sur une épreuve de sprint avec ses fameux sacs de Douglas et ce même au terme d'un 100 yards en utilisant la cinétique de la baisse de $\dot{V}O_2$ en fin d'exercice, en extrapolant à $t = 0$ (méthode de rétro-extrapolation couramment utilisée dans les années 1975-85 en natation pour estimer $\dot{V}O_2$ au terme d'un 400 m nagé à vitesse maximale, avant que le K4b2[®] aquatique ne fût son apparition dans les années 1990.

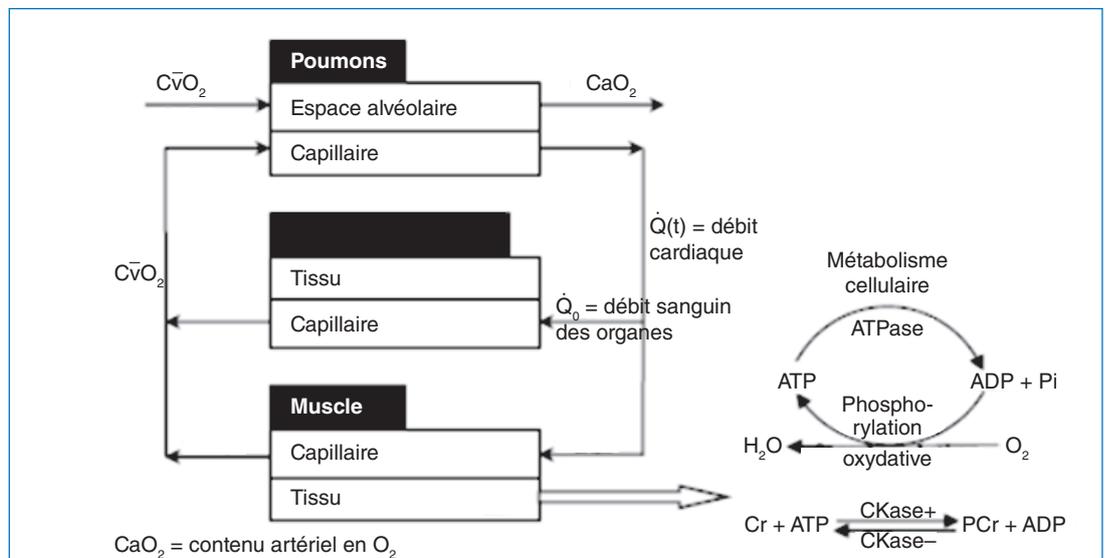
Le K4b2[®] a été mis au point par l'entreprise familiale italienne Cosmed : l'Italie étant très forte dans sa capacité à établir des synergies entre les mondes de l'entreprise, de l'ingénierie, de l'université et de la médecine. La médecine du sport y est d'ailleurs une véritable spécialité médicale au même titre que la cardiologie au terme de trois ans d'études supplémentaires. On peut d'ailleurs citer le fameux Antonio Dal Monte, médecin du Comité olympique national italien, chercheur mais également brillant ingénieur qui avait même le don de designer des voitures pour Lancia... Sa grande passion : les trains électriques qui envahissaient l'équivalent d'un appartement sur les terrasses avec vue sur la mer Méditerranée dans l'antique port de Rome. Rêvons un peu dans ce monde de bio-énergétique et de sueurs... La technologie nous a permis de faire avancer nos concepts physiologiques et donc d'entraînement. Cependant, nous sommes à présent envahis d'outils performants

(accéléromètres pour mesurer les fréquences de foulée et la vitesse, GPS, ceinture pour la fréquence cardiaque et même la fréquence respiratoire) sans offrir les concepts de la base théorique qui va permettre d'exploiter ces données physiologiques et biomécaniques.

À cette fin, il nous faut revenir à l'origine de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ qui est la base de la théorie de l'entraînement. Retrouvons Hill qui fut le premier scientifique à travailler sur la performance humaine. Imaginez qu'aujourd'hui un prix Nobel de médecine se passionne pour la compréhension du substratum physiologique de la performance du 100 m au 10 km, il pourrait passer pour ridicule. Hill a rencontré des détracteurs auxquels il a répondu avec l'humour anglais qui le caractérisa tout au long de sa longue vie et carrière (1886-1977). Il répondit notamment à un auditeurs, lors de la fameuse « lecture à l'université Franklin de Philadelphie » (États Unis), en 1924, qui l'interpellait sur l'utilité de son travail sur le sport que : « *I turned to him with a smile and finished to tell you the truth we don't do it because it is useful but because it's amusing.* » Les journaux titraient le lendemain que les scientifiques le font par amusement. Nous étions entre-deux-guerres, à l'orée de la crise de 1929, et Hill s'amusait. Il était invité comme professeur non résident dans le département de chimie de l'université de Cornell. Il avait décrété que l'athlète était un merveilleux sujet d'étude de chimie (biochimie) et avait profité pour travailler sur l'athlétisme avec des athlètes entraînés. Il écrivait que l'homme devait travailler avec cette machine intelligente qu'est le corps. On peut encore déceler là une idée d'avant-garde si l'on en juge le programme « Énergie 2050 », mis en

Figure 14

Représentation schématique de l'utilisation et du transport de l'oxygène entre poumons et muscles.



place par les industriels dont Renault ou Safran, qui s'inspire du biomimétisme pour optimiser les moteurs d'hélicoptère et de voiture. À l'époque, on lui demandait pourquoi il s'intéressait à l'athlétisme plutôt qu'à la maladie ou aux questions industrielles. Il répondait que :

- la performance athlétique est simple et mesurable, assez reproductible et réalisée au maximum de la puissance énergétique humaine (dans le sens d'optimale) ;
- les athlètes eux-mêmes étant en état d'équilibre dynamique dans le sens de bonne santé peuvent être investigués sans danger et répéter leur performance de la même façon, encore et encore. De plus, outre que cela soit amusant pour le chercheur, cela pouvait l'être (il l'espérait) pour le sportif lui-même. Il introduisait alors la notion d'équilibre dynamique de l'athlète. Curieusement il n'a jamais travaillé sur les transformations physiologiques consécutives à la répétition d'exercices et n'a jamais étudié les effets de l'entraînement sur la consommation d'oxygène, la force et le rendement énergétique qui pourtant le passionnaient.

Il recense donc les facteurs déterminants de $\dot{V}O_2\text{max}$ que nous vous transcrivons littéralement car chaque mot a son importance. Nous pouvons d'ores et déjà constater que ces facteurs sont ceux encore envisagés actuellement avec des arguments se fondant sur des techniques de

mesures plus poussées, avec la perspective de repousser, dépasser ces limites, ce qui donne un nouveau ton au débat.

Hill recense donc les facteurs non pas limitants mais déterminants de $\dot{V}O_2\text{max}$; il essaie de comprendre ce que l'on consomme dans l'instant en abordant la cascade de l'oxygène des poumons aux muscles (figures 14 et 15).

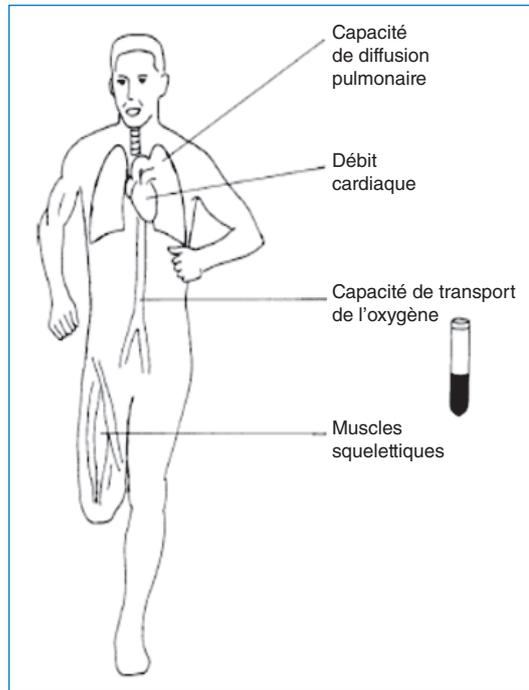


Figure 15

Cascade de l'apport d'oxygène, de sa consommation et les facteurs limitants de $\dot{V}O_2\text{max}$.

Encart 2

Équation de Fick liant métabolisme, débit cardiaque et utilisation périphérique de l'oxygène

Selon le principe de Fick, il y a égalité entre la quantité d'oxygène captée par les poumons dans un temps donné et celle fixée par le sang dans le même temps.

La quantité d'oxygène captée par les poumons en 1 minute correspond à la consommation d'oxygène ou $\dot{V}O_2$ ($L \cdot \text{min}^{-1}$).

La quantité d'oxygène fixée par le sang ($\dot{Q}O_2$) en 1 minute est égale au produit de la différence entre les contenus artériels (CaO_2) et veineux mêlés ($C\bar{v}O_2$) en oxygène par le débit cardiaque \dot{Q} soit :

$$\dot{Q}O_2 = O_2 \text{ total/min} - O_2 \text{ restant/min,}$$

$$\text{donc } \dot{Q}O_2 = \dot{Q} \times [CaO_2 - C\bar{v}O_2].$$

Selon le principe de Fick : $\dot{Q}O_2 = \dot{V}O_2$,

$$\text{donc } \dot{V}O_2 \text{ (mL} \cdot \text{min}^{-1}\text{)} = \dot{Q} \times [CaO_2 - C\bar{v}O_2],$$

cette dernière équation étant connue comme étant l'équation de Fick.

\dot{Q} (mL/min) = FC (bpm) \times VES (mL/bt), avec : bpm pour battements par minute ; FC pour fréquence cardiaque en battements par minute (bpm) ; VES pour le volume d'éjection systolique en millilitre (mL par battement), et où $[CaO_2 - C\bar{v}O_2]$ (mL) est la différence artérioveineuse.

Sachant que le volume d'éjection systolique, à son tour, est le produit du volume de fin de diastole (VFD) par la fraction d'éjection (FE). On peut alors présenter et utiliser l'équation de Fick de plusieurs façons. Chacune des versions de l'équation

Suite Encart 2

de base permettra d'insister sur tel ou tel paramètre de la fonction cardiocirculatoire déterminant de la consommation d'oxygène.

$$\dot{V}O_2 = \dot{Q} \times [CaO_2 - C\bar{v}O_2],$$

$$\text{or } \dot{Q} = VES \times FC,$$

donc :

$$\dot{V}O_2 = (VES \times FC) \times [CaO_2 - C\bar{v}O_2],$$

comme $VES = VTD \times FE$, on a :

$$\dot{V}O_2 = (VTD \times FE) \times FC \times [CaO_2 - C\bar{v}O_2],$$

$$\text{ou bien : } \dot{V}O_2 / \dot{Q} = [CaO_2 - C\bar{v}O_2],$$

$$\dot{Q} = \dot{V}O_2 / [CaO_2 - C\bar{v}O_2].$$

- $\dot{V}O_2$ (l/min) peut être exprimé en valeur absolue (en l/min) ou relative au poids de corps pour pouvoir comparer des sujets de différents gabarits (en mL d'O₂/kg/min).
- VO_2 (l) = volume (et non débit) d'oxygène total consommé lors d'une période connue : le VO_2 d'un coureur ayant couru 5 minutes à sa consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max = 4 l/min) aura consommé un volume d'oxygène total de : 4 l/min × 5 min = 20 l, soit pour un équivalent énergétique d'un litre d'oxygène égal à 21 kJoules, le sportif aura dépensé 20 × 21 kJoules = 420 kJoules = 420/4,18 ≈ 100 kcal (lorsque le sportif utilise exclusivement des glucides). Le point inscrit au-dessus du Q ou du V indique qu'il s'agit de volumes rapportés au temps, c'est-à-dire de débits.
- La différence artérioveineuse [$CaO_2 - C\bar{v}O_2$] est la différence de contenu en oxygène entre le sang artériel (20 mL pour 100 mL de sang) et le contenu en oxygène du sang veineux (16 mL). Il s'agit de sang veineux mêlé (mélange des différents sangs veineux arrivant dans l'oreillette droite). Alors que le sportif accomplit un exercice de plus en plus intense, ses cellules

musculaires extraient de plus en plus d'oxygène à partir du sang artériel, laissant moins d'oxygène dans le sang veineux. En effet, plus d'oxygène est extrait du lit capillaire, moins d'oxygène restera dans le sang veineux. En résumé, plus l'exercice est intense, jusqu'à 100 % de $\dot{V}O_2$ max, plus le contenu veineux en oxygène ($C\bar{v}O_2$) est faible. Sachant que le contenu artériel en oxygène (CaO_2) est toujours de 20 mL/100 mL, la différence artérioveineuse [$CaO_2 - \bar{v}O_2$] augmente par la baisse de $C\bar{v}O_2$ qui peut s'abaisser jusqu'à 4 mL/100 mL, [$CaO_2 - C\bar{v}O_2$] = 20/100 - 4/100 = 16 mL/100 mL, soit 16 mL d'O₂ utilisé par 100 mL de sang apportés aux tissus (les plus grands utilisateurs étant, à l'exercice, les muscles).

C'est pourquoi la différence de contenu artérioveineux en oxygène qui augmente avec l'intensité de l'exercice va être un élément déterminant de la consommation maximale d'oxygène.

Une augmentation de la différence artérioveineuse signifie que davantage d'oxygène a été prélevé dans le sang artériel pour satisfaire au métabolisme accru des muscles à l'exercice. Ainsi, à l'effort, le sang veineux est d'autant plus appauvri en oxygène, et l'augmentation de la différence artérioveineuse est due à la baisse en oxygène du contenu veineux.

- Le pouls d'oxygène (pouls d'O₂) est le rapport entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque, ce qui correspond à la quantité d'oxygène consommée pour chaque battement cardiaque (bt) : Pouls d'oxygène (mL d'O₂/bt) = $\dot{V}O_2 / FC$.

Pour un sportif de 20 ans, les valeurs normales du pouls d'oxygène sont de 4-5 mL/bt au repos. La valeur maximale du pouls d'oxygène pour une fréquence cardiaque maximale de 200 bpm à une consommation maximale d'oxygène de 5 litres par minute sera de :

$$\dot{V}O_2 \text{ max} / FC = 5\,000 \text{ mL} / 200 = 25 \text{ mL/bt (quantité d'oxygène consommée à chaque battement cardiaque).}$$

Hill considère les facteurs suivants comme étant déterminants de la consommation d'oxygène qu'il classe en quatre catégories (Hill *et al.*, 1924) :

- **la pression partielle de l'oxygène dans les poumons** : il constate qu'en respirant profondément, $\dot{V}O_2$ augmente légèrement mais si on donne à inhaler un air enrichi en oxygène de telle sorte que la fraction de l'oxygène inspirée passe de 20,9 % (FIO_2 normale quelle que soit l'altitude)

à une FIO_2 à 100 % (hyperoxie), $\dot{V}O_2$ augmente de façon « considérable ». Il l'explique par le fait que l'augmentation de la pression partielle permet une accélération de la diffusion de l'oxygène de la membrane pulmonaire vers le capillaire sanguin ;

- **la capacité de transport de l'oxygène dans le sang** : il avait déjà mesuré que le contenu artériel en oxygène (CaO_2) (encart 2) à la valeur de 18,5 mL

d'oxygène pour 100 mL de sang (à condition que la saturation de l'hémoglobine artérielle soit de 98 %) (encart 7). En fin d'exercice intense, il est possible d'observer une hypoxémie induite par l'exercice (HIE) que nous évoquerons à nouveau dans le chapitre sur les facteurs limitants de $\dot{V}O_2\text{max}$ débattus actuellement. Il avait déjà constaté qu'après un séjour en altitude à 15 000 pieds (4 572 m comme à Pikes Peak dans le Colorado) (1 pied = 12 pouces soit 30,48 cm), le contenu artériel en oxygène (qui dépend de la teneur du sang en hémoglobine et de la saturation de celle-ci en oxygène) augmentait jusqu'à 40 % (il n'évoquait pas le fait que la viscosité du sang accrue limitait sa vitesse d'écoulement et par conséquent celle du débit cardiaque). Pour la première fois, Hill aborde la question de l'entraînement en suggérant la possibilité d'augmenter CaO_2 par un entraînement à 8 000 ou 9 000 pieds (2 400-2 500 m) sans en préciser les mécanismes. Il suggérait que cette altitude limite était compatible avec une bonne récupération et une vitesse d'entraînement encore proche de celle des vitesses de compétitions en plaine. Mais nous savons actuellement que la question n'est pas de s'entraîner en altitude pour augmenter CaO_2 mais de pouvoir augmenter la force et la puissance musculaire (qui est le produit de la force par la vitesse de la contraction musculaire) ;

- **le coefficient d'utilisation de l'oxygène sanguin** : la totalité du contenu artériel de l'oxygène n'est pas entièrement extraite et utilisée à son passage à travers la cellule musculaire. Le débit cardiaque est si élevé (Hill l'avait déjà estimé à 30 L.min⁻¹, ce qui est une valeur exacte) que le temps de passage du sang dans les muscles est très court. Par conséquent, le contenu veineux en oxygène de retour dans le cœur droit est encore de 25 % (25 mL d'oxygène transporté dans 100 mL de sang veineux). Hill avait décrit la formation et l'ouverture d'un vaste lit capillaire, *capillary bed*, dans les tissus actifs permettant de ralentir le temps de passage du sang et favoriser les échanges d'oxygène sang/cellule musculaires. Cependant, Hill estime que 70 % de coefficient d'utilisation du contenu artériel en oxygène est la valeur limite probable. Nous savons à présent

que, lorsque le sujet est à $\dot{V}O_2\text{max}$, cette valeur est de $18 - 4 = 14$ et $14/18 = 77\%$. En effet, $C\bar{v}O_2 = 4$ mL d' O_2 /100 mL de sang ; $CaO_2 = 18$ mL d' O_2 /100 mL de sang (encart 2). Donc la différence artérioveineuse en oxygène est de $18 - 4 = 14$ mL d' O_2 /100 mL de sang soit $14/18 = 77\%$ de coefficient d'utilisation de l'oxygène par les tissus ;

- **le « volume par minute » du cœur, soit le débit cardiaque (encart 2)** : Hill déclare qu'il est facile de calculer que ce débit cardiaque maximal doit être « enormous ». « *It is easy to calculate how enormous this must be.* » Il calcule que pour un rameur dont il a mesuré le $\dot{V}O_2\text{max}$ à 4,4 L.min⁻¹ avec CaO_2 estimé à 18,5 % et un coefficient d'utilisation de 70 % de CaO_2 ($CaO_2 - C\bar{v}O_2$) = $18,5 \times 0,7 = 12,6\%$, étant donné que selon l'équation de Fick (encart 2) : $\dot{V}O_2$ (L.min⁻¹) = \dot{Q} (débit cardiaque en L.min⁻¹) \times ($CaO_2 - C\bar{v}O_2$), \dot{Q} (débit cardiaque en L.min⁻¹) = $\dot{V}O_2 / (CaO_2 - C\bar{v}O_2)$.

Application : $\dot{Q} = (4,4/12,6) \times 100 = 34,9$ L.min⁻¹.

Il souligne le fait que le débit sanguin à l'effort augmente de 7 fois par rapport à la valeur de repos grâce à l'augmentation de la fréquence cardiaque ($\times 3$) et celle du volume d'éjection systolique ($\times 1,5$ à 2,5 selon le niveau de $\dot{V}O_2\text{max}$ des sujets). Par conséquent, l'ensemble de la masse sanguine corporelle passe 7 fois par minute dans le cœur humain. Il rappelle que si l'on compte le cœur droit et le cœur gauche, le sang veineux arrive par le cœur droit puis va au poumon et revient oxygéné par le cœur gauche pour être enfin expulsé du ventricule gauche par l'aorte. Donc, il calcule que le cœur a un débit total droit + gauche du double du débit cardiaque total, soit près de 75 L.min⁻¹. On mesurera plus tard et on confirmera ces données en ajoutant le calcul de la consommation d'oxygène du muscle cardiaque (le myocarde) qui ne pèse que 1 pound (454 g) (soit moins de 7 % du poids du corps) et peut consommer jusqu'à 20 % de $\dot{V}O_2\text{max}$. La consommation d'oxygène du myocarde peut être estimée par ce que l'on appelle le « double produit » qui est le produit de la pression artérielle moyenne par la fréquence cardiaque. Nous y reviendrons ultérieurement en abordant les facteurs limitants de $\dot{V}O_2\text{max}$.

Mais Hill a déjà tenté de calculer le travail mécanique réalisé par le muscle cardiaque (« *It is possible roughly to calculate the work*

done by the heart during such activity »). Il postule un rendement énergétique de 20 % (rapport entre la consommation d'oxygène du myocarde et son travail mécanique à partir de la force de contraction et de la modification des dimensions cardiaques), et conclut que « *during such activity the heart is consuming as much oxygen as the whole body do when at rest* ».

Effectivement le cœur consomme autant d'oxygène que pour le fonctionnement de l'organisme entier au repos. En fait, Hill est en dessous de la réalité si l'on considère que le métabolisme consomme 12 fois plus d'oxygène pour un $\dot{V}O_{2\text{max}}$ de $70 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ (le cas de notre rameur qui a un $\dot{V}O_{2\text{max}}$ de $4,4 \text{ L.min}^{-1}$ pour 70 kg de poids de corps puisque $4\,400/70 = 62 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$). Or, si l'on prend 20 % d'un métabolisme augmenté de 12 fois, on obtient un $\dot{V}O_2$ cardiaque qui représente $12 \times 0,2 = 2,4$ soit au-delà de deux fois le métabolisme de repos. Cependant Hill a peut-être retenu comme référence, non pas le $\dot{V}O_2$ de notre rameur au repos, mais celui qu'il a dans son skiff sur la ligne de départ, sur la Tamise, avec la promesse d'arriver sous les yeux bienveillants de la reine. En effet, à présent nous savons qu'une anticipation de l'exercice déclenche des cycles énergétiques dits « futiles » car ils produisent de la chaleur et un produit mécanique nul, sauf si l'on se place à une plus grande échelle, c'est-à-dire si l'on détaille davantage notre analyse au niveau des organes et non pas de l'organisme entier. La rapidité des réactions enzymatiques nécessite une température intramusculaire proche de 38°C . Lorsque le sujet est au niveau du métabolisme de repos, la vitesse du cycle sera très basse.

Cependant, l'anticipation d'un exercice intense permettrait, selon Newsholme (Newsholme, 1986), d'augmenter la vitesse du cycle (cycles appelés futiles puisque ne produisant pas d'ATP et tournant à vide en attendant que l'exercice ne débute [figures 16 a, b et c]).

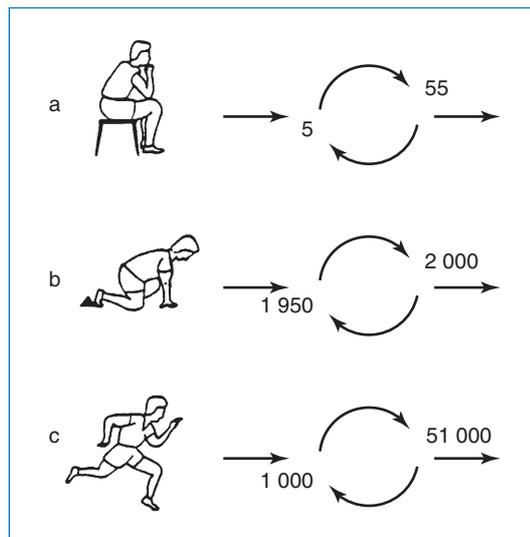
La flèche supérieure représente l'action de l'enzyme phosphofructokinase et la flèche inférieure celle de l'enzyme fructose-bisphosphatase. Le flux résultant est la différence entre les débits des deux réactions.

Ces cycles permettraient d'augmenter la sensibilité au changement de concentration des régulateurs de la phosphofructokinase (le fructose 6-phosphate, permettant alors un ajustement plus rapide des réactions enzymatiques, eu égard à l'augmentation de la demande d'ATP par unité de temps de 1 000 fois la valeur de repos). Ainsi, un sprinteur dans ses starting-blocks, outre son échauffement qui le prépare à produire un niveau maximal d'ATP par unité de temps, aura une augmentation du taux sanguin des hormones du stress : l'adrénaline et la noradrénaline. Dès que le sprinteur a démarré, le niveau d'hydrolyse de l'ATP augmente de façon très importante. Cela entraîne une baisse rapide de la concentration en phosphocréatine (permettant au taux d'ATP de se maintenir) et une baisse des citrates avec une augmentation des phosphates, de l'adénosine monophosphate et de l'ammonium (NH_4^+). Par conséquent, la cinétique de la consommation d'oxygène est la variation de $\dot{V}O_2$, c'est-à-dire $\dot{V}O_2$ par le temps sorte « d'accélération du volume d'oxygène consommé $\dot{V}O_2$ sans point sur le V. En effet, $\dot{V}O_2$ est régulé par la rapidité de la baisse de la phosphocréatine, et augmente très vite. Nous avons démontré que les sprinteurs atteignent leur $\dot{V}O_{2\text{max}}$ dès le 30^e mètre d'un 100 m ou d'un 200 m couru à leur vitesse maximale (Billat *et al.*, données personnelles, figures 16 d et e).

Ceci entraîne alors une augmentation à son maximum (rétroaction positive) de l'activité de l'enzyme phosphofructokinase qui permet la dégradation du glucose (la glycolyse, figure 17), favorisant ainsi la resynthèse d'ATP à partir de la glycolyse. Les besoins d'ATP sur le 100 m nécessitent ce « relais » rapide entre la phosphocréatine et la glycolyse (Haris *et al.*, 2012). La haute performance des coureurs de 100 m en moins de 10 secondes dépendrait en partie de la sensibilité du contrôle enzymatique de la glycolyse qui doit être très fine et très rapide (Chay, 1981 ; Conley *et al.*, 2001 ; Lai *et al.*, 2008). L'entraînement au départ peut favoriser, outre les questions de réglage technique, la mise en action métabolique

Figures 16 a, b, c

Changement de la vitesse du cycle futile et de début de la glycolyse. Avec : a. Avant un 100 m ; b. Au départ d'un 100 m ; c. Durant un 100 m.



A

accélération 90, 98, 113
ADN 138
adrénaline 26
âge physiologique 155
Altitrainer 12
apport en oxygène 42
apports en ATP 144
ARN 138
ARN interférent 139
ARN-messager 41
ARN mitochondriaux 74, 139
Astrand, Per-Olof 37, 53
ATP 29
Audit énergétique 116

B

Bassingthwaighe, James 91
Bernard, Claude 30
Berthoz, Alain 132
bilan en radar 115
Borg 49

C

cadence gestuelle 110
calcul de la puissance maximale alactique 125
capacité anaérobie 68
cascade de l'oxygène 23
central governor 39, 50
chambre calorimétrique 96, 97
Citation Analysis of Sports Medicine Research 59
composante lente 70, 71
concept de vitesse critique 61
concept de vitesse critique intermittent 73
condensateur biochimique 144
constante universelle de gravitation 13
construction d'un hypercube 135
contrôle de l'apport d'oxygène 141
courbe fractale 91
coût cardiaque 118
coût énergétique 59
créatine kinase 42
créatine phosphate 29

critères d'atteinte de $\dot{V}O_2$ max 51
cycle alanine-glucose 133, 134
cycle de Cori 31
cycle de Krebs 28
cycle futile 26
cycles futiles 140

D

Dal Monte, Antonio 22
débit cardiaque \dot{Q} 23
déficit d'oxygène 21, 42
déficit d'oxygène accumulé 69
demande cellulaire en ATP 144
dérivée du moment cinétique 107
détermination des accélérations 148
différence artério-veineuse 87
différence artérioveineuse 23
dimension du Jerk 104
di Prampero, Pietro Enrico 21, 72
dogme central de la bioénergétique 42
 $d\dot{V}O_2/dt$ 108
 $d\dot{V}O_{2,max}/dt$ 131

E

effet Bohr 139, 142
entraînement par l'accélération 119
entropie 33
enzyme phosphofructokinase 140
épigénétique 97
épissage 41
équation de Fick 23
équation de Hill 122
équation de Karvonen 53
équation dite « d'Astrand » 53
équilibre acido-basique 30
équivalent énergétique de l'oxygène 162
espace $\dot{V}O_2$ max en 4D 134
espérance de vie des Français 154
espérance de vie et santé 153
état physiologique en 4D 136
état stable (*steady state*) 30
état stable maximal du lactate 28, 56
ETL (estimation du temps limite) 51, 82
étude longitudinale 156
étude transversale 156

F

FCmax théorique 49
 FIO₂ 39

G

GLUT 4 138
 glycolyse 26
 grandeur scalaire 107

H

hémoglobine 40
 Hill, Archibald Vivian 18
 Hochachka, Peter 99
 homéodynamique 145
 homéostasie 30, 32, 145
 hydrolyse de l'ATP 43
 hypercube 134
 hypoxémie induite par l'exercice 40, 133
 hypoxémie induite par l'exercice (HIE) 150
 hypoxie 46, 69

I

impact facteur 39
 impulsion 109
in silico 39
 intervalle training 77, 146
in vitro 39
in vivo 39

J

Jerk 103, 104, 151

K

K4b2® 17, 83
 K4b2® aquatique 22
 Keller, Joseph 8, 117
 Keynes, John Maynard 20
 Kushmerick, Martin 145

L

Lavoisier, Antoine-Laurent 11
 Lohmann, Karl 21
 Lundsgaard, Einar 19, 21

M

Mach, Ernst 132
 Mandelbrot, Benoît 91
 Margaria, Rodolpho 21
 MCT 138
 métabolismes 141
 métabolisme 162, 163
 méthode dite « en circuit fermé » 15
 méthode dite « en circuit ouvert » 16
 Meyer, Yves 11, 92
 Meyerhoff, Otto 19
 MLSS 84

modèle catastrophique 50
 modèles d'exponentielles de la cinétique de l'oxygène 70
 moment cinétique 107
 Monod, Hughes 62
 Morton, Hugh 73

N

NAD 31
 NADH 31, 140
 navette phosphocréatine 44
 néoglucogenèse 151
 Noakes, Timothy 39
 nombre de Froude 109
 noradrénaline 26
 normoxie 45, 69

O

objet fractal 90
 oxydation 31
 oxydo-réduction 31

P

paramètres de l'équation de Fick lors d'un 100 m 27
 paramètres de l'équation de Fick lors d'un 200 m 27
 PC' 85
 phlogistique 12
 phosphorylation oxydative 35, 36, 74, 94
 Physioflow® 47, 85, 161
 physiologie fractale 91
 PIO₂ 39
 pneumotachographe 16
 pression partielle de l'oxygène 24
 profil énergétique 126
 profil énergétique personnel 157, 158
 protéines transporteuses du glucose 138
 puissance maximale aérobie 59
 puissance maximale alactique 125
 puissance ou vitesse maximale d'état stable de la lactatémie 58
 pyramide énergétique 155

Q

quantité de mouvement 109
 quotient respiratoire 51, 162

R

radar 158, 159
 radical libre 128
 radicaux oxygénés libres 128
 rapport ventilation-perfusion 45
 Ratings of perceived exertion (RPE) 51
 régénération de l'ATP 43
 registres d'accélération 114
 relation force-vitesse 124
 ribozymes 41
 ROS 128
 RPE 82
 RPE (ratings of perceived exertion) 49
 Rubik's Cube 135

S

sac de Douglas 16
Saks, Vladur 140
Saltin, Bengt 37
SaO₂ 48
saturation de l'hémoglobine en oxygène 48
Scherrer, Jean 62, 68
spiromètre de Tissot 16
suivi longitudinal 154
surentraînement 129
systèmes chaotiques 91

T

temps limite à la vitesse associée à $\dot{V}O_2$ max 67
temps limite à PMA 65
temps limite à VMA 69
temps limite à $\dot{V}O_2$ max 74, 76
temps limite à v $\dot{V}O_2$ max 57
temps limites des accélérations 149
test de force-vitesse 122
test de Luc Léger 58
test de VAMEVAL 101
théorie de la rugosité 91
théorie du Jerk 104
transcription 138
transport de l'oxygène 45
types d'atteinte de $\dot{V}O_2$ max 70

V

VAMEVAL 66
variation de $\dot{V}O_2$ 108
 $\dot{V}CO_2$ 133, 139
v $\Delta 25$ 83
v $\Delta 50$ 75, 83
v $\Delta 75$ 83
v $\Delta 100$ 83
VES 23
Villani, Cédric 11
vitesse associée à $\dot{V}O_2$ max 65, 66
vitesse critique 68, 72
vitesse d'état stable maximal de la lactatémie 57
VMA 38, 59
vMLSS 84
 $\ddot{V}O_2$ 108
 $\ddot{V}O_2$ max 131, 133
voies métaboliques 28
voltage dependent-anion channel (VDAC) 143
volume d'éjection systolique (VES) 23, 47
v $\dot{V}O_2$ max 38

W

Wagner, Peter 37
Wasserman, Karlman 32
Whipp, Brian 32
Wingate 122

Table des matières

Avant-propos	5
--------------------	---

Introduction.....	7
-------------------	---

CHAPITRE 1

Le temps historique de l'invention de $\dot{V}O_2\text{max}$	11
--	----

Encart 1 Déficit d'oxygène	21	Encart 4 L'équilibre acido-basique.....	30
Encart 2 Équation de Fick liant métabolisme, débit cardiaque et utilisation périphérique de l'oxygène	23	Encart 5 Les réactions d'oxydo-réduction et le rôle du NADH (sa navette dans la mitochondrie).....	31
Encart 3 Créatine phosphate et ATP	29	Encart 6 L'augmentation de l'entropie.....	33

CHAPITRE 2

Le temps du débat actuel sur les facteurs limitants de $\dot{V}O_2\text{max}$	35
---	----

Encart 7 L'hémoglobine.....	40	Encart 9 Les réactions de la régénération de l'ATP pour favoriser l'hydrolyse de l'ATP qui est l'objectif final.....	43
Encart 8 La créatine kinase dans la cellule musculaire (myofibrille).....	42		

CHAPITRE 3

L'introduction du temps limite à $\dot{V}O_2\text{max}$	53
---	----

Encart 10 La vitesse d'état stable maximal de la lactatémie.....	57	Encart 11 Concept de vitesse critique.....	61
---	----	--	----

CHAPITRE 4

Le temps du dépassement de $\dot{V}O_2\text{max}$	89
---	----

1. Positionnement du problème.....	89	Encart 13 L'épigénétique	97
Encart 12 Objet fractal.....	90	Encart 14 Email du Pr. Michael MARON.....	102
2. Exercice, fractalité et marathon.....	91	Encart 15 La dimension du Jerk.....	104
3. Exercice et accélération.....	95	Encart 16 Définition de l'impulsion : impulsion et quantité de mouvement	109

CHAPITRE 5

Le temps de l'entraînement	113
---	-----

1. Audit énergétique typique d'un coureur débutant, Xavier	113	2. L'entraînement par l'accélération et la masse : approche empirique innovante, le témoignage de Philippe Dien....	119
Encart 17 Paroles de la chanson <i>Monsieur mon passé</i>	116		

3. La relation et le test de force-vitesse	122	Encart 19	Course et musculation du haut du corps. Séance typique de Philippe Dien de musculation du haut du corps. Objectif de la séance	124	
Encart 18	Séance spécifique de musculation plus vitesse utile. La séance de musculation type de Philippe Dien lors de sa phase de progression vers 3'34" ou 1 500 m.....	123	Encart 20	Le temps, la modernité et le philosophe.....	129

CHAPITRE 6

Le temps : la quatrième dimension de $\ddot{V}O_2$ max ou $d\dot{V}O_2$ max/dt.....

1. $\ddot{V}O_2$max à l'échelle temporelle	131	Encart 22	VDAC, voltage dependent-anion channel (canaux de voltage dépendant en anions) et entraînement.....	143
2. $\ddot{V}O_2$max à l'échelle cellulaire	137			
Encart 21	L'ARN.....	138		
3. $\dot{V}O_2$max à l'échelle de la physiologie de l'exercice	146			

CHAPITRE 7

$\ddot{V}O_2$ max à l'épreuve du temps de la vie humaine

Encart 23	Espérance de vie et santé	153	Encart 26	Équivalent énergétique de l'oxygène en fonction du quotient respiratoire QR ($QR = \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$) qui est représentatif de la part des lipides et glucides utilisée pour le métabolisme énergétique	162
Encart 24	Paramètres physiologiques des profils énergétiques.....	160			
Encart 25	Présentation de la métabolomique.....	162			

Conclusion	165
-------------------------	-----

Bibliographie	167
----------------------------	-----

Index	175
--------------------	-----

Le $\dot{V}O_2\text{max}$ est le concept central de l'énergétique humaine qui est le point d'achoppement de la physiologie.

La physiologie de l'exercice est en fait la physiologie de référence si l'on admet enfin que la normalité est le mouvement, que nous sommes génétiquement programmés pour bouger au moins sept kilomètres par jour et que la sédentarité est identifiée par l'organisme comme étant un état anormal du à une immobilisation par blessure. Cependant $\dot{V}O_2\text{max}$, concept centenaire, est devenu consensuel, mais reste mal connu car trop longtemps débattu seulement sur des points de détail. C'est pourquoi, après vingt-cinq ans passés à comprendre et améliorer $\dot{V}O_2\text{max}$, Véronique Billat a décidé d'écrire cet ouvrage qui lui est entièrement dédié en proposant une nouvelle vision de celui-ci et de l'entraînement.

Ce livre n'est donc pas un manuel de physiologie de l'exercice classique, mais une nouvelle perspective de ce concept de $\dot{V}O_2\text{max}$ soumis à l'épreuve du temps afin d'en donner une nouvelle vision.

Le $\dot{V}O_2\text{max}$ a été soumis à l'épreuve du temps :

- le temps de son invention ;
- le temps du débat actuel ;
- l'introduction du temps limite à $\dot{V}O_2\text{max}$;
- le temps du dépassement de $\dot{V}O_2\text{max}$;
- le temps de l'entraînement à $\dot{V}O_2\text{max}$;
- le temps : la quatrième dimension de $\dot{V}O_2\text{max}$;
- le $\dot{V}O_2\text{max}$ à l'épreuve du temps (celui de la vie d'un homme de 100 ans).

L'auteur présente aussi comment, par un jeu de rotation autour de l'axe du temps d'effort, il est possible d'augmenter le $\dot{V}O_2\text{max}$ de référence d'une personne PENDANT l'exercice lui-même et pas seulement après un entraînement de plusieurs semaines. En effet, elle a tout d'abord exercé une expérience de pensée puis une véritable expérimentation pour se donner de nouvelles perspectives de progrès conceptuel du $\dot{V}O_2\text{max}$ chez un homme mais également dans la théorie bioénergétique elle-même. Pour cela, elle a travaillé en interdisciplinarité pour confronter ses idées avec celles des biologistes moléculaires, généticiens et surtout mathématiciens.

Public :

Ce livre a été écrit à l'attention :

- ▶ Des professeurs et des étudiants en Sciences du sport (STAPS)
- ▶ Des entraîneurs et des préparateurs physiques
- ▶ Des médecins du sport
- ▶ Des sportifs eux-mêmes.

Véronique Billat. Professeure à l'Université d'Evry-Val d'Essonne, est auteure de nombreux articles dans les revues scientifiques internationales et assure le suivi d'entraînements d'athlètes de haut niveau français et kenyans. Par ailleurs, elle défend l'idée que la formation scientifique doit s'adresser à tout sportif ainsi qu'aux intervenants de son environnement.

ISBN : 978-2-8041-8169-7



9 782804 181697

VO2MAX

