

SCIENCES  
ET PRATIQUES DU SPORT

# PHYSIOLOGIE DE L'ENTRAÎNEMENT ET DE LA PERFORMANCE SPORTIVE

6<sup>e</sup>  
ÉDITION

VÉRONIQUE BILLAT



# **Physiologie de l'entraînement et de la performance sportive**

# SCIENCES ET PRATIQUES DU SPORT

Collection dirigée par le Professeure VÉRONIQUE BILLAT  
Physiologiste de l'exercice et de l'entraînement sportif  
([www.billatraining.com](http://www.billatraining.com) ; <https://www.researchgate.net/profile/Veronique-Billat>)  
et le Dr JEAN-PIERRE KORALSZTEIN, Médecin du Sport, CEO Billatraining  
<https://www.researchgate.net/profile/Jean-Pierre-Koralsztein>

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

## SCIENCES DU SPORT

|                                               |                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V. BILLAT .....                               | <i>Physiologie de l'entraînement et de la performance sportive (6<sup>e</sup> édition)</i>                           |
| V. BILLAT .....                               | <i>VO<sub>2max</sub> à l'épreuve du temps</i>                                                                        |
| N. BOISSEAU <i>et al</i> .....                | <i>La Femme sportive. Spécificités physiologiques et physiopathologiques</i>                                         |
| F. CARRÉ .....                                | <i>Cardiologie du sport en pratique (2<sup>e</sup> édition)</i>                                                      |
| D.L. COSTILL, J.H. WILMORE, W.L. KENNEY ..... | <i>Physiologie du sport et de l'exercice. (8<sup>e</sup> édition)</i>                                                |
| R.H. COX .....                                | <i>Psychologie du sport (3<sup>e</sup> édition)</i>                                                                  |
| A. DELLAL .....                               | <i>De l'entraînement à la performance en football</i>                                                                |
| A. DELLAL .....                               | <i>Une saison de préparation physique de football (4<sup>e</sup> édition)</i>                                        |
| F. DURAND .....                               | <i>Physiologie des sports d'endurance en montagne</i>                                                                |
| H.H. FINK, A. MIKESKY .....                   | <i>Nutrition du sport</i>                                                                                            |
| F. GRAPPE .....                               | <i>Cyclisme et optimisation de la performance. Science et méthodologie de l'entraînement (4<sup>e</sup> édition)</i> |
| F. GRAPPE .....                               | <i>Puissance et performance en cyclisme. S'entraîner avec des capteurs de puissance</i>                              |
| P. GRIMSHAW ET AL. ....                       | <i>Biomécanique du sport et de l'exercice</i>                                                                        |
| S. JOWETT, D. LAVALLÉE .....                  | <i>Psychologie sociale du sport</i>                                                                                  |
| C. MARTIN .....                               | <i>Tennis. Optimisation de la performance</i>                                                                        |
| W.D. MC ARDLE, F.I. KATCH, V.L. KATCH .....   | <i>Nutrition &amp; performances sportives</i>                                                                        |
| T. PAILLARD .....                             | <i>Optimisation de la performance sportive en judo</i>                                                               |
| R. PAOLETTI .....                             | <i>Éducation et motricité. L'Enfant de deux à huit ans</i>                                                           |
| J.R. POORTMANS, N. BOISSEAU .....             | <i>Biochimie des activités physiques et sportives (3<sup>e</sup> édition)</i>                                        |
| D. REY ET AL. ....                            | <i>Le football dans tous ses états</i>                                                                               |
| D. RICHÉ .....                                | <i>Epinutrition du sportif</i>                                                                                       |
| D. RICHÉ .....                                | <i>Micronutrition, santé et performance</i>                                                                          |
| P. ROBINSON .....                             | <i>Le coach sportif</i>                                                                                              |
| T.W. ROWLAND .....                            | <i>Physiologie de l'exercice chez l'enfant</i>                                                                       |
| C.M. THIÉBAULD, P. SPRUMONT .....             | <i>L'Enfant et le sport. Introduction à un traité de médecine du sport chez l'enfant</i>                             |
| C.M. THIÉBAULD, P. SPRUMONT .....             | <i>Le Sport après 50 ans</i>                                                                                         |
| E. VAN PRAAGH .....                           | <i>Physiologie du sport : enfant et adolescent</i>                                                                   |

## PRATIQUES DU SPORT

|                                                    |                                                                                         |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| V. BILLAT .....                                    | <i>Entraînement pratique et scientifique à la course à pied</i>                         |
| V. BILLAT .....                                    | <i>L'Entraînement en pleine nature</i>                                                  |
| V. BILLAT .....                                    | <i>Révolution marathon</i>                                                              |
| V. BILLAT .....                                    | <i>Révolution trail</i>                                                                 |
| V. BILLAT, C. COLLIOT .....                        | <i>Régat et performance pour tous</i>                                                   |
| L. CANDY, E. GAILDRY .....                         | <i>Se préparer aux épreuves écrites du CAPEPS. De la connaissance à l'argumentation</i> |
| K. JORNET, BURGADA, F. DURAND .....                | <i>Physiologie des sports d'endurance en montagne</i>                                   |
| G. MILLET, F. BROCHERIE, R. FAISS, O. GIRARD ..... | <i>Entraînement en altitude dans les sports collectifs</i>                              |
| G. MILLET, L. SCHMITT .....                        | <i>S'entraîner en altitude. Mécanismes, méthodes, exemples, conseils pratiques</i>      |
| O. PAULY .....                                     | <i>Posture et gainage. Santé et performance</i>                                         |
| O. PAULY .....                                     | <i>Posture et musculation. Initiation, rééducation, prévention, performance</i>         |
| O. PAULY .....                                     | <i>Posture et coordination. Éducation et performance</i>                                |
| M. RYAN .....                                      | <i>Nourrir l'endurance</i>                                                              |

Véronique **Billat**

# **Physiologie de l'entraînement et de la performance sportive**

6<sup>e</sup> édition

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web : <http://www.deboecksuperieur.com>

De Boeck Supérieur, 2024  
Rue du Bosquet, 7 – B-1348 Louvain-la-Neuve

6<sup>e</sup> édition

Tous droits réservés sauf pour une citation dans une revue, la reproduction ou l'utilisation de cette ouvrage sous quelque forme que ce soit, connue ou à venir, incluant la xérogaphie, la photocopie, le stockage d'informations et d'utilisation dans un moteur de recherche, est interdite sans autorisation écrite de l'éditeur.

Dépôt légal :  
Bibliothèque nationale, Paris : août 2024  
Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2024/13647/049

ISBN 978-2-8073-6582-7

# Avant-propos

---

Cette nouvelle édition a souhaité renforcer le lien fort entre la performance sportive et l'entraînement par la compréhension de ses facteurs physiologiques.

En lisant cet ouvrage vous serez capables d'élaborer des méthodes pour améliorer, non seulement la puissance, l'endurance, mais aussi la gestion énergétique de la personne que vous entraînez, et ce, quels que soit son âge, sa condition physique, son sport, son vécu et ses objectifs.

J'ai écrit la première édition de ce livre après un vécu de sportive en compétition (course de demi-fond et de fond, trail, ski de fond, triathlon), d'entraîneuse (BEE3 d'athlétisme option course), puis de scientifique (Doctorat, Maître de conférences puis Professeur des Universités, Directrice Unité INSERM).

C'est le livre que j'aurais voulu avoir lorsque j'étais dans cette période de pratique personnelle et d'entraîneur. À présent, il me permet d'enseigner en STAPS de la 1<sup>re</sup> année

aux Masters Internationaux à l'Université d'Evry-Paris-Saclay.

J'ai de plus en plus l'occasion de transmettre cette physiologie de l'entraînement à travers une chaîne Youtube (Billatrainning), des podcasts et une association 1901 dont le thème est « La Science de l'Entraînement Personnalisée : l'ASEP ». L'écriture de Blog permet de diversifier et de vulgariser les idées de recherche présentes et à venir qui ont permis d'enrichir les 6 éditions de ce livre qui restent ainsi dans l'actualité la plus chaude de notre domaine.

Cette édition vous proposera la notion de vitesse critique déjà esquissée en chapitre 6 dans les dernières éditions, mais cela dès le premier chapitre en vous donnant d'emblée le lien avec la consommation maximale d'oxygène (le fameux  $\dot{V}O_2\text{max}$ ) qui est la base énergétique aérobie de notre métabolisme et de notre condition Humaine, car oui, la bonne nouvelle est que nous sommes une des espèces le plus endurantes (à défaut d'être la plus rapide loin sans faux)

et la seconde très bonne nouvelle est que notre endurance peut s'améliorer tout au long de la vie.

Car n'oubliez pas la face B du disque : si l'énergie humaine augmente lorsque l'on s'en sert, elle disparaît lorsque nous ne l'utilisons pas et l'on sait que le  $\text{VO}_2\text{max}$  est un prédicteur fort de l'espérance de vie

active (en bonne santé qui est de 66 ans seulement en France).

Nous sommes, en tant que physiologiste du sport et de l'entraînement, des artisans de cette jouvence. Il s'agit à présent d'en devenir de véritables artistes.

# Introduction à la logique de cet ouvrage

---

Grâce aux nouvelles technologies nous avons pu démembrer les facteurs physiologiques de la performance sportive en sortant du laboratoire et en allant au cœur de l'action. Cette compréhension de la réalité du terrain et des différents sports, nous rapproche d'un entraînement réellement personnalisé : cette quête du graal que nous poursuivons depuis plus de 30 ans.

Depuis la découverte du concept de consommation maximale d'oxygène, le fameux  $\dot{V}O_2\text{max}$ , voici déjà 100 ans, nous avons découvert son rôle déterminant pour la performance sportive et la capacité à récupérer des entraînements. La consommation d'oxygène maximale mesure la capacité maximale d'un individu à utiliser de l'oxygène pendant un effort physique intense et soutenu. Sa valeur indique l'efficacité du système cardiorespiratoire à transporter de l'oxygène vers les muscles et de la capacité des muscles à utiliser cet oxygène pour produire de l'énergie, principalement sous forme d'ATP (adénosine triphosphate). Ce concept est dû à l'auteur, Archibald Vivian

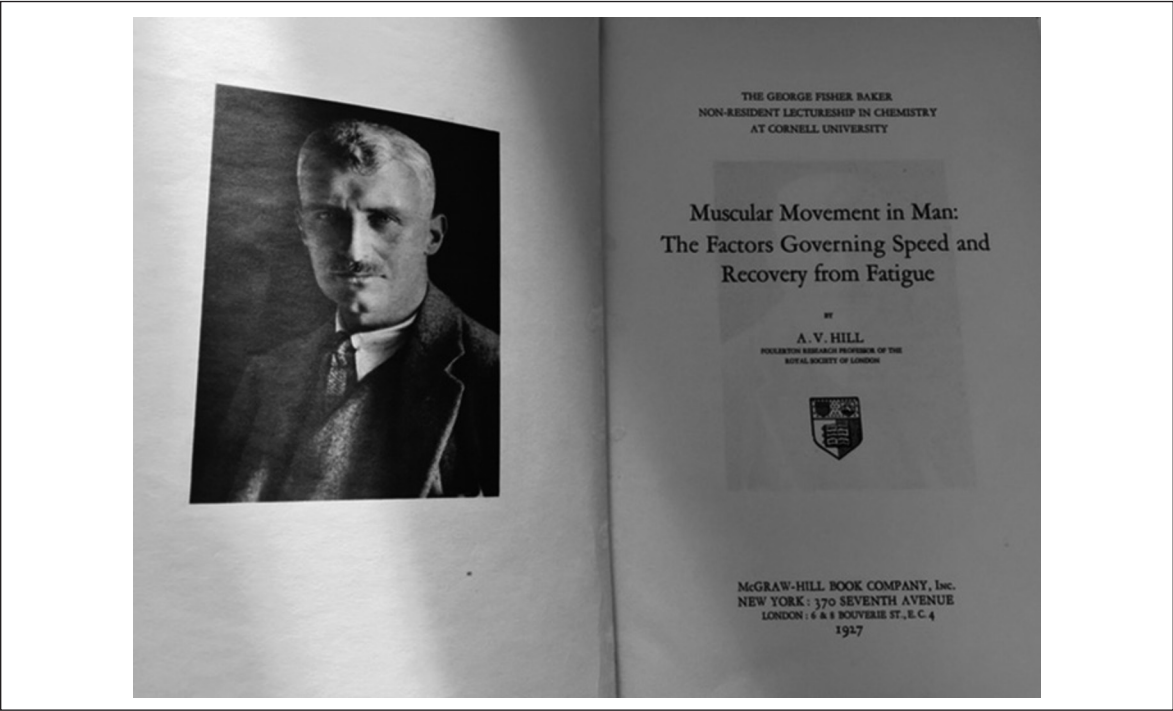
Hill (figure 1), Prix Nobel de Physiologie Médecine en 1922 qui a ouvert l'immense champ de recherche concernant la possibilité de l'améliorer en s'entraînant de façon « physiologique » c'est-à-dire en utilisant des séances sollicitant au maximum ses facteurs limitants : cardiorespiratoires et musculaires.

Hill qui était lui-même un coureur à pied, avait eu l'idée de se mettre à courir de plus en plus vite en procédant par la succession de paliers de vitesse indépendants (séparés par un temps de repos non précisé), et ce, jusqu'à ne plus pouvoir supporter une augmentation de la vitesse (figure 2).

Contrairement aux unités présentées dans la figure 2,  $O_2\text{ max}$  est souvent exprimé en millilitres d'oxygène consommés par kilogramme de poids corporel par minute ( $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ) généralement mesuré lors d'un test d'effort progressif, au cours duquel l'individu effectue un exercice physique de plus en plus intense jusqu'à atteindre un point d'épuisement. Certains lycéens et étudiants en STAPS ou candidats au concours de Pompier, Gen-

Figure 1a et 1b

Le livre de A.V Hill publié en 1927 dont le contenu aborde tous les thèmes fondateurs de la compréhension de la physiologie de la performance.



| CONTENTS                                                          |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
|                                                                   | PAGE |
| INTRODUCTION . . . . .                                            | I    |
| METHODS . . . . .                                                 | 5    |
| OXYGEN AND CARBON DIOXIDE: THE STEADY STATE OF EXERCISE . . . . . | 12   |
| WORK . . . . .                                                    | 20   |
| RECOVERY . . . . .                                                | 27   |
| CARBON DIOXIDE . . . . .                                          | 36   |
| SPEED AND ENERGY REQUIREMENT . . . . .                            | 41   |
| THE "VISCOSITY" OF HUMAN MUSCLES . . . . .                        | 45   |
| THE DYNAMICS OF "SPRINT" RUNNING . . . . .                        | 51   |
| THE "MECHANICAL EFFICIENCY" OF THE HUMAN MUSCLE . . . . .         | 55   |
| SOME APPLICATIONS TO ATHLETICS . . . . .                          | 61   |
| FATIGUE AND RECOVERY IN THE ISOLATED MUSCLE . . . . .             | 71   |
| THE COST OF MAINTAINING A CONTRACTION . . . . .                   | 75   |
| THE THEORETICAL MAXIMUM WORK . . . . .                            | 79   |
| REVERSIBLE AND IRREVERSIBLE PHENOMENA IN MUSCLE . . . . .         | 83   |
| THE VISCOSITY OF MUSCLE . . . . .                                 | 87   |
| BIBLIOGRAPHY . . . . .                                            | 91   |
| INDEX . . . . .                                                   | 95   |

darmes, Policiers et même pour les postes de fonctionnaire au Sénat (pas les sénateurs !), feront le rapprochement avec le fameux test de VAMEVAL qui consiste à déterminer la vitesse maximale aérobie qui cor-

respond à la vitesse maximale atteinte par Archibald qu'il avait associée à l'atteinte de ce plateau de consommation d'oxygène à une valeur maximale : le  $\dot{V}O_{2max}$ .

La figure 3 vous présente un test de notre époque intégrant toutes les réponses cardiorespiratoires, mais également les sensations de pénibilités afférentes selon le ressenti du sujet. Cette échelle de Borg (1982) est une échelle dite de « Perception de l'effort » (Rate of perception of exhaustion ou appelée la RPE, notion approfondie au chapitre 6). Cette dimension perceptive est très importante à intégrer afin de pouvoir donner de simples consignes de sensations perçues pour piloter une séance d'entraînement... à l'ancienne me diraient vous, oui certes mais on a oublié cette possibilité par manque de confiance en soi en cherchant à se réassurer par un GPS ou un cardiofréquencemètre. Nous aborderons cet aspect de l'entraînement dans le chapitre concernant les méthodes d'entraînement (chapitre 6).

Tout au long de cet ouvrage, nous porterons une attention toute particulière à vous expliquer les facteurs limitants de  $\dot{V}O_{2max}$  et surtout ses marges d'amélioration qui vont même conditionner l'espérance de vie en bonne santé ou l'espérance de vie active. L'espérance de vie active prend en compte la période de vie pendant laquelle une personne peut mener une vie relativement

autonome et participer pleinement à des activités sociales, professionnelles et de loisirs sans être entravée par des problèmes de santé majeurs avec la capacité à vivre de manière active et épanouissante.

En 2019, selon les données de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), l'espérance de vie en bonne santé à la naissance était d'environ 64,4 ans pour les hommes et de 65,6 ans pour les femmes en France et elle baisse alors que notre espérance de vie augmente. Afin d'éviter de vivre de nombreuses années de façon non autonome, il faut limiter la baisse du  $\dot{V}O_2\text{max}$  tout au long de la vie. À cet effet, la physiologie de la performance au sens d'accomplissement d'un exercice, d'un parcours de façon autonome, va permettre aux intervenants du sport santé de cibler au plus juste l'intensité et la durée des exercices répétés dans le contexte d'un entraînement personnalisé.

Nous prendrons beaucoup d'exemples en utilisant la course à pied puisque c'est un exercice que nous savons tous, peu ou prou, réaliser, même sans apprentissage technique (contrairement au ski de fond, patinage, aviron, cyclisme et surtout natation).

Ainsi, tous les intervenants dans le domaine sportif, mais aussi des activités physiques adaptées, puiseront des connaissances utiles pour élaborer leurs propres méthodes.

Le  $\dot{V}O_2\text{max}$  est un socle de production énergétique aérobie (qui utilise l'oxygène), mais ne peut suffire à produire l'énergie de façon assez rapide (à haute puissance) pour assurer notre fuite devant un danger imminent ou pour un départ de sprint. Pour assurer un démarrage efficace, tout comme des accélérations au cours d'effort long (dits d'endurance) lors d'une montée raide en courant, en pédalant, ou d'une contre-attaque en sport collectif, il faut pouvoir supporter un déficit d'oxygène en fournissant notre énergie à partir de notre métabolisme anaérobie (an = sans et aérobie = oxygène). Ainsi, le métabolisme anaérobie se produit en l'absence d'oxygène, ou lorsque la demande d'énergie augmente plus rapidement que l'approvisionnement en oxygène.

L'équilibre entre les profils aérobie et anaérobie varie d'une personne à l'autre et peut être influencé par des facteurs génétiques, l'entraînement physique, et les préférences sportives. Certains athlètes peuvent être plus axés sur l'aérobie, tandis que d'autres peuvent exceller dans des activités plus anaérobies. Les programmes d'entraînement sont souvent conçus pour développer de manière équilibrée ces deux profils en fonction des objectifs spécifiques de l'athlète. Cependant, afin de pouvoir estimer le profil énergétique aérobie et anaérobie qui se réfère à la capacité d'un individu à produire

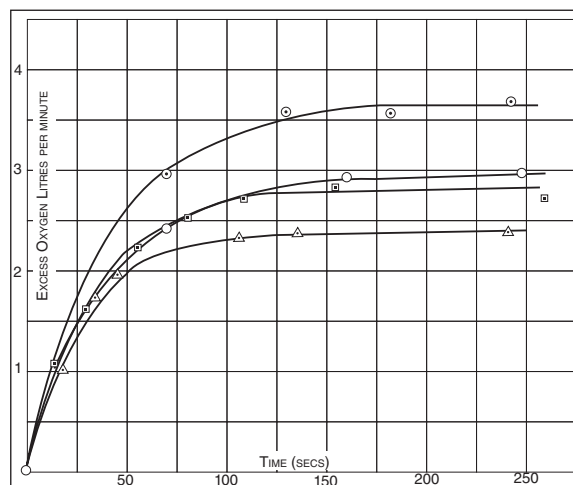


Figure 2

Le test de  $\dot{V}O_2\text{max}$  de A.V Hill qui a lui-même été son propre sujet d'étude. Il réalise des paliers indépendants de vitesse d'une durée de 4 min. Ici la consommation d'oxygène est exprimée en valeur supplémentaire (excess Oxygen en Litres par minute qu'il est nécessaire de consommer en plus de la valeur de repos (qui est d'environ 0,3 L. min<sup>-1</sup> pour un poids moyen de 70 kg).

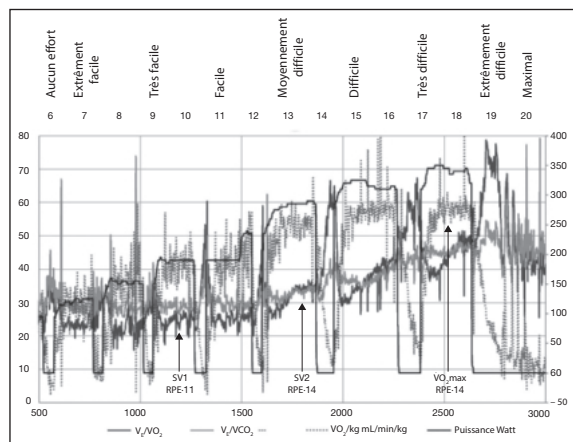


Figure 3

Test de détermination de  $\dot{V}O_2\text{max}$  avec les paramètres ventilatoires c'est-à-dire le rapport entre le débit ventilatoire (VE en Litres. min<sup>-1</sup>) et la consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_2$  en Litres. min<sup>-1</sup>) ( $VE/\dot{V}O_2$  en bleu) et le rapport entre le débit ventilatoire (VE en Litres. min<sup>-1</sup>) et le rejet de  $CO_2$  ( $VCO_2$  en Litres. min<sup>-1</sup>) ( $VE/VCO_2$  en rouge). On peut d'emblée constater qu'il nous faut ventiler 40 litres d'air pour ne consommer qu'un litre d'oxygène ( $VE/\dot{V}O_2 = 40$  à  $\dot{V}O_2\text{max}$ ). Nous étudierons la possibilité que la ventilation puisse être un facteur limitant de la consommation maximale d'oxygène. Ici le sportif qui pédale contre des watts sur un cyclo ergomètre, a ressenti comme étant très difficile l'effort à  $\dot{V}O_2\text{max}$ .

de l'énergie dans des conditions aérobies (avec l'apport d'oxygène) et anaérobies (sans l'apport d'oxygène), nous vous apprendrons à analyser votre profil de vitesse en fonction de la durée de la course (cela est valable pour tous les sports à base de locomotion). Cette évaluation qui ne nécessite que de la sueur et de l'engagement sur des courses d'une durée de 3 à 30 minutes à allure maximale possible, sera le point de départ du premier chapitre analysant les aspects bioénergétiques de cette performance sportive.

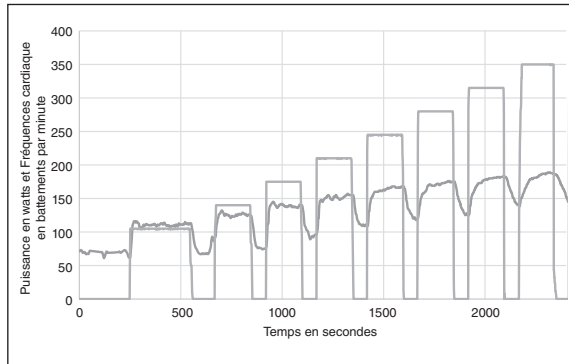
Ainsi, le plan de cet ouvrage s'articule ainsi :

**Dans le premier chapitre**, nous vous expliquerons les modes de production d'énergie aérobie et anaérobie avec des exemples de différents sports.

**Le second chapitre** vous expliquera comment les fibres musculaires se contractent pour transformer cette énergie chimique en énergie mécanique (vitesse de course, hauteur et longueur du saut par exemple).

Figure 4

Évolution de la fréquence cardiaque au cours du test de détermination de  $\dot{V}O_2$  max et de sa puissance associée (La puissance maximale aérobie en watts qui est l'homologue de la vitesse maximale aérobie en  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , est la puissance de début d'atteinte de  $\dot{V}O_2$  max dans un test par paliers de vitesse incrémentée).



**Le troisième chapitre** vous apprendra comment le système cardiovasculaire s'adapte aux besoins croissants d'oxygène pour un débit de consommation d'oxygène (le  $\dot{V}O_2$  max) le plus élevé possible pour courir aussi bien à  $38 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  (record du monde masculin du 100 m) qu'à  $21 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  (record du monde du marathon) (Molinari et al., 2020a, *Maximal time spent at  $\dot{V}O_2$  max from Sprint to the marathon*), le cœur doit pomper suffisamment de sang par minute afin d'assurer le transport de l'oxygène.

Nous pouvons déjà visualiser les réponses cardiovasculaires lors d'un test de détermination de  $\dot{V}O_2$  max et de la vitesse à partir de laquelle la consommation d'oxygène atteint sa valeur maximale (observation d'un pic de  $\dot{V}O_2$  : on parle de  $\dot{V}O_2$  pic ou d'un plateau lorsque le sportif est capable de supporter un déficit d'oxygène lui permettant de supporter un accroissement de vitesse en toute fin d'effort, afin de faire émerger un plateau de  $\dot{V}O_2$  max).

**Le quatrième chapitre** vous expliquera comment le système ventilatoire assure le renouvellement de l'apport d'oxygène, mais également l'élimination du dioxyde de carbone (nos « gaz d'échappement »), afin de

pouvoir continuer à produire de l'énergie à partir du métabolisme aérobie.

**Le cinquième chapitre** abordera les effets de l'environnement physique (température et altitude) sur notre performance de courte et longue durée et donc de notre métabolisme aérobie et anaérobie. Nous en déduirons des méthodes d'entraînement prenant en compte ces conditions thermique et hypo-barique qui peuvent également impacter notre performance. Le réchauffement climatique va nécessiter de plus en plus de prendre en compte cet aspect. À ce propos nous avons rajouté la prise de conscience de l'impact carbone de l'entraînement et de la participation à des compétitions de marathon (Billat et al., 2021, *The Carbon Footprint of Marathon Runners : Training and Racing*).

**Le sixième chapitre** vous récompensera de tous vos efforts, non seulement de course pour mieux assimiler la théorie, mais également de lecture de ce livre que j'ai écrit pour tous les passionnés de l'entraînement pour permettre à chacun de progresser et de vivre de façon autonome et plus confortable. Courir 12 km avec envie et le sourire est, certes possible sans en apprendre les sous-jacents physiologiques. Nous vous apprendrons les bases scientifiques des séances d'entraînement anciennes et modernes. Oui les anciens champions, tout comme les modernes, font de la physiologie de l'entraînement sans le formuler en se basant surtout sur leurs sensations. Nous terminerons d'ailleurs sur ces méthodes qui réhabilitent l'entraînement « à la sensation », mais de façon éclairée par les fondements de l'optimisation énergétique qui exigent de varier la vitesse de course afin de bénéficier à la fois du métabolisme aérobie et anaérobie même, et surtout sur des épreuves qui durent de 3 minutes à 6 heures (du 1 000 m au 100 km).

# Théorie Bioénergétique de la performance sportive

# 1

1. Analyse de la Performance Humaine et individuelle à la course
2. Applications :  
Spécificités  
bioénergétiques  
des disciplines sportives

**Ce que vous allez comprendre à la lecture de ce chapitre 1 :** L'analyse de la performance à la course a permis de découvrir les bases énergétiques de notre production d'énergie. Nous pouvons déterminer notre profil énergétique aérobie et anaérobie à partir de nos records de course du 1 000 m au 10 km.

Par la simple analyse des records de course à pied, le prix Nobel 1923 de médecine, l'Anglais Archibald Vivian Hill (1886-1977) élaborait une théorie de la fatigue. Hill considérait que l'athlète était un merveilleux sujet d'étude de chimie (biochimie) parce que « l'Homme devait travailler avec cette machine intelligente qu'est le corps ». À l'époque ses collègues lui demandaient pourquoi il s'intéressait à l'athlétisme plutôt qu'à la maladie ou aux questions industrielles. Il répondait que : 1) la performance athlétique est simple et mesurable, assez reproductible et réalisée au maximum de la puissance énergétique humaine (dans le sens d'optimale), et que 2) les athlètes eux-mêmes étant en état d'équilibre dynamique dans le sens de bonne santé, peuvent être investigués sans danger à répéter leur performance de la même façon, encore et encore. Il introduisait alors la notion « d'équilibre dynamique » de l'athlète. Cette démarche d'analyse de la

performance, a jeté les bases théoriques de la physiologie de l'exercice.

A.V. Hill a ainsi posé les bases méthodologiques de la compréhension de l'énergie humaine, sans pour autant travailler sur les transformations physiologiques consécutives à la répétition d'exercice et étudier les effets de l'entraînement sur la consommation d'oxygène, la force et le rendement énergétique qui pourtant le passionnaient. C'est avec respect pour ce fondateur, que nous allons reprendre sa méthodologie afin de la poursuivre jusqu'à une transformation possible de chaque humain qui le souhaite, et ce à tout âge, parce qu'il est effectivement possible de le faire (et nous l'avons démontré) jusqu'à un âge canonique au-delà de 100 ans (Billat et al. 2017) (Billat V, Dhonneur G, Mille-Hamard L, Le Moyec L, Momken I, Launay T, Koralsztejn JP, Besse S. Case studies in Physiology: Maximal oxygen consumption and performance in a centenarian cyclist. *J Appl Physiol* 122: 430–434, 2017).

1. Analyse de la Performance Humaine et individuelle à la course

1.1 Analyse de la Performance Humaine par l'évolution des records en course à pied.

1.1.1 Analyse de l'évolution des meilleures performances masculine et féminine lors des 25 dernières années du 100 m au 100 km.

À partir des tableaux 1 et 2, nous allons répondre à la question de l'évolution des records de l'espèce humaine (versions masculine et féminine). Ces tableaux ne sont que la base de l'élaboration de notre réflexion sur la possibilité de progresser alors que certains considèrent que nous avons atteint nos limites.

La figure 5 synthétise ces tableaux afin de pouvoir, en un coup d'œil, répondre à cette question de l'évolution des records exprimés en fonction de la distance (du 100 m au 100 km).

Concernant l'évolution des records depuis 1997 (figure 5), nous remarquons que nous avons davantage progressé sur les courses longues (à partir du semi-marathon nous avons des progressions de l'ordre de 5 %, tableau 1). Cependant, dans ces dernières 25 années, les femmes n'ont pas progressé sur les épreuves du 100 au 1 000 m. Les hommes ont progressé sur le sprint grâce à Usain Bolt qui détient les records du 100 et 200 m (tableau 1), alors que les femmes ont davantage progressé sur le record de l'heure et le semi-marathon. En effet, nous pouvons constater sur le tableau 2 que les records en sprint féminins datent des années '80 à l'époque où les femmes se concentraient sur les courtes distances car le premier marathon olympique féminin ne date que de 1984 (J. O Los Angeles, avec la première médaille d'or remportée par l'Américaine Jan Benoit).

Tableau 1 Les records du monde masculins à la course du 100 m au 100 km

| Distance  | Temps en 1997<br>(h, min, s) | Temps en 2024<br>(h, min, s) | Vitesse en 1997<br>(km/h) | Vitesse en 2024<br>(km/h) | Vitesse en 2024<br>(m/s) | Date du record<br>actuel | Évolution depuis<br>27 ans |
|-----------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 100 m     | 9,85                         | <b>9,58</b>                  | 36,55                     | 37,58                     | 10,4                     | 2009                     | 2,8 %                      |
| 200 m     | 19,32                        | <b>19,19</b>                 | 37,27                     | 37,52                     | 10,4                     | 2009                     | 0,7 %                      |
| 400 m     | 43,29                        | 43,03                        | 33,26                     | 33,47                     | 9,3                      | 2016                     | 0,6 %                      |
| 800 m     | 1 min 41,11                  | 1 min 40,91                  | 28,48                     | 28,54                     | 7,9                      | 2012                     | 0,2 %                      |
| 1 000 m   | 2 min 12,18s                 | 2 min 11,96 s                | 27,24                     | 27,27                     | 7,6                      | 1999                     | 0,1 %                      |
| 1 500 m   | 3 min 27,3 7s                | 3 min 26,00 s                | 26,04                     | 26,21                     | 7,3                      | 1998                     | 0,7 %                      |
| 2 000 m   | 4 min 50,81 s                | 4 min 44,79 s                | 24,76                     | 25,28                     | 7                        | 1999                     | 2,1 %                      |
| 3 000 m   | 7 min 25,11 s                | 7 min 20,67 s                | 24,26                     | 24,51                     | 6,8                      | 1996                     | 1,0 %                      |
| 5 000 m   | 12 min 39,7 4s               | <b>12 min 35,36 s</b>        | 23,69                     | 23,82                     | 6,6                      | 2020                     | 1,0 %                      |
| 10 000 m  | 26 min 27,85 s               | <b>26 min 11,00 s</b>        | 22,67                     | 22,92                     | 6,4                      | 2020                     | 1,0 %                      |
| heure     | *                            | *                            | 21,08                     | 21,33                     | 5,93                     | 2020                     | 1,1 %                      |
| 21,100 km | 59 min 24 s                  | 57 min 32 s                  | 21,31                     | 22                        | 6,1                      | 2020                     | 3,0 %                      |
| 42,195 km | 2 h 06 min 50 s              | 2 h 00 min 35 s              | 19,96                     | 21                        | 5,8                      | 2023                     | 5,2 %                      |
| 100 km    | 6 h 13 min 33 s              | 6 h 05 min 35 s              | 16,06                     | 16,66                     | 4,63                     | 2018                     | 3,7 %                      |

| Distance                | Temps (h, min, s) | Vitesse (m/s) 2024 | Vitesse (km/h) 2024 | Date du Record Féminin | Évolution en 27 ans | Différentiel avec les record masculins |
|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| 100 m                   | 10,49 s           | 9,53               | 34,3                | 1988                   | 0 %                 | 9 %                                    |
| 200 m                   | 21,34 s           | 9,37               | 33,7                | 1988                   | 0 %                 | 11 %                                   |
| 400 m                   | 47,6 s            | 8,4                | 30,3                | 1985                   | 0%                  | 11%                                    |
| 800 m                   | 1 min 53,28 s     | 7,06               | 25,4                | 1983                   | 0 %                 | 12 %                                   |
| 1 000                   | 2 min 28,9 s      | 6,72               | 24,2                | 1996                   | 0 %                 | 14 %                                   |
| 1 500 m                 | 3 min 49,11 s     | 6,55               | 23,57               | 2023                   | 1 %                 | 11 %                                   |
| 2 000 m                 | 5 min 21,56 s     | 6,22               | 22,39               | 2021                   | 1 %                 | 13 %                                   |
| 3 000 m                 | 8 min 06,11 s     | 6,17               | 22,2                | 1993                   | 0 %                 | 10 %                                   |
| 5 000 m                 | 14 min 00,21 s    | 5,95               | 21,42               | 2023                   | 1 %                 | 11 %                                   |
| 10 000 m                | 29 min 01,53 s    | 5,69               | 20,68               | 2021                   | 2 %                 | 12 %                                   |
| Heure                   | *                 | 5,26               | 18,93               | 2020                   | 5 %                 | 13 %                                   |
| 21,100 km route (mixte) | 1 h 02 min 52 s   | 5,6                | 20,14               | 2021                   | 6 %                 | 9 %                                    |
| 42,195 km (mixte)*      | 2 h 11 min 53 s   | 5,33               | 19,19               | 2023                   | 4 %                 | 9 %                                    |
| 100 km*                 | 6 h 33 min 11 s   | 4,24               | 15,3                | 2000                   | 0 %                 | 9 %                                    |

Tableau 2

Les records du monde féminins à la course du 100 m au 100 km. \*Nous avons retenu les records du monde dits mixtes qui sont entrés en vigueur en 2003 sur les courses sur route (les femmes courent avec les hommes).

Figure 5

Évolution des performances (%) masculines et féminines de la course à pied en fonction de la distance (100 m au 100 km) en un quart de siècle.

Il est également possible d’invoquer la possibilité du dopage féminin qui a été révélé après la chute du mur de Berlin. En effet, le scandale du dopage en République Démocratique Allemande (RDA) a été mis en lumière à cette époque. Des documents et témoignages ont révélé l’étendue du programme de dopage institutionnalisé, touchant des milliers d’athlètes. De nombreuses athlètes féminines ont subi des effets secondaires graves, notamment des problèmes de santé à long terme, des anomalies hormonales, des troubles de la reproduction, et d’autres complications médicales liées à l’utilisation de substances dopantes. L’exposition de ces pratiques a suscité des préoccupations éthiques et a contribué à un changement dans la manière dont le dopage était perçu et traité dans le sport. Cela a également conduit à une réévaluation des pratiques antidopage à l’échelle internationale et à des efforts pour renforcer la lutte contre le dopage et protéger la santé des athlètes. Les conséquences de ces pratiques de dopage en RDA ont eu un impact durable sur le monde du sport et ont mis en lumière

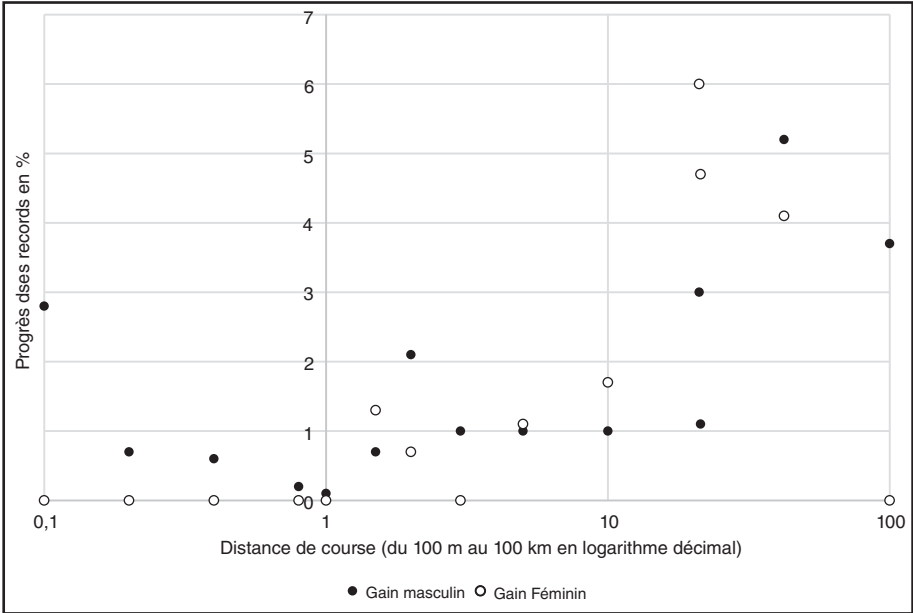
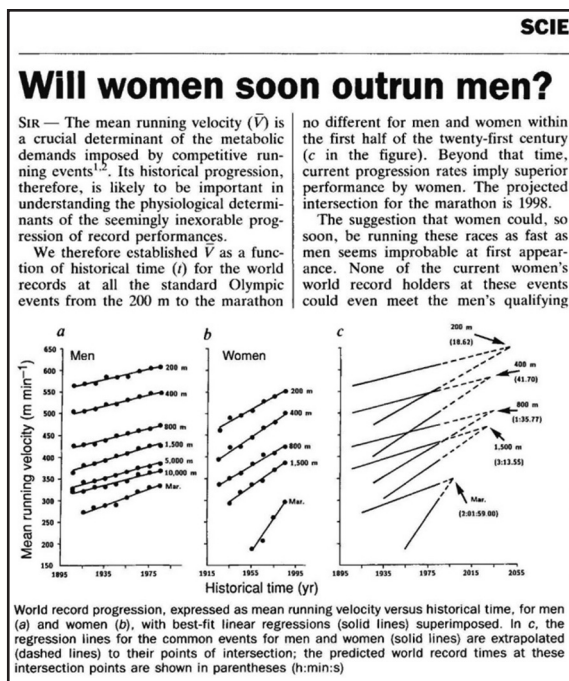


Figure 6

L'article dans *Nature* qui a prédit que les femmes battent les hommes en 2055 conforte l'extrapolation quant à la possibilité pour les femmes de battre les hommes sur le marathon dès 1998 sur la seule base de la progression rapide du record féminin sans tenir compte du facteur sociologique ! [Whipp et Ward, 1992].



les risques associés à l'utilisation de substances améliorant la performance de manière non éthique et non sécuritaire. Mais attention à ne pas tomber pour autant dans « le délit (ou déni) de sale performance » qui pourrait nous conduire à systématiquement soupçonner une athlète qui briserait un record. On pourrait alors soupçonner l'athlète éthiopienne qui, en un mois, est passé sous la barre des 3 min 50 s aux 1 500 m et tutoyé celle des 14 min sur 5 000 m (en 2023).

Ce que je peux dire est que la performance relève aussi de la motivation et de la tolérance à la souffrance surtout pour les épreuves de fond et de mi-fond. J'ai eu le bonheur de tester et conseiller une vice-championne olympique sur 5 000 m à Athènes, Isabella Ochichi, kenyane, et je peux vous affirmer que son seul dopage était la motivation de gagner sa vie et celle de son village. Les facteurs sociologiques, économiques et politiques ainsi que démographiques, sont à prendre en considération avec la possibilité de détecter, former, soigner, et suivre un athlète dès son adolescence. La génétique de la performance reste encore à découvrir car il est difficile, au-delà des facteurs anthropométriques et des morphologies, de faire la part des choses entre l'acquis, l'éducation, l'environnement, et l'innée (même dans des études sur les vrais jumeaux cela n'est pas toujours conclusif).

Cette génétique de la performance tente de se relancer en analysant les gènes sur des bases de données gigantesques, confrontés au phénotype comme la puissance de pédalage à 150 battements par minute de fréquence cardiaque. Mais on est loin de la performance, et les biais de mesures (sur ces bicyclettes ergométriques différentes d'un laboratoire à l'autre) sont autant de bruits statistiques dans ces analyses. De même, le dopage génétique qui a fait couler de l'encre journalistique dans les années 2000, s'il était aussi efficace, aurait fait exploser les records de courses à pied dans ce dernier quart de siècle hautement technologique.

Mais revenons à notre analyse des records du monde en course à pied afin de pouvoir ancrer notre réflexion concernant ses prérequis physiologiques. Nous rentrerons alors plus facilement dans le « moteur » de notre corps qui est bien plus qu'un moteur, car lui-seul peut augmenter sa puissance et son endurance au fur et à mesure qu'il fonctionne, et ce à condition de bien le mener. À ce propos, nous avons démontré que l'humain sait doser son énergie à condition de se « faire confiance » et de ne pas se cantonner aux valeurs de son cardio-GPS.

Les femmes, quel que soit la distance de course, courent entre 8 et 10 % moins vite que les hommes. Le mythe de la femme qui va battre l'homme dans le futur (article très « sérieux » paru en 1992 dans la prestigieuse revue *Nature*, Figure 6 : Whipp BJ, Ward SA. Will women soon outrun men? *Nature*. 1992 Jan 2;355(6355):25) restera... un mythe car ces auteurs ont pris la courbe de croissance des records féminins qui fut plus rapides dans les premières années du début de leur admission à participer aux épreuves sportives au début des années 1900. Lorsque les femmes battent les hommes c'est dans le cas des épreuves qui impliquent la résistance au sommeil et les vitesses moyennes calculées sont de l'ordre de la vitesse de marche.

Traduction de la légende de la Figure 6 : Progression des records du monde, exprimée par la vitesse moyenne de course en fonction du temps historique, pour les hommes (a) et les femmes (b), avec les régressions linéaires les mieux ajustées (lignes pleines) superposées. En c, les lignes de régression pour les événements communs aux hommes et aux femmes (lignes pleines) sont extrapolées (lignes en pointillé) à leurs points de départ (lignes pointillées) jusqu'à leurs points d'intersection ; les temps de record du monde prédits à ces points d'intersection sont indiqués entre parenthèses (h:min:s).

Il faut cependant remarquer que la détentrice de la meilleure performance mondiale sur le marathon, Tigist Assefa (née le 28 mars 1994 en Éthiopie) est une athlète éthiopienne, spécialiste des courses de demi-fond et de fond, avec ses 2 h 11 min 53 s à Berlin en 2023, elle aurait pris la 9<sup>e</sup> place du marathon masculin aux J.O. de Tokyo 2020 (coursus en 2021 avec une année de retard en raison du COVID).

### 1.1.2 L'analyse des records du monde comme révélateur d'un mode de production énergétique « hybride » : aérobie et anaérobie.

Nous constaterons en examinant la courbe de vitesse du 100 m au 100 km (figure 7a, b, c), que l'humain a certainement plusieurs modes de production énergétique en fonction de l'intensité et de la durée de la course.

L'Humain a une « super batterie électrique » à haute puissance pour le démarrage (dans les starting-blocks) et une batterie pour le sprint prolongé (à partir de 60 m jusqu'au 200 m) et enfin une batterie moins puissante mais à plus grande capacité (pour le sprint prolongé comme le 400 m).

Chaque calorie de nos glucides, lipides et protéines en cas de jeun ou d'effort très prolongé doit être transformée en énergie mécanique (cinétique et potentielle) grâce à la consommation d'oxygène dans notre moteur thermique.

Examinons cette courbe (figure 7) illustrant la perte de vitesse du 100 m au 100 km, afin de repérer ces changements de mode de production énergétique en fonction de la distance de course.

Échelle de temps exprimée en logarithme décimale pour l'axe des x (abscisse) afin de repérer les cassures de vitesses (la courbe originale étant la courbe 7a allant jusqu'aux 100 km et la courbe 7b allant seulement jusqu'au marathon).

Nous constaterons dans l'encadré 1 (bio inspiration animale) que ces différentes vitesses permettent de sauver notre vie ou de chasser.

Vous pouvez observer 3 cassures de vitesse :

- La première cassure s'observe au-delà du 200 m, qui d'ailleurs est couru à une vitesse moyenne plus rapide que sur le 100 m (je précise bien à vitesse MOYENNE et non la vitesse de pointe, encadré 2). Cela est dû à l'impact du départ dont la durée est d'environ 145 ms. On peut donc concevoir que la répartition de cette perte de temps au départ, impacte moins les

19 s du 200 m que les 9 s que dure un 100 m. Cette première cassure correspond au passage du métabolisme anaérobie sans accumulation de lactate dans le sang (notre super batterie électrique) grâce à nos réserves énergétiques sous forme de créatine phosphate. D'ailleurs certains athlètes ou joueurs de sports collectifs prennent des suppléments de ce composé en croyant augmenter leur puissance musculaire (la force  $\times$  la vitesse d'exécution). Cela n'a pas été prouvé scientifiquement.

- La seconde cassure apparaît après le 400 m. Elle correspond au passage du métabolisme anaérobie alactique au métabolisme anaérobie lactique. C'est en quelque sorte une seconde batterie électrique, moins puissante que la première mais avec une autonomie énergétique qui nous permet de courir plus vite sur des courses qui durent de 45 secondes à 2 minutes. Le 400 m qui se court à une vitesse moyenne de 33,5 km/h, se rapproche davantage du 200 m que du 800 m qui passe sous la barre des 30 km/h. Le 400 m est considéré comme une épreuve de sprint prolongé alors que le 800 m, bien qu'il ait déjà une foulée dans une course de type « all-out » (« course à fond ») jusqu'à l'arrivée.
- La troisième cassure s'observe après le 800 m (cours en moins de 2 minutes par les élites féminines) ; elle correspond à un mode de production énergétique dont la dominante est aérobie sollicitant la consommation maximale d'oxygène. Il est possible, pour un triathlète par exemple, de comparer sa puissance maximale aérobie avec sa vitesse maximale aérobie que nous pouvons traduire en puissance (voir encadré 3).

Il faut souligner que nous avons décrit notre métabolisme en utilisant l'image d'une voiture hybride à 3 moteurs. Ces trois moteurs agissent de façon synchrone et on parle davantage de dominante que de « filière » (je pense que ce jargon sportif brouille les esprits en cachant cette synergie entre les métabolismes aérobie et anaérobie).

Il importe également de comprendre que chaque point de cette courbe de vitesse en fonction de la distance de course (et donc de leur durée), cache des variations de vitesse intra course. Par conséquent, il est fort possible de solliciter  $\text{VO}_2\text{max}$  ou même le métabolisme anaérobie dans certaines phases du marathon comme un départ rapide ou une accélération au sein de la course, surtout dans le cadre des championnats où seul le podium compte.

Figure 7a

Courbe de vitesse en fonction de la distance : du 100 m au 100 km (100 000 m).

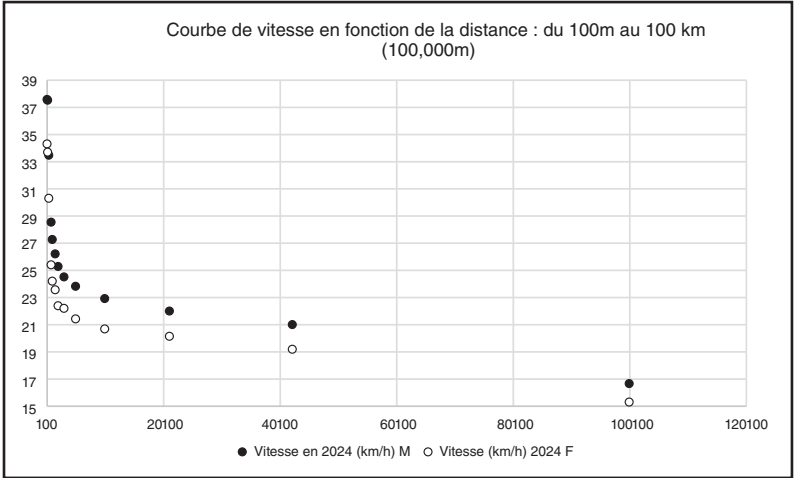


Figure 7b

Courbe de vitesse en fonction de la distance : du 100 m au marathon km (100 000 m).

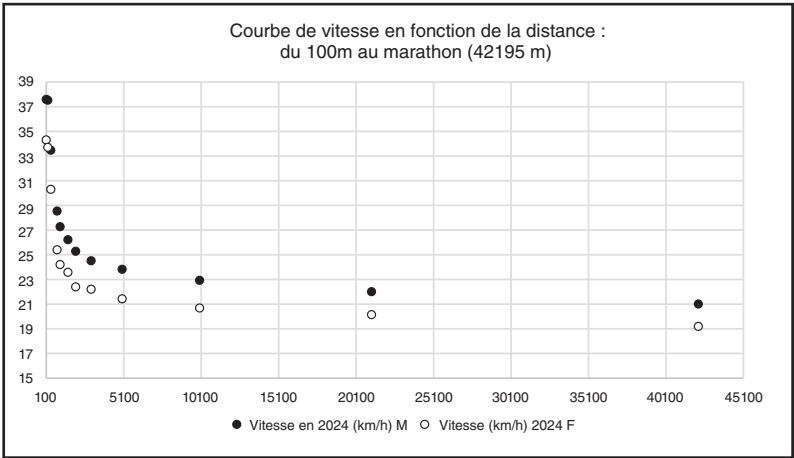
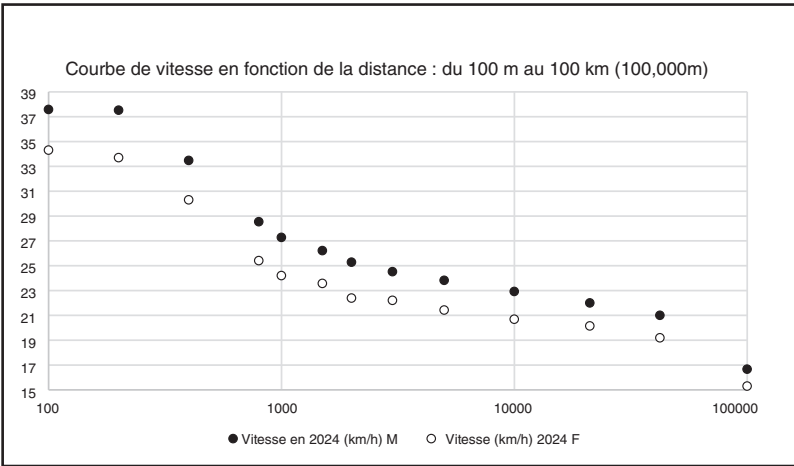


Figure 7c

Courbe de vitesse en fonction de la distance : du 100 m au 100 km (100 000 m sur l'axe des x)



## Encadré 1

### La différence entre une vitesse moyenne et une vitesse de pointe sur un 100 m.

**Calcul de la vitesse moyenne d'Usain Bolt** (<https://progresser-en-maths.com/quelle-est-la-vitesse-dusain-bolt/>)

Commençons par un calcul plutôt simple. On utilise la formule qui dit que la vitesse moyenne ( $v$ ) est la distance ( $d$ ) divisée par le temps ( $s$ ). Ce qui permet alors d'écrire cette formule sous la forme  $v = d/t$ . On a donc une distance de 100 mètres divisée par 9,58 secondes ce qui nous donne 10,43 mètres par seconde.

Ce résultat n'est pas très parlant. Il faut donc le transformer en kilomètres par heure (km/h). Si on parcourt 10,43 mètres en une seconde (c'est ce que veut dire 10,43 mètres par seconde), cela signifie qu'en une minute on parcourt 60 fois plus et qu'en une heure, on parcourt  $60 \times 60 = 3\,600$  fois plus. On obtient donc  $10,43 \times 3\,600 = 37\,548$  mètres en une heure. On divise par 1 000 pour obtenir des kilomètres, ce qui donne une vitesse moyenne de sprint à 37,548 km/h.

Revenons sur ce calcul. On a donc d'abord multiplié par 3 600 pour passer des secondes aux heures puis divisé par 1 000 pour passer des mètres aux kilomètres. Il suffit en fait de multiplier des mètres par secondes par  $3\,600/1\,000 = 3,6$  pour obtenir des kilomètres par heure :  $10,43 \times 3,6 = 37,548$  km/h.

L'homme le plus rapide sur Terre se nomme évidemment Usain Bolt. Le Jamaïcain détient le record du monde du 100 m (9s58) et du 200 m (19s19) depuis 2009 et les championnats du monde d'athlétisme de Berlin, en Allemagne. Lors de cette course, il avait atteint une vitesse moyenne de 37,58 km/h. Sa vitesse de pointe avait été enregistrée à 44,72 km/h sur le tronçon 60-80 m.

Dans le football, plusieurs joueurs se sont déjà rapprochés de Bolt. Cristiano Ronaldo est celui qui détient la meilleure performance dans le milieu du ballon rond. À l'occasion de la Coupe du monde 2018, la star portugaise avait été flashée à 38,9 km/h lors du match Espagne – Portugal. Désormais, c'est surtout Kylian Mbappé qui affole les radars. L'attaquant du Paris Saint-Germain détient un record de vitesse de pointe en match à 38 km/h. Cette saison-là, il est de nouveau le joueur le plus rapide en Ligue 1.

#### Calcul de la vitesse maximale d'Usain Bolt

La vitesse de pointe d'Usain Bolt est de 44,72 km/h, ce qui lui permet d'échapper presque au loup (50 km/h) et certainement à l'alligator en Floride par exemple (32 km/h).

Des chercheurs ont montré (Mero et al., 1992) que la vitesse maximale pouvait être atteinte en environ 5 secondes de course. Comme on l'a vu plus haut, la vitesse maximale d'Usain Bolt est de 44,72 km/h ou en divisant cette fois par 3,6, on peut dire qu'elle est de 12,4 m/s. Si on suppose que son accélération est constante, elle sera alors de  $12,4 / 5 = 2,48 \text{ m/s}^2 = 8,9 \text{ km/h/s}$ . Cela veut dire que chaque seconde Usain Bolt augmente sa vitesse de 8,9 km/h à supposer que l'accélération soit constante. Or ce n'est pas le cas, donc au plus fort de son accélération, il a bien dû dépasser les 10 km/h par seconde.

*Pour aller plus loin : Mero, Antti & Komi, P.V. & Gregor, Robert. (1992). Biomechanics of Sprint Running. Sports medicine (Auckland, N.Z.). 13. 376-92. 10.2165/00007256-199213060-00002.*

La vitesse de pointe est celle qui nous a permis de survivre et notre endurance de devenir les humains que nous sommes actuellement : avec des outils et des idées (pas toujours utilisés à bon escient !). Bien que le guépard soit reconnu comme l'animal terrestre le plus rapide, on sait peu de choses sur d'autres aspects de ses remarquables qualités athlétiques, en particulier lorsqu'il chasse dans la nature. Wilson et al. (1993) (Wilson, A., Lowe, J., Roskilly, K. et al. *Locomotion dynamics of hunting in wild cheetahs. Nature* 498, 185–189 (2013)) ont utilisé un nouveau collier contenant une combinaison de systèmes de positionnement global (GPS) et d'unités de mesure inertielle, pour capturer la dynamique locomotrice et les résultats de 367 courses de chasse prédominantes de cinq guépards sauvages au Botswana. Une vitesse maximale remarquable de 25,9 m s<sup>-1</sup> (93 km h<sup>-1</sup>) a été enregistrée sur 1 à 2 secondes. Cependant, la plupart des chasses de guépards n'impliquent que des vitesses modérées. À ce propos, le guépard ne pousse sa pointe de vitesse qu'un peu plus de 1 fois par jour. La distance moyenne de course était de 173 m ( $\pm 116$  m) et les tentatives de captures sont plus courtes, les guépards jugeant rapidement des chances de succès. Les courses les plus longues enregistrées par chaque guépard étaient comprises entre 407 et 559 m ; la fréquence moyenne des courses (y compris les informations provenant des données d'activité) était de 1,3 fois par jour, donc, même si certaines chasses ont été manquées, la locomotion à grande vitesse n'a eu lieu qu'une fois par

## Encadré 2

## La bio-inspiration animale : nous utilisons une grande palette de vitesses pour faire face à notre environnement et progresser.

Daniel E. Lieberman, professeur de biologie humaine évolutive à Harvard qui a écrit plus d'une centaine d'articles, (dont beaucoup ont été publiés dans les revues prestigieuses de référence *Nature* et *Science*), est connu pour ses recherches sur l'évolution de la tête humaine et l'évolution de la course, et notamment de la course pieds nus (ce qui lui a valu le surnom de Barefoot Professor – le professeur pieds nus). Il souligne les désavantages du bipédisme en cela qu'il nous a fait perdre de la vitesse avec l'impossibilité de galoper et de grimper rapidement aux arbres pour échapper à nos prédateurs (Lieberman, 2021). Or, il y a 17 espèces de mammifères qui courent à plus de 20 m/s (72 km/h) (Garland, 1983). Le champion du monde de vitesse est le guépard avec une pointe de vitesse à 29 m s<sup>-1</sup> (104 km/h). Nous avons été les friandises de ces gros félins, mais au fil des millions d'années, les survivants furent très endurants et habiles pour élaborer des outils pour se défendre et manger... de la viande d'animaux plus rapides mais plus fatigables. Nous avons également appris à apprivoiser des animaux prédateurs pour nous aider à chasser. Nos chiens de chasse, et nos chiens de course (comme les lévriers) courent plus vite que nos sprinters. Les courses de lévriers sont remportées à une vitesse de 15 ms<sup>-1</sup> (54 km/h). La vitesse la plus élevée enregistrée par Matthews (1994) sur des chevaux de course est de 19,2 ms<sup>-1</sup> sur 402 m (70 km/h) : ils ne sont que des proies et même les mâles ne peuvent protéger les juments qui doivent donc courir aussi (si ce n'est) plus vite que leurs homologues males.

Même si nous avons la possibilité de chasser à cheval à grands galop, nous sommes aussi capables de courir pendant plusieurs jours et le record des 1 000 km (non officiel) est de 8 jours 04 heures 13 minutes accompli par un homme de 54 ans en 2014. Deux années plus tard, le même homme, Patrick Malandain a franchi la ligne d'arrivée à Deauville, 100 jours après être parti du Havre le 18 février 2016. En effet, ce spécialiste des courses à pied de longue distance a établi pour l'occasion un record du monde : 10 000 km en 100 jours.

Notre avantage est de savoir évacuer l'énergie que nous produisons sous forme de chaleur (car notre rendement mécanique est seulement de 25-30 %) et nous étudierons comment cela se produit dans le chapitre *Environnement physique et performance sportive : température et altitude* en fin d'ouvrage.

À propos d'adaptation à notre environnement, il faut considérer avec Léonard de Vinci, au XVI<sup>e</sup> siècle, cette leçon de sagesse « Prenez vos leçons dans la nature, c'est là qu'est notre futur... » ! Le biomimétisme (Benyus, 2011) et la bio-inspiration sont des approches consistant à étudier la nature sous toutes ses formes, animaux, plantes, champignons, micro-organismes, écosystèmes, et à en tirer des développements technologiques. On s'en inspire alors afin de concevoir des stratégies, des matériaux ou des procédés novateurs au service de l'humain, moins polluants, moins consommateurs d'énergie, recyclables, plus sûrs, de meilleure qualité et à moindre coût. Pour ce qui concerne la façon de courir, il faut respecter des phases de récupération et adopter la sieste lorsque nécessaire ! Les animaux sont entraînables, mais comme nous, il faut le faire en jouant sur les enchainements d'accélération et de décélération, également afin de récupérer de l'énergie au sein de notre moteur hybride et éviter de provoquer une acidose précoce ou une déplétion en substrat énergétique comme celles de nos réserves de sucres (glycogène).

Pour aller plus loin :

Janine M. Benyus : *Biomimétisme : quand la nature inspire des innovations durables*, Rue de l'échiquier, mai 2011.

Daniel E. Lieberman : *Exercised. The science of physical activity, rest, and health*. 440 pages, Penguin books, 2021

Wilson, A. M.; Lowe, J. C.; Roskilly, K.; Hudson, P. E.; Golabek, K. A.; McNutt, J. W. (2013). *Locomotion dynamics of hunting in wild cheetahs*. *Nature*, 498(7453), 185–189.

Rebecca Wheatley, Michael J. Angilletta, Amanda C. Niehaus, Robbie S. Wilson, *How Fast Should an Animal Run When Escaping? An Optimality Model Based on the Trade-Off Between Speed and Accuracy*, *Integrative and Comparative Biology*, Volume 55, Issue 6, December 2015, Pages 1166–1175

Matthews, A., & Cripps, P. J. (1994). *The maximal speed of thoroughbred and quarter horses*. *Equine Veterinary Journal*, 26(3), 230-232

Garland, T. (1983), *The relation between maximal running speed and body mass in terrestrial mammals*. *Journal of Zoology*, 199:157-170

### Encadré 3

## Comment passer de la vitesse à la puissance en course à pied sans avoir besoin de capteurs spécifiques ?

La puissance en course à pied (watts) est calculée en divisant l'énergie produite (joules) par unité de temps (secondes).

La puissance est proportionnelle au cube de la vitesse (équation 1) (cf. page 25 1.2.2)

La vitesse de course = Fréquence de foulée  $\times$  amplitude du pas (équation 1)

Où la vitesse est en m.  $s^{-1}$ , la fréquence de pas est en hertz, c'est-à-dire en nombre de pas par seconde et l'amplitude du pas est la distance qui sépare la pose d'un pied à l'autre.

La puissance est une grandeur physique qui mesure la quantité d'énergie fournie par un système à un autre par unité de temps. Elle est exprimée en watts (W) dans le système international d'unités (SI). La puissance est utilisée pour mesurer la vitesse à laquelle le travail est effectué (en joules). Par exemple, si un travail de 100 joules est effectué en 10 secondes, la puissance est de 10 watts.

En course à pied, nous considérons principalement l'énergie cinétique qui est donc définie par l'équation

Énergie cinétique =  $\frac{1}{2} mV^2$  (équation 2)

Où m est la masse du coureur, et V est sa vitesse de déplacement.

Or la Puissance (watts) = Énergie cinétique (joules)/temps (s)

Ou bien encore Puissance =  $\frac{1}{2} mV^2 \times$  fréquence de pas ( $s^{-1}$ ) (équation 3)

Où m est la masse donc le poids du coureur divisé par 9,81 Newton car le poids et la masse d'un objet sont deux grandeurs proportionnelles. Cela s'écrit  $P = m \times g$  où : P est l'intensité du poids (en N) ; m est la masse (en kg) ; g est l'intensité de pesanteur (en N/kg). À la surface de la Terre,  $g \approx 9,8 \text{ N/kg}$

Donc pour courir un 2 000 m à 7 m.  $s^{-1}$  (record du monde sur la distance établie par Jakob Ingebrigtsen qui pèse 65 kg pour 1m81) avec une fréquence de pas de 3 Hz (180 pas à la minute par exemple), nous aurons une valeur de puissance spécifique de :

Puissance =  $(0,5 \times 65 \times 7^2 \times 3) / 9,81 = 487 \text{ watts}$  soit 7,5 watts/kg (équation 4) ce qui équivaut à la puissance maximale aérobie de Lance Armstrong qui pesait 10 kg de plus pour une puissance maximale aérobie de 520 watts qu'il maintenait 7 minutes.  $(520/75 = 6,9 \text{ W/kg})$ .

Le dopage avait surtout de l'effet sur sa capacité à maintenir un très haut pourcentage de sa PMA sur des heures de pédalage (définition de l'endurance).

jour et la locomotion à grande vitesse n'a représenté qu'une petite fraction des 6 040 m de distance moyenne quotidienne parcourue par les guépards (un peu inférieure à la distance couverte par un attaquant en football). Mais le footballeur, quant à lui, doit négocier entre la pointe de vitesse et la précision, et les chercheurs ont élaboré des modèles d'optimalité inspirés de l'observation des animaux. Plus l'animal court vite, plus il a de chances de déjouer le prédateur ; cependant, plus il court vite, moins il contrôle l'endroit où il pose ses pattes et plus il risque de commettre une erreur et de glisser, ce qui pourrait entraîner sa capture. Pour s'échapper, il doit donc choisir une vitesse qui lui permette d'avoir la plus grande probabilité d'échapper au prédateur, tout en minimisant sa chance de commettre une erreur importante. En d'autres termes, il doit équilibrer le compromis entre vitesse de course et précision (Wheatley et al., 2015) (Wheatley R, Niehaus AC, Fisher DO, Wilson RS. Ecological context and the probability of mistakes underlie speed choice. *Funct Ecol.* 2018; 32: 990–1 000). Nous devons nous aussi

nous adapter à l'environnement de la performance (terrain, température, altitude, enjeux économique et social).

Le marathonien doit également choisir entre vitesse cible trop élevée et le risque de frapper le mur de la fatigue au 26<sup>e</sup> km, et pour cela il peut osciller autour de sa vitesse critique que nous allons définir et déterminer sur les humains, sur des individus élites ainsi que sur des coureuses(rs) de niveau national et régional ou de loisir (Billat et al. 2020) (Billat, V.; Vitiello, D.; Palacin, F.; Correa, M.; Pycke, J.R. *Race Analysis of the World's Best Female and Male Marathon Runners. Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 1177).

#### 1.1.3 Détermination de la vitesse critique et de la distance anaérobie en utilisant les performances.

La performance est riche d'indications pour déterminer le profil énergétique d'un ou d'une cou-

reuse. Cela s'applique également à tous les sports de locomotion mais de façon plus fiable en course à pied qui ne dépend pas (trop) de la technique. Il « suffit » de courir le plus vite possible sur une distance comprise entre 1,5 et 10 km pour évaluer son profil énergétique aérobie et anaérobie. En effet, il suffit d'utiliser les records sur différentes distances de courses entre 1 500 m et 10 000 m (dans l'idéal il faut quatre performances sur quatre distances différentes incluses entre ces deux-là), vous allez pouvoir constater que la relation entre la distance de course (sur l'axe des y) et l'axe du temps record sur chaque distance (sur l'axe des x) suit une relation parfaitement linéaire (figure 8). Prenons pour exemple, la détentrice du meilleur temps sur le marathon : l'Éthiopienne Tigst Assefa qui a pulvérisé le record du monde du marathon féminin, avec un temps de 2 heures, 11 minutes et 53 secondes, au marathon de Berlin 2023. À cette occasion, Assefa a abaissé de plus de deux minutes le record du monde de la Kenyane Brigid Kosgei, qui était de 2:14:04 lors du marathon de Chicago en 2019. Elle s'est imposée avec près de six minutes d'avance sur la Kényane Sheila Chepkirui. Déjà en 2022, elle avait créé la surprise en remportant ce même marathon en 2:15:37, le troisième temps féminin le plus rapide de l'histoire. Son seul temps sur marathon avant cela était de 2:34:01 (dans une course qu'elle a courue alors qu'elle était blessée). Avant cela, elle avait couru le 800 m et avait été éliminée dès les séries aux Jeux Olympiques de Rio en 2016. Cela pouvait paraître

extraordinaire, certes, mais l'examen de sa vitesse critique pouvait nous montrer une cohérence au regard des performances passées sur les plus courtes distances. Il faut d'ailleurs relever que son homologue masculin, Eliud Kipchoge qui court le marathon en 2 h 01 min 09 s (seconde meilleure performance mondiale en 2023), fut un brillant coureur de demi-fond avant de se lancer sur les longues distances (3 min 33 s 20s sur le 1 500 m) (Encadré 4).

Nous allons d'ailleurs calculer sa vitesse critique après celle de Tigst Assefa.

Le tableau 3 vous fournit les records, en course à pied, de la marathonienne du 800 m au marathon à partir desquels vous aller pouvoir calculer sa vitesse critique (figure 8).

L'équation de la droite de Assefa est la suivante (équation 5)

Distance = vitesse critique  $\times$  temps + distance anaérobie (Capacité de distance anaérobie traduit de l'anglais « Anaerobic Distance Capacity » ou ADC (équation 5)

Où la distance est en mètres, le temps est en secondes et la distance anaérobie est en mètres.

Appliquons l'équation 5 à Assefa :

Distance = 5,1835 m. s<sup>-1</sup>  $\times$  temps + 204,78 m (Equation 5)

La vitesse critique est la pente de la relation entre la distance et le temps. La pente, qui est représen-

Figure 8

Détermination de la vitesse critique d'Assefa. Chaque point représente une course (400 m, 800 m, 10 000 m, semi-marathon) (voir explication dans le texte).

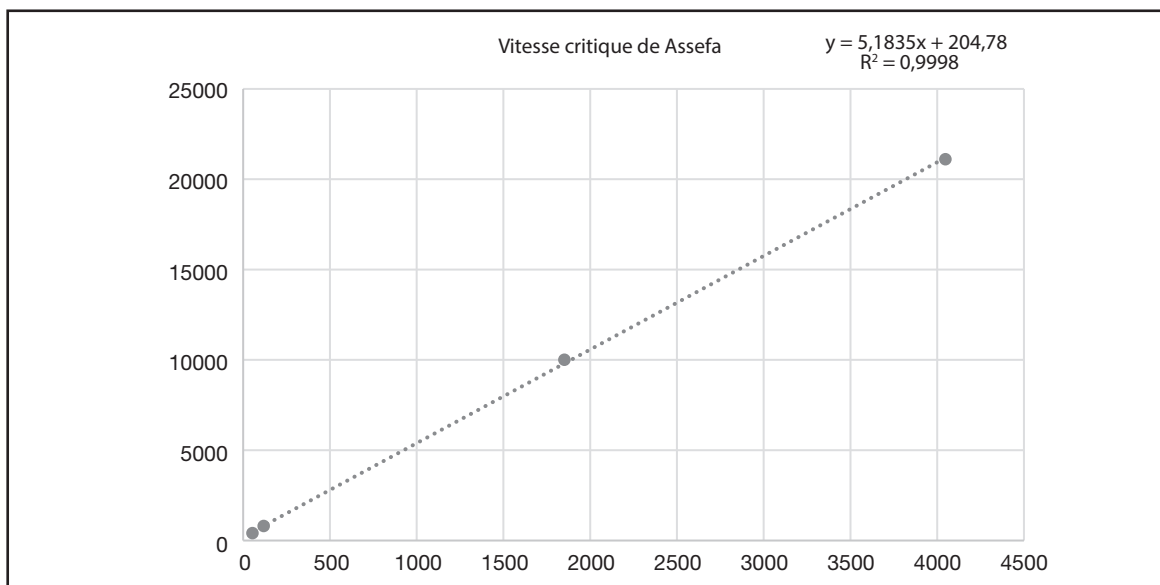


Tableau 3

| Distance (m) | Vitesse (km/h) | Distance (m) | Temps (s) | %Vitesse Critique |
|--------------|----------------|--------------|-----------|-------------------|
| 400          | 26,6419981     | 400          | 54,05     | 142,8             |
| 800          | 24,1529688     | 800          | 119,24    | 129,4             |
| 10 000       | 19,4384449     | 10 000       | 1 852     | 104,2             |
| 21 100       | 17,0008953     | 21 100       | 4 048     | 91,1              |
| 42 195       | 19,1965121     | 42 195       | 7 913     | 102,9             |

tée par la lettre  $m$ , mesure l'inclinaison de la droite. Elle correspond à la variation de la valeur de  $y$  lorsque  $x$  augmente d'une unité. Graphiquement, elle exprime la variation verticale de la droite pour un déplacement horizontal d'une unité positive.

Or cette pente est un rapport entre l'accroissement des distances et celle du temps et a donc bien pour unité celle de la vitesse ( $m.s^{-1}$ ). Elle représente l'intensité la plus élevée à laquelle un état physiologique stable peut être atteint. En effet, elle est supposée être une vitesse à partir de laquelle on ne peut plus stabiliser sa consommation d'oxygène dans le temps. En effet, au fur et à mesure que la fatigue musculaire survient, la fibre musculaire consomme plus d'oxygène par unité de temps ( $\dot{V}O_{2max}$  L/min) pour produire la même puissance. En effet, on recrute davantage de fibres (cellules) musculaires mixtes à la fois lentes et rapides pour assurer le maintien des vitesses dites alors supra-critique. On va atteindre  $\dot{V}O_{2max}$  au bout d'un certain temps (plus ou moins long selon que la vitesse soit plus ou moins supérieure à la vitesse critique). La Vitesse Critique indique le taux le plus élevé du métabolisme oxydatif, en dessous duquel l'équilibre physiologique peut être atteint et au-delà duquel une déviation progressive de l'homéostasie (équilibre du milieu intérieur) se produit, entraînant une intolérance à l'exercice (Poole et al. 2016) (Poole DC, Burnley M, Vanhatalo A, Rossiter HB, Jones AM. *Critical Power : An Important Fatigue Threshold in Exercise Physiology. Med Sci Sports Exerc.* 2016 Nov ; 48(11):2320-2334). Lorsque vous courez à votre Vitesse maximale aérobie sur un 2 000 m vous courez à 115 % de votre vitesse critique. Ou encore, cela revient à dire que la vitesse critique correspond à 85 % de la vitesse maximale aérobie. Nous développerons ces concepts plus avant dans le chapitre concernant l'application à l'évaluation du profil énergétique pour l'entraînement personnalisé dans le chapitre 6 page 290.

On appelle donc la « Anaerobic Distance Capacity » (ADC) l'intercept à l'ordonnée de la relation

linéaire reliant vos distances de course et vos temps records sur ces distances. Cette distance (ici en mètres) est théoriquement la distance que vous pouvez courir à une vitesse supérieure à cette vitesse critique. L'ADC est donc la distance finie qui peut être parcourue au-dessus de la vitesse critique (Jones AM, Vanhatalo A, Burnley M, Morton RH, Poole DC. *Critical power: implications for determination of  $O_2$  max and exercise tolerance. Med Sci Sports Exerc.* 2010 Oct;42(10):1876-90).

Cette distance, pour Assefa, ex-coureuse du 800 m, donc habituée à courir au-dessus de sa vitesse critique, est de 205 m ce qui est une valeur moyenne située entre des valeurs basses inhérentes aux marathoniens qui n'ont jamais courus en demi-fond, et celles des demi-fondeurs 350 m. Étant donné que pour Assefa nous ne disposons que de ces références, il faut souligner que le fait de mettre des records sur des distances qui impliquent aussi le métabolisme anaérobie (400 et 800 m) ainsi que son  $\dot{V}O_{2max}$ , peut contribuer à trouver une vitesse critique un peu surestimée. On voit bien que si l'on ne prenait que les deux courses de fond (10 et 21 km) on aurait alors un résultat différent avec une vitesse de 18,18 km/h au lieu de 5,1835  $m.s^{-1}$  c'est-à-dire 18,66 km/h.

On peut d'ailleurs constater que le point qui est au-dessus de la droite de régression est sa performance sur le 10 000 m alors que celle sur le semi-marathon est juste sur la droite.

Le plus extraordinaire est que sa vitesse sur le marathon est courue au-dessus de sa vitesse critique (à 102 %, tableau 3) alors que la littérature rapporte des valeurs de 93 % pour les marathoniens élités (Smyth et al., 2020). Il est fort à parier que Assefa pourrait tenter de battre son record sur des distances plus courtes que le marathon. Mais, l'enjeu économique est probablement moins intéressant que celui de gagner les primes d'engagement et de victoires sur les grands marathons du circuit international. Il faut tenir compte de tous les aspects de la performance et comprendre qu'il s'agit d'une carrière qui peut être certes longue

Figure 9

Relation entre la distance de course du 800 m au marathon pour la détermination de la vitesse critique de la Super Coureuse Humaine. Notons que l'Anaerobic Distance Capacité (ADC) est de 195 m ce qui est la même que celle de Assefa notre record woman de marathon (Figure 8).

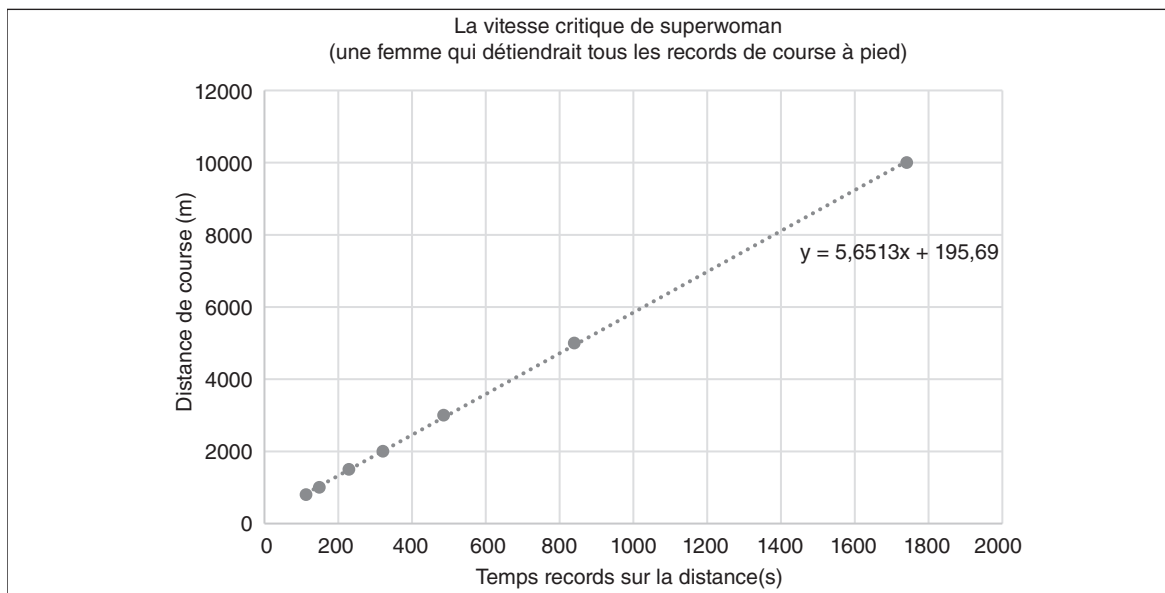


Tableau 4

Les records du monde féminins pour calculer la vitesse critique de Superwoman. Cette vitesse critique étant de 20,34 km/h qui est largement supérieure à la vitesse du record de l'heure actuel détenue par la Hollandaise Sifan Hassan à la vitesse moyenne de 18,93 km/h en 2020. Cependant, il est probable que cela ne soit pas très médiatisé et donc à faible impact économique, alors que c'est un exercice difficile de se battre contre le temps pendant un temps défini !

| Temps (secondes) | Distance (mètres) | Vitesse (km/h) |
|------------------|-------------------|----------------|
| 113,28           | 800               | 25,423729      |
| 148,98           | 1 000             | 24,164317      |
| 229,11           | 1 500             | 23,569464      |
| 321,56           | 2 000             | 22,390845      |
| 486,11           | 3 000             | 22,217194      |
| 840,21           | 5 000             | 21,423216      |
| 1 741,3          | 10 000            | 20,674209      |
| 3 772            | 21 100            | 20,137858      |
| 7 913            | 42 195            | 19,196512      |

(comme pour Eliud Kipchoge qui à 38 ans remportent les plus grands marathons après avoir brillé sur la piste), mais soumise aux aléas de la blessure. De plus, le marathon ne peut être couru autant de fois que les distances courtes.

Nous pouvons imaginer une super coureuse (une véritable superwoman) qui détiendrait tous les records du monde sur toutes les distances et calculer sa vitesse critique (figure 9) qui représenterait le summum de l'énergétique humaine au féminin (pluriel ici puisque pour l'heure cela concerne 8 athlètes pour les 9 records (puisque l'Éthiopienne Letesenbet Gidey détient les records sur le 10 000 m et le semi-marathon).

Cette vitesse est de 5,6513 m/s soit ( $5,65 \times 3,6$ ) de 20,34 km/h. Cette vitesse correspond à celle du record de l'heure, bien que Letesenbet Gidey eut été capable de courir plus vite sur son semi-marathon (tableau 4).

La vitesse critique de 19,97 km/h (figure 9) est inférieure à la vitesse sur semi-marathon (20,14 km/h). Elle est allée plus vite sur son semi que sur son 10 000 m. C'est elle la super athlète du futur !

Nous allons (parité oblige !) également déterminer la vitesse critique de Superman. Mais intéressons-nous, auparavant, à la vitesse critique d'un super athlète masculin, qui, à lui seul, a couvert toutes les distances du demi-fond et fond en plus de 20 ans de carrière (en 2024 il aura 40 ans). Il s'agit bien sûr d'Eliud Kipchoge (encadré 4, mention spéciale pour ce coureur à la longévité au plus haut-niveau) dont voici les records (tableau 5).

Tableau 5

Meilleures performances chronométriques d'Eliud Kipchoge sur différentes distances.

| Distance              | Temps    | Date              |
|-----------------------|----------|-------------------|
| 1 500 m               | 3:33.20  | 31 mai 2004       |
| Mile run              | 3:50.40  | 30 juillet 2004   |
| 3 000 m               | 7:27.66  | 6 mai 2011        |
| 2 miles               | 8:07.68  | 4 juin 2005       |
| 5 000 m               | 12:46.53 | 2 juillet 2004    |
| 10 000 m              | 26:49.02 | 26 mai 2007       |
| Semi-marathon         | 59:25:00 | 1 septembre 2012  |
| Marathon              | 02:01:09 | 25 septembre 2022 |
| Marathon non officiel | 01:59:40 | 12 octobre 2019   |

## Encadré 4

**Eliud Kipchoge EGH** (né le 5 novembre 1984) est un coureur de fond kényan qui participe au marathon et s'est auparavant spécialisé dans le 5 000 mètres. Considéré comme l'un des plus grands marathoniens de tous les temps, il est champion olympique du marathon en 2016 et 2020, et a été le détenteur du record du monde du marathon avec un temps de 2:01:09 établi lors du marathon de Berlin 2022, jusqu'à ce que ce record soit battu par Kelvin Kiptum lors du marathon de Chicago le 8 octobre 2023 avec un temps de 2:00:35. Il a couru cinq des dix marathons les plus rapides de l'histoire.

Kipchoge est né le 5 novembre 1984 à Kapsisiywa, dans le comté de Nandi, au Kenya. Il est diplômé de l'école secondaire Kaptel, dans le comté de Nandi, en 1999, mais ne pratique pas la course à pied de manière sérieuse ou professionnelle courant quotidiennement trois kilomètres pour se rendre à l'école. Kipchoge est élevé par une mère célibataire (une enseignante) et ne connaît son père que par des photos. Il est le plus jeune d'une famille de quatre enfants. Il a rencontré son entraîneur Patrick Sang (ancien médaillé olympique en steeple) en 2001 à l'âge de 16 ans. On peut donc constater que la rencontre d'un jeune talent avec un entraîneur non-moins talentueux avec en plus une mère qui a réussi à lui faire faire des études secondaires a été le terreau de sa réussite et longévité, tout comme son propre équilibre familial puisqu'il a trois enfants qui vivent à Eldoret, au Kenya.

Kipchoge a décroché son premier titre individuel de champion du monde en 2003 en remportant la course junior des Championnats du monde de cross-country et en établissant un record du monde junior sur 5 000 m sur piste. À l'âge de dix-huit ans, il est devenu

champion du monde senior du 5 000 m aux Championnats du monde de 2003, avec un record des Championnats, puis a remporté le bronze olympique pour le Kenya en 2004 et le bronze aux Championnats du monde en salle de 2006. Cinq fois finaliste des championnats du monde sur 5 000 m, Kipchoge a remporté des médailles d'argent aux championnats du monde de 2007, aux Jeux Olympiques de Pékin de 2008 et aux Jeux du Commonwealth de 2010.

Il est passé à la course sur route en 2012 et a fait le deuxième meilleur semi-marathon de tous les temps, en 59:25. Pour ses débuts sur marathon, il a remporté le marathon de Hambourg 2013 dans un temps record. Sa première victoire lors d'un marathon mondial majeur a eu lieu lors du marathon de Chicago en 2014, et il a ensuite été champion de la série cinq fois pour 2016, 2017, 2018, 2019 et 2022. Il a battu de 30 secondes son propre record du monde de 2018, qui était à son tour une amélioration de 78 secondes par rapport à la meilleure performance existante, la plus grande amélioration du temps d'un record du monde de marathon depuis 1967.

Le 12 octobre 2019, Kipchoge a couru la distance du marathon lors d'un marathon à Vienne, réalisant un temps de 1:59:40.2, devenant ainsi la première personne dans l'histoire enregistrée à faire un marathon de moins de deux heures. La course n'a pas été homologuée comme un nouveau record de marathon, car les règles de compétition standard pour le rythme et les liquides n'ont pas été suivies, et il ne s'agissait pas d'un événement ouvert aux coureurs autre que les lièvres de la course.

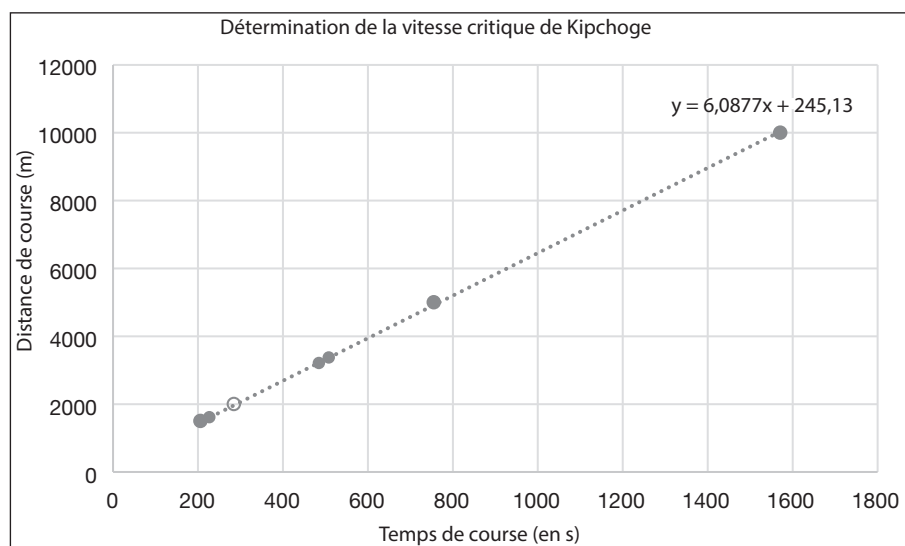


Figure 10a

Détermination de la vitesse critique de Kipchoge, notre super coureur, à lui seul il a une vitesse critique de 21,33 km/h (6,0877 m. s<sup>-1</sup>) avec une ADC de 245 m ce qui est un beau reste de son passé de demi-fondeur. Cette longévité est dû à son entraînement à vitesse et terrain variés.

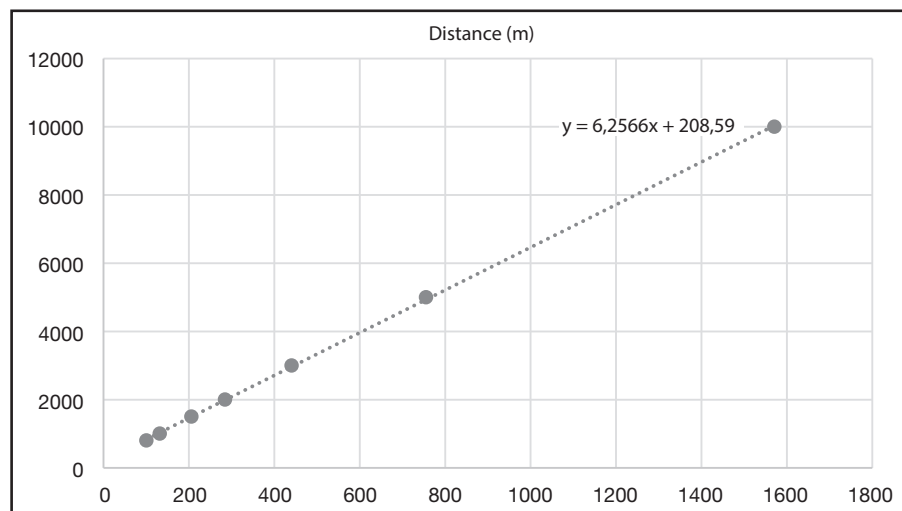


Figure 10b

La vitesse critique ( $6,2566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et son ADC (208 m) sur l'ensemble des records du monde de l'espèce humaine (figure 7) issus des données du tableau

Les meilleures performances d'Eliud Kipchoge sur différentes distances sont résumées dans le tableau 5. Nous observons un record du 10 000 mètres à 26 min 49 s et surtout un 1 500 m en 3 min 33 s et un 3 000 m en 7 min 26 s ce qui lui donne effectivement une grande réserve de puissance ou de vitesse. Cette grande « réserve » permet à Eliud Kipchoge de disposer de la possibilité de varier sa vitesse sur le marathon (Billat, *Révolution Marathon*, 2018).

Considérons à présent la vitesse critique et l'ADC de superman qui détiendrait tous les records en course à pied (Figure 10b).

Nous obtenons la vitesse critique (figure 10b) de 22,52 km/h ce qui correspond à la vitesse record sur semi-marathon (2 % plus rapide) qui dure moins d'une heure (57 min 32 s). L'ADC est également autour de 200 m donc inférieure à celle de Kipchoge.

Mais cette notion de puissance critique et d'ADC n'est bien sûr pas réservée aux coureurs pratiquant l'athlétisme à haut-niveau. Le tableau 8 et la figure 11 donnent l'exemple des records d'une juniore de niveau régional et de sa vitesse critique.

Sa vitesse critique est de 4,5389 m soit 16,34 km/h. Elle a réussi à courir en senior en 3 h au marathon soit à 14 km/h donc elle a mobilisé 86 % de sa vitesse critique ce qui est relativement moindre que pour les élites, ainsi que nous l'avons vu précédemment. Par ailleurs, sa vitesse critique de 16 km/h est de 2 km/h supérieure à sa vitesse sur marathon et 2 km/h inférieure à sa vitesse maximale aérobie. C'est donc une vitesse qui est une vitesse intermédiaire entre la vitesse sur marathon et la vitesse maximale aérobie pour des coureurs non-élites.

Tableau 6

La vitesse critique de Kipchoge est de  $6,0877 \text{ m/s}$  soit  $21,92 \text{ km/h}$  ( $6,0877 \cdot 3,6$ ). Afin de passer de la vitesse en mètres par seconde à une vitesse exprimée en  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , on multiplie la vitesse en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  par 3,6 puisqu'il y a 3 600 secondes dans une heure et 1 000 m dans un kilomètre. Cette vitesse de  $21,92 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , correspond effectivement à la vitesse moyenne qu'il pourrait tenter de soutenir dans un record de l'heure qui, rappelons-le, est de 21,33 km détenu par l'Anglais Mohamed Farah depuis 2020.

| Temps (s) | Distance (m) | Vitesse (km/h) |
|-----------|--------------|----------------|
| 213,2     | 1 500        | 25,3           |
| 230,4     | 1 609        | 25,1           |
| 447,66    | 3 000        | 24,1           |
| 487,68    | 3 218        | 23,8           |
| 766,53    | 5 000        | 23,5           |
| 1 609,02  | 10 000       | 22,4           |
| 3 565     | 21 100       | 21,3           |
| 7 269     | 42 195       | 20,9           |
| 7 180     | 42 195       | 21,2           |

Tableau 7

La vitesse critique de l'espèce humaine masculine est de 22,52 km/h ce qui correspond à la vitesse record sur semi-marathon (2 % plus rapide) qui dure moins d'une heure (57 min 32 s).

| Distance | Temps en 2024 (h, min, s) | Vitesse en 2024 (km/h) |
|----------|---------------------------|------------------------|
| 800 m    | 1min40,91                 | 28,54                  |
| 1 000 m  | 2min11,96s                | 27,27                  |
| 1 500 m  | 3min26,00s                | 26,21                  |
| 2 000 m  | 4min44,79s                | 25,28                  |
| 3 000 m  | 7min20,67s                | 24,51                  |
| 5 000 m  | 12min35,36s               | 23,82                  |
| 10 000 m | 26min11,00s               | 22,92                  |

| Distance (m) | Temps (min, s) | Temps (s) |
|--------------|----------------|-----------|
| 1 500        | 4 min 40 s     | 280       |
| 3 000        | 10 min 00      | 600       |
| 5 000        | 17 min 30 s    | 1 050     |

Tableau 8

Les records en demi-fond d'une juniore de niveau régional.

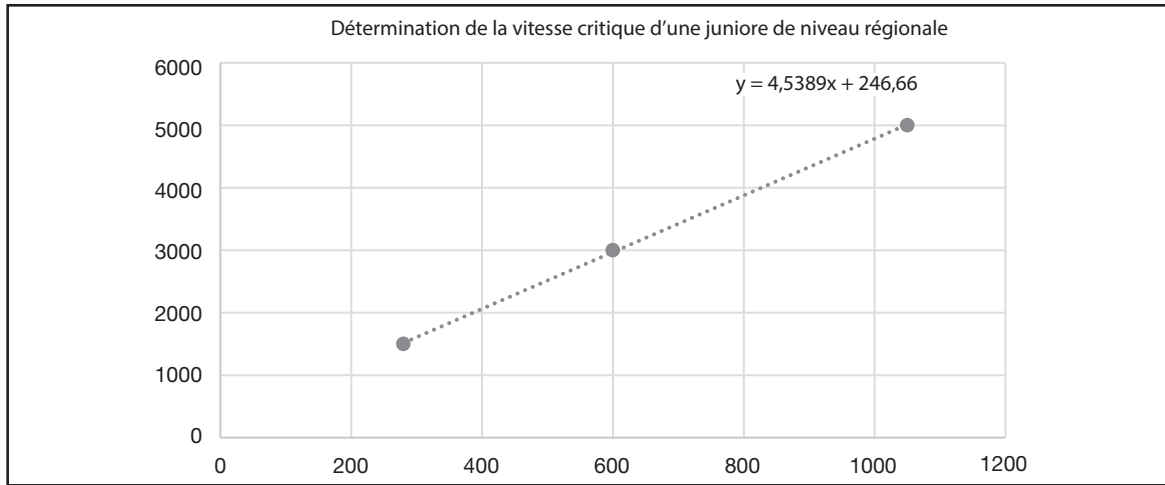


Figure 11

Les records en demi-fond d'une juniore de niveau régional.

## 1.2 Transfert d'énergie

### 1.2.1 L'énergie

L'organisme doit être sans cesse approvisionné en énergie sous sa forme chimique pour satisfaire ses différentes fonctions. Cela nous amène à définir ce qu'est l'énergie. Toute forme de travail biologique n'est possible, au départ, que par le transfert direct d'énergie chimique en énergie mécanique. En effet, tous les gestes sportifs sont réalisés grâce à notre capacité d'extraire l'énergie des nutriments (toute substance chimique utilisable par l'organisme sans digestion préalable), notamment les glucides, lipides, protides, que nous puisons dans notre alimentation pour les transférer aux protéines contractiles des muscles sollicités. La contraction musculaire n'est possible que par ce seul transfert d'énergie.

Pour autant, définir l'énergie n'est pas aisé, puisqu'elle n'a pas de taille, d'unité ou de masse. On peut seulement mesurer les effets de la transformation d'énergie dans ses différentes formes :

Énergie chimique (100%) →  
Énergie mécanique (25%) + Énergie thermique (75%).

La première loi de la thermodynamique, stipule que l'énergie est conservée sous différentes formes. Ainsi, elle ne se crée pas mais se transforme. Selon notre activité, nos besoins d'énergie prendront telle ou telle forme. Ainsi, lorsque nous bougeons, l'énergie est sous sa forme mécanique et thermique et le repos permet de reconstituer de l'énergie chimique. L'énergie des aliments se mesure en joules ou en calories (1 calorie = 4,18 joules), ce qui n'est pas sans rappeler l'unité utilisée pour quantifier le travail accompli exprimé également en joules (J).

### 1.2.2 La puissance

En bioénergétique la puissance permet de décrire et quantifier l'activité musculaire sur un plan mécanique. Pour mesurer la puissance, il s'agit d'abord de quantifier la *force* et le *travail*.

La *force* mesure la capacité à accélérer de  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  une masse de 1 kg selon la deuxième loi de la mécanique énoncée par Newton :

$$F = m \times a$$

où  $m$  est la masse (en kg) et  $a$  l'accélération (en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

Le *travail* est l'application d'une force ( $F$ , en newtons) sur une distance ( $d$ , en mètres) selon la formule :

$$W = F \times d$$

Le terme de travail, qui est l'application d'une force sur une distance (l'unité de mesure étant le kilogramme par mètre ou le newton par mètre), peut être pris au sens de quantité d'énergie produite, alors exprimée en joules, sans aucune référence à une vitesse ou à une puissance. En effet, nous verrons que parcourir 10 km à 10 ou 20 km/h, pour un même coureur, représente le même travail, la même dépense énergétique : soit 4,18 kJoules par kilomètre et par kilogramme de poids de corps transporté.

La *puissance* dépend de l'énergie que nous sommes capables de transférer par unité de temps. Ce travail ( $W$ ) par unité de temps est donc mesuré en joules par seconde. Ces dernières sont des watts dans le système international d'unités de mesure. Cette puissance mise en œuvre va nous permettre de courir, nager, nous déplacer à une certaine vitesse.

Si dans le travail, le temps n'est pas pris en considération, par contre la puissance ( $P$ ) intègre celui-ci.

ci puisqu'elle exprime la quantité de travail accomplie par unité de temps (t) :

$$P = W/t = f \times d \times t^{-1} \text{ or } d \times t^{-1} = v \text{ donc } P = f \times v$$

(Précisons que l'exposant négatif affecté à «t», revient à placer «t» sous une barre de fraction :  $t^{-1} = 1/t$ ).

### 1.3 Du coût au rendement énergétique des locomotions sportives

#### 1.3.1 Coût énergétique

L'énergie totale dépensée dépend avant tout de la distance parcourue et du poids de la personne, c'est-à-dire du travail (W) accompli. Cependant, nous avons vu précédemment que la puissance de l'exercice (exprimé soit en watts soit en joules.  $s^{-1}$ ) diminuait de façon très brutale (exponentielle, hyperbolique ou parabolique selon les modèles précédemment présentés) en fonction de la durée de l'exercice. Cela revient à dire que, même si le coût énergétique par unité de distance parcourue ne dépend pas directement de la vitesse, cette dernière conditionnant la durée de l'exercice (et donc la distance parcourue) va déterminer la dépense d'énergie totale d'un sportif. Ainsi par exemple, courir un 100 m ou nager un 25 m demande moins de 80 kilocalories (soit l'équivalent énergétique fourni par une banane), alors que courir un marathon ou nager 10 km nécessite, pour cette même personne de 80 kilogrammes, l'équivalent énergétique d'une journée entière (sans activité physique), soit environ 2 500 kilocalories. On dépense 4 fois plus d'énergie par unité de distance en nageant qu'en courant en raison du milieu aquatique qui crée de grandes résistances à la progression alors que, pour la course à pied (dans l'air), celles-ci sont négligeables jusqu'à 20 km.  $h^{-1}$ . Ceci nous renvoie à la notion de rendement énergétique.

#### 1.3.2 Rendement énergétique

Toutes les réponses physiologiques enregistrées lors de l'exercice dépendent de sa durée et de sa puissance. Le rapport entre la dépense énergétique d'un exercice, estimée par la consommation d'oxygène par le muscle notée  $\dot{V}O_2$  et la puissance correspond au rendement ( $\eta$ ) selon la formule :

$$\eta \text{ (en \%)} = [\text{Puissance mécanique} / \text{puissance biologique}] \times 100$$

où la puissance mécanique est exprimée en watts convertis en kJoules.  $\text{min}^{-1}$  et la puissance biologique en  $\dot{V}O_2$  en  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$  convertis en kJoules.  $\text{min}^{-1}$ . La conversion des kilojoules en litres d'oxygène est possible parce que l'équivalent calorique d'un litre d'oxygène consommé à partir de l'oxydation des glucides est d'environ 21 kJoules.

Prenons comme application du calcul du rendement le modèle d'exercice le plus simple : celui de la bicyclette ergométrique de type Monark à poids. En effet, cette bicyclette est calibrée pour permettre le calcul de la puissance mécanique produite par le sportif.

La force de freinage («f») est appliquée sur la roue à l'aide d'une courroie mise en tension par un poids suspendu à son extrémité. Or la puissance «P» est le produit de cette force de freinage («f») par la vitesse de pédalage («V») du sportif (fréquence de pédalage en cyclisme) et le développement de la bicyclette (D en mètres) :

$$P \text{ (kgf/min)} = f \text{ (kgf)} \times V \text{ (nombre de tours/min)} \times D \text{ (m)}$$

À chaque tour de pédale, la bicyclette avance (virtuellement car elle est fixe) de 6 mètres (qui est le développement D) contre une force de freinage («f») de 1 kilogramme. Le kilogramme force (kgf) est une unité exprimant la force de freinage exercée par le poids qui détermine la tension de la courroie sur la roue de la bicyclette. Le kilogramme force est en fait la force définie comme le poids d'une masse de 1 kg. On l'appelle ainsi pour le distinguer du kilogramme désignant la masse. 1 kgf = 9,81 Newtons, unité du système international (conventionnel) désignant la force. L'encadré 5 donne les unités utilisées pour quantifier la force, la puissance et l'énergie de l'homme à l'exercice.

Si le sportif pédale à la fréquence de 60 tours par minute (1 tour par seconde) parcourant à chaque tour 6 mètres (développement de la bicyclette) contre 1 kilogramme force, sa puissance de pédalage sera alors de :

$$\begin{aligned} \text{Puissance (kgf} \times \text{m/s)} &= 1 \text{ (kgf)} \times 6 \text{ (m)} / 1 \text{ (s)} \\ &= 6 \text{ (kgf} \times \text{m/s)} \end{aligned}$$

Or 1 kgf = 9,81 newtons soit  $\approx 10$  newtons.

C'est pourquoi 6 (kgf  $\times$  m/s) vont nous donner 60 newtons  $\times$  m/s; sachant que la puissance s'exprime dans le système d'unités internationales (SI) en watts et que 1 watt = 1 N  $\times$  1 m/s, si le sportif pédale à la fréquence de 60 tours par minute (1 tour par seconde), parcourant à chaque tour 6 mètres (développement de la bicyclette) contre 1 kilogramme force, il va produire une puissance de :

$$\begin{aligned} \text{Puissance (watts)} &= 6 \text{ (kgf} \times \text{m/s)} \\ &= 60 \text{ newtons} \times \text{m/s} = 60 \text{ watts} \end{aligned}$$

À chaque incrément (augmentation) de 50 watts de la puissance, avec l'application d'une force de freinage sur la roue de 1 kilogramme et une fréquence de pédalage de 50 tours par minute, on trouve expérimentalement que le cycliste augmente sa consommation d'oxygène de 0,6  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ .

## Encadré 5

Les unités permettant de mesurer la masse, le poids, la force, la puissance et l'énergie. Les unités du système international (SI) sont indiquées *en italique*

→ **La masse** qui mesure la quantité de matière d'un corps dont l'unité est le kilogramme (kg) :

$$1 \text{ kg} = 2,204784 \text{ livres}$$

→ **La force** :

La force est le produit de la masse par l'accélération.  $f$  s'exprime en newtons (N) du nom de celui qui a mis en évidence la relation liant la force, l'accélération ( $a$ ) et la masse ( $m$ ) selon la formule :

$$f = m \text{ (kilogramme)} \times a \text{ (m/s}^2\text{)}.$$

Le *newton* est donc l'équivalent de la force que communique à un corps d'un kilogramme, une accélération d'un mètre par seconde au carré.

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2$$

→ **Le poids** :

Le poids est une force particulière. En effet, le poids «  $p$  » est la masse «  $m$  » sur laquelle est appliquée la gravité «  $g$  » qui est l'accélération des corps en chute libre grâce à l'attraction terrestre qui, par définition, a une valeur de  $9,80665 \text{ m/s}^2$  (on l'arrondit à la valeur de  $9,81 \text{ m/s}^2$ )

Le poids est produit de la masse par l'accélération :  $p = m \times g$

Le poids s'exprime en newtons.

Puisque  $p$  (newton) =  $m$  (en kilogramme)  $\times g$  (en  $9,81 \text{ m/s}^2$ ) on a pour 1 newton  $1 / 9,81$  ou plus précisément  $1 / 9,806665 = 0,101972 \text{ kg force}$ .

$$1 \text{ N} = 0,101972 \text{ kgf}$$

$$1 \text{ kgf} = 9,80665 \text{ N}$$

→ **Travail et Énergie** :

Le travail ( $W$ ) est défini comme étant l'application d'une force ( $f$ ) sur une distance ( $d$ ) :

$$W = f \times d$$

L'unité du travail et de l'énergie est le *joule* (J) Une autre unité de mesure de l'énergie est la calorie qui n'est pas une unité du

système international mais qui est encore couramment utilisée en nutrition car elle donne des valeurs moins élevées que les joules et donc plus faciles à manipuler mentalement. En effet  $1 \text{ calorie} = 4,1868 \text{ joules}$ ;  $1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ}$  et de fait  $1 \text{ kJ} = 0,238846 \text{ kcal}$  ( $1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal} = 1 \text{ cal}$ ).

Travail et énergie sont des grandeurs voisines, puisque le travail accompli entraîne une dépense d'énergie, et utilisent donc la même unité, puisque du travail accompli va dépendre la quantité d'énergie dépensée. De même, l'énergie calorifique renvoie à l'énergie sous la forme thermique puisque la définition de la calorie se réfère au réchauffement d'un gramme d'eau. En effet la calorie est la quantité d'énergie qu'il faut pour réchauffer de  $1^\circ\text{C}$  (entre  $14,5$  et  $15,5^\circ\text{C}$ ) un gramme d'eau, 1 kcalorie ou Cal étant la quantité d'énergie qu'il faut pour réchauffer de  $1^\circ\text{C}$  (entre  $14$  et  $15^\circ\text{C}$ ) un litre d'eau.

Attention : sur les emballages des aliments, leur valeur calorique est souvent exprimée en Calories ce qui est égal à 1 kcalorie soit  $4,18 \text{ kJoules}$  (unité du système international).

Une anecdote pour mémoire : Monsieur Joule qui donna son nom à l'unité du travail et de l'énergie était brasseur de bière de son état. Peut-être les sensations de réchauffement dues à l'alcool et de rafraîchissement dues à une pression mousseuse avaient-elles inspiré Monsieur Joule dans ses méditations sur les transferts d'énergie!

→ **La puissance** :

La puissance est définie comme étant le travail accompli par unité de temps. A travail produit égal, l'exercice le plus puissant sera celui qui accomplit ce travail le plus rapidement.

$$\text{Puissance en watts (W)} = \text{Travail (joules)} / t \text{ (secondes)}$$

Il faut faire attention à ne pas confondre l'abréviation qui désigne le travail (W) et celle qui désigne le watt (W). L'unité de mesure de la puissance est le watt (W).

En effet, La puissance mécanique est de :

$$\begin{aligned} 50 \text{ watts} &= 50 \text{ joules} \cdot \text{sec}^{-1} \\ &= 3000 \text{ joules} \cdot \text{min}^{-1} \\ &= 3 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1} \end{aligned}$$

La puissance biologique pour fournir 50 W est égale au  $\dot{V}\text{O}_2$  de repos ( $0,3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ) +  $\dot{V}\text{O}_2$  correspondant à 50 watts ( $0,6 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ );

Donc la consommation d'oxygène ( $\dot{V}\text{O}_2$ ) pour pédaler contre 50 watts est de  $0,9 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ; sachant que l'équivalent calorique d'un litre d'oxygène consommé est d'environ 21 kJoules, la puissance biologique correspondant à 50 watts d'énergie mécanique sera de :

$$0,9 \times 21 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1} = 18,9 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1}$$

### 1.3.3 Rendement brut ( $\eta_b$ ) et rendement net ( $\eta_{net}$ )

On distingue le rendement brut ( $\eta_b$ ), appelé ainsi parce qu'il inclut la consommation d'oxygène de repos, du rendement net ( $\eta_{net}$ ) qui tient seulement compte de l'énergie dépensée pour accomplir l'exercice et omet celle du repos. On peut alors calculer, à partir de l'exemple précédent, les rendements brut et net.

⇒ Le rendement brut ( $\eta_b$ ) sera de :

$$\eta_b \text{ (en \%)} = 3 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1} / 18,9 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1} \\ = 0,158 = 15,8 \%$$

Ce rendement est très bas et témoigne d'un important gaspillage d'énergie.

Par contre, si l'on retire la consommation d'oxygène de repos de la dépense énergétique totale, afin de ne prendre en compte que l'énergie nécessaire à l'exercice de pédalage, le rendement dit « net » ( $\eta_{net}$ ) va être alors supérieur au rendement brut.

⇒ On calcule alors le rendement net ( $\eta_{net}$ ) ainsi :

$$\text{On sait que la puissance mécanique est de} \\ 50 \text{ watts} = 50 \text{ joules} \cdot \text{sec}^{-1} = 3000 \text{ joules} \cdot \text{min}^{-1} \\ = 3 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1}$$

Or, la puissance biologique égale au  $\dot{V}O_2$  correspondant à 50 watts est l'équivalent de 0,6 l · min<sup>-1</sup> ce qui équivaut à :

$$0,6 \times 21 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1} = 12,6 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1}$$

On aura donc le rendement net ( $\eta_{net}$ ) :

$$\eta_{net} \text{ (en \%)} = 3 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1} / 12,6 \text{ kJoules} \cdot \text{min}^{-1} \\ = 0,238 = 23,8\%$$

Il faut remarquer que la différence entre le rendement net et brut diminue avec l'augmentation de la puissance de l'exercice et donc de la consommation d'oxygène totale, dans laquelle la consommation d'oxygène au repos va représenter une part de plus en plus négligeable.

### 1.3.4 Coût et rendement énergétiques en course à pied

La façon la plus simple de calculer le coût énergétique de la course à pied est de mesurer la consommation d'oxygène à une vitesse inférieure au début d'intervention du métabolisme anaérobie (sans oxygène) dans la couverture énergétique. En effet, pour les hautes vitesses (vitesses record du 100 au 800 m), il est difficile d'estimer le coût énergétique de la course à pied à partir de la consommation d'oxygène, puisque l'oxygène ( $O_2$ ) n'intervient pas (sur 100-200 m) ou pas uniquement sur 400-800 m (de par la durée de l'exercice) dans la transformation de

l'énergie chimique en énergie mécanique. La vitesse idéale pour mesurer le coût énergétique de la course par la consommation d'oxygène est égale à 60 % de la vitesse record du sportif sur un 1 000 mètres.

Ainsi pour un coureur réalisant le 1 000 m en 3 minutes (20 km/h), le coût énergétique sera évalué à 12 km/h. On constate alors qu'il consomme 42 mlO<sub>2</sub> · min<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup> à 12 km/h soit à 200 m/min (pour homogénéiser les unités par minute). Il aura donc un coût énergétique (CE) :

$$\text{CE (mlO}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}) = 42 \text{ mlO}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} / 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \\ = 0,210 \text{ mlO}_2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \\ = 210 \text{ mlO}_2 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

L'économie de course est la traduction littérale de « Running Economy » (Daniels et al., 1986), utilisée dans les articles scientifiques anglo-saxons. L'économie de course est la consommation d'oxygène pour une vitesse sous-maximale donnée. Dans l'exemple précédent, l'économie de course est de 42 mlO<sub>2</sub> · min<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup> à la vitesse de 12 km/h. Attention toutefois aux problèmes de traduction. En effet, un coureur qui aura une « économie de course » élevée (en mlO<sub>2</sub> · min<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup> à une vitesse donnée) sera moins économe que celui qui en aura une plus basse (42 mlO<sub>2</sub> · min<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup> à la vitesse de 12 km/h pour le coureur économe et 48 mlO<sub>2</sub> · min<sup>-1</sup> · kg<sup>-1</sup> à la vitesse de 12 km/h pour le moins économe).

### 1.3.5 Comparaison du coût énergétique de la course sur tapis roulant et sur piste

Pour une question de stabilité des conditions environnantes qui participent au coût énergétique et un parfait contrôle de la vitesse de course, la plupart des estimations du coût énergétique se déroulent en laboratoire sur tapis roulant. La validité de la simulation de course sur tapis roulant peut cependant être sujette à caution. Pugh (1970), grâce à un tapis roulant installé dans une soufflerie laminaire, a évalué la part du coût énergétique consacré à la lutte contre la résistance de l'air. Il précise que, pour des vitesses inférieures à 260 m/min (15,6 km/h), aucune différence significative n'est observée entre la course réalisée sur tapis roulant et celle à l'extérieur. Au-dessus de cette vitesse, la consommation d'oxygène (donc le surcroît de dépense énergétique,  $\dot{V}O_2$ ) augmente de façon exponentielle avec la vitesse :

$$\dot{V}O_2 = 0,002 \times V^3$$

où  $\dot{V}O_2$  est exprimé en ml · kg<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup> et V<sup>3</sup> en m/s.

On peut mesurer l'économie de course brute ( $\dot{V}O_2$ ) à une vitesse donnée (V) sur tapis roulant par

l'équation de Léger et Mercier (1984) (« brute » car la consommation d'oxygène de repos est comprise) :

$$\dot{V}O_2 = 2,209 + 3,1633 V$$

où  $V$  est la vitesse de course en km/h et  $\dot{V}O_2$  est la consommation d'oxygène ( $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ) à la vitesse  $V$ .

Cette régression a été validée à partir de 10 études pour un total de 130 sujets (71,5% d'hommes et 28,5% de femmes) entraînés (50%), non entraînés (31,5%), données non précisées pour les 18,5% restants. Cette formule est validée entre 8 et 20 km/h.

Sur piste, une consommation d'oxygène (coût énergétique aérodynamique) est à ajouter à celle envisagée sur tapis roulant. Ainsi, l'énergie nette de la course contre la résistance de l'air, est calculée selon l'équation de Pugh (1970) :

$$\Delta\dot{V}O_2 = 0,00354 A_p V^3$$

où  $\Delta\dot{V}O_2$  = la consommation d'oxygène supplémentaire (en l/min) due à la lutte contre la résistance de l'air;

$A_p$  = la surface en  $\text{m}^2$  du coureur projetée sur le plan frontal lorsqu'il court;  $A_p = 26,6\%$  de la surface corporelle =  $0,44 \text{ m}^2$  pour une surface corporelle de  $1,66 \text{ m}^2$  en prenant l'exemple d'un coureur de  $1,70 \text{ m}$  et  $60 \text{ kg}$ .

$V$  = la vitesse du vent et du déplacement (m/s)

Prenons l'exemple d'une course à  $15 \text{ km/h}$  ( $4,166 \text{ m/s}$ ) sans vent, pour laquelle le sportif va consommer :

$$\begin{aligned}\Delta\dot{V}O_2 \text{ à } 15 \text{ km/h} &= 0,00354 A_p V^3 \\ &= 0,00354 \times 0,44 \times 4,166^3\end{aligned}$$

$\Delta\dot{V}O_2$  à  $15 \text{ km/h} = 0,112 \text{ l/min}$  soit par rapport au tapis roulant où on a appliqué l'équation de synthèse de Léger & Mercier (1984) :

$$\begin{aligned}\dot{V}O_2 \text{ à } 15 \text{ km/h} &= 2,209 + (3,1633 \times 15) \\ &= 49,65 \text{ ml.min}^{-1}\text{kg}^{-1}\end{aligned}$$

Pour le coureur de  $60 \text{ kg}$ , cela représente une consommation d'oxygène de  $49,65 \times 60 = 2,979 \text{ l/min}$ , le  $\Delta\dot{V}O_2$  à ajouter pour donner le  $\dot{V}O_2$  à  $15 \text{ km/h}$  sur piste ne représente donc que  $0,112/2,979 = 0,037$  soit  $3,7\%$ , ce qui est négligeable si l'on considère que les erreurs de mesure de  $\dot{V}O_2$  peuvent entrer dans cette fourchette de pourcentage.

Par contre, pour la meilleure performance mondiale sur marathon (presque  $20 \text{ km/h}$ ) ou le record du monde du  $5\,000 \text{ m}$  (presque  $23 \text{ km/h}$ ), il devient important de ne pas négliger cette composante aérodynamique qui peut représenter la marge nécessaire pour battre ces vitesses record.

### 1.3.6 Coût et rendement énergétiques en natation : l'influence de la technique sportive

Le nageur doit lutter contre des forces opposées à son déplacement dans l'eau. Ces forces dépendent :

- de la forme du corps en contact avec l'eau;
- des forces de friction eau/surface du corps;
- de la formation de la vague.

Cet ensemble est constitutif de la « force de traînée du corps dans l'eau » (« drag force » en anglais) et est notée  $F_d$  ( $F$  force et  $d$  comme « drag » c'est-à-dire « traînée » en anglais) dans la plupart des articles scientifiques (di Prampero et al., 1974; Toussaint et Hollander, 1994). La force de traînée  $F_d$  est donc calculée par l'équation suivante :

$$F_d = K \times A_p \times v^2$$

où  $K$  est une constante incorporant la densité de l'eau (qui est moindre en mer que dans une piscine) et le coefficient de traînée, où  $A_p$  est la section frontale dans l'eau et où  $v$  est la vitesse de nage (Toussaint et Hollander, 1994).

L'énergie dépensée par le nageur à une vitesse donnée doit être égale ou opposée à  $F_d$ . Ainsi la puissance mécanique ( $P$ ) est le produit de la force de traînée ( $F_d$ ) par la vitesse soit :  $P = F_d \times v$ .

Di Prampero (1974) a procédé par ajout de forces additionnelles. Le nageur nage le crawl à vitesse constante en tractant une plate-forme portant une poulie au bout de laquelle sont suspendus des poids additionnels. Le nageur expire dans des sacs de Douglas afin de mesurer la consommation d'oxygène supplémentaire attribuée à l'augmentation de  $F_d$ .

Ce chercheur a pu ainsi mesurer le rendement de la nage en partant de l'équation :

$$\Delta P = \Delta F_d \times v$$

$$\Delta\dot{V}O_2 = \Delta P / \eta$$

où  $\Delta P$  et  $\Delta\dot{V}O_2$  sont les variations de puissance et de consommation d'oxygène dues à l'augmentation de la force de traînée ( $\Delta F_d$ ) générée par les poids ajoutés.

$\eta$  le rendement mécanique est égal au rapport entre  $P$  et  $\dot{V}O_2$ , c'est pourquoi on obtient alors :

$$\eta = \Delta P / \Delta\dot{V}O_2$$

Si on remplace  $P$  par  $\Delta F_d \times v$ , on obtient alors la formule :

$$\eta = \Delta F_d \times v / \Delta\dot{V}O_2$$

La vitesse de nage résultante sera alors de :

$$v = \dot{V}O_2(\text{net}) \times \eta / F_d$$

où  $\dot{V}O_2$  net est la consommation d'oxygène à la vitesse (v) moins la consommation d'oxygène de repos (0,3 l/min).

Le coût énergétique (CE) de la nage est de :

CE = 58,5 ml d' $O_2$ /m équivalent à 293 kcal/km  
(5 × 58,5 × 1000 ml d' $O_2$ ).

Si l'on veut comparer le coût énergétique de la course et de la nage, on peut rappeler que l'organisme consomme environ 1 kilocalorie (4,18 kJoules) par km parcouru et par kilogramme, soit 70 kcalories pour un homme de 70 kilogrammes parcourant 1 kilomètre.

Ainsi la nage nécessite une dépense énergétique de 293 kcal/km, 4 fois plus coûteuse ( $293/70 = 4,2$ ) par unité de distance que la course. C'est pourquoi, 10 % de gain sur le rendement va entraîner plus d'augmentation de vitesse de nage que ne le permettrait l'amélioration de la consommation maximale d'oxygène ou de la puissance anaérobie lactique.

La technique de nage et la morphologie restent la clef du succès en natation. Des scientifiques qui furent nageurs et/ou entraîneurs (Holmer, Costill, Chatard) ont bien cerné la question. Nous recommandons aux optionnaires STAPS natation et aux entraîneurs de s'y référer, l'article de synthèse de Toussaint et Holander (1994) les citant tous.

## 1.4 Transferts d'énergie

### 1.4.1 Métabolisme : définition

Le métabolisme est défini comme l'ensemble des échanges physiques et chimiques qui permettent les transferts d'énergie et qui se déroulent dans l'organisme, incluant la croissance, la maintenance, les transformations physiques et chimiques. Le métabolisme implique deux processus fondamentaux : l'anabolisme défini comme le processus de construction (telle l'augmentation de la masse musculaire), et le catabolisme, processus de dégradation. Nous avons vu au point 1.1.2 que tous les gestes sportifs sont réalisés grâce à notre capacité à extraire l'énergie des nutriments (toute substance chimique utilisable par l'organisme sans digestion préalable), notamment les glucides, lipides, protides, que nous puisons dans notre alimentation pour la transférer aux protéines contractiles des muscles sollicités. La contraction musculaire n'est possible que par ce seul transfert d'énergie.

### 1.4.2 Les transferts d'énergie par l'Adénosine Triphosphate (ATP)

Les muscles ne peuvent pas directement extraire l'énergie utile à leur contraction à partir des aliments. Nous disposons d'un intermédiaire entre

l'énergie libérée par les aliments et l'énergie nécessaire à la contraction musculaire. Cet intermédiaire est un composé phosphoré : L'ATP ou Adénosine Triphosphate dont la cassure libère l'énergie directement utilisable par la cellule musculaire pour sa mise en tension selon la modalité qui est décrite ultérieurement au chapitre II. L'ATP : adénosine triphosphate est donc un véritable « intermédiaire énergétique » entre les muscles et les nutriments. Elle est indispensable à l'organisme puisqu'une cellule sans ATP meurt rapidement.

La structure de l'ATP se compose de trois parties principales (figure 12) : (1) l'adénine, (2) le ribose, (3) trois phosphates liés. La formation de l'ATP se fait par la combinaison de l'adénosine diphosphate (ADP) et d'un phosphate inorganique (Pi) c'est-à-dire apporté par l'alimentation, cette association nécessitant une grande énergie (7 kcal par mole d'ATP resynthétisée à partir de l'ADP et du Pi). Une partie de cette énergie est stockée dans les liaisons chimiques entre l'ADP et le Pi. Aussi, ces dernières sont-elles qualifiées de liaisons « à haute énergie ». Lorsque l'enzyme ATPase rompt cette liaison, l'énergie (les 7 kilocalories qui avaient permis de former l'ATP) est libérée. Cette énergie peut alors contribuer à réaliser un exercice bref, comme une simple détente verticale. Mais l'ATP sert surtout d'intermédiaire, de monnaie d'échange énergétique, entre les nutriments et le muscle. En étant synthétisée, l'ATP permettra donc de disposer immédiatement d'énergie pour la contraction musculaire, ces stocks baissant rarement grâce à la mobilisation d'autres composés phosphorés, molécules permettant de resynthétiser rapidement de l'ATP. Un véritable cycle de l'ATP s'opère, pouvant se résumer par la réaction suivante :



Comment alimente-t-on cette synthèse de l'ATP pour la poursuite de l'exercice ? Cela dépend de sa vitesse (puissance), de sa durée (qui est liée à l'intensité ainsi que nous l'avons vu dans les modèles précédents), de sa modalité d'application : continue, discontinue à l'instar des sports collectifs et des entraînements dits « fractionnés » pratiqués par les sportifs qui préparent des épreuves continues et intenses comme dans le cas d'un coureur de 1 500 m.

Nous allons décrire le catabolisme qui utilise les nutriments pour fournir aux fibres musculaires le composé phosphoré, l'adénosine triphosphate qui apportera l'énergie nécessaire à la contraction musculaire; nous apprendrons que l'ATP est continuellement resynthétisée (anabolisme). Elle est une forme essentielle de stockage d'énergie dans la cellule. Sa structure

est présentée en figure 12. Les nutriments, se transformant en ATP, sont les carburants nécessaires à l'exercice. Ainsi par les aliments et l'ATP, l'énergie peut être stockée sous une forme chimique dans l'organisme avant de pouvoir être transformée en mouvement (forme mécanique de l'énergie) par les muscles.

Toutes les cellules ▼ de l'organisme ont la capacité de convertir les nutriments en une forme d'énergie biologiquement utilisable. Ce processus est qualifié de « bioénergétique » et il est fondamental pour comprendre la forme de la relation vitesse-temps, qui exprime le fait que l'être humain ne peut courir à  $36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $36 \text{ km/h}$ ) que quelques secondes seulement et plusieurs heures à  $16 \text{ km/h}$ .

### 1.4.3 Lois des transferts d'énergie dans l'organisme

Nous avons évoqué la première loi de la thermodynamique dite « de la conservation d'énergie » qui stipule que toute énergie ne peut être détruite mais est transformée d'une forme en une autre. La seconde loi de la thermodynamique précise que le résultat de ces transformations énergétiques est un désordre croissant (appelé l'entropie).

La seconde loi de la thermodynamique précise également que seule une forme d'énergie ordonnée, organisée (appelée énergie libre) peut être utilisée pour accomplir un travail. Cela signifie que l'entropie aug-

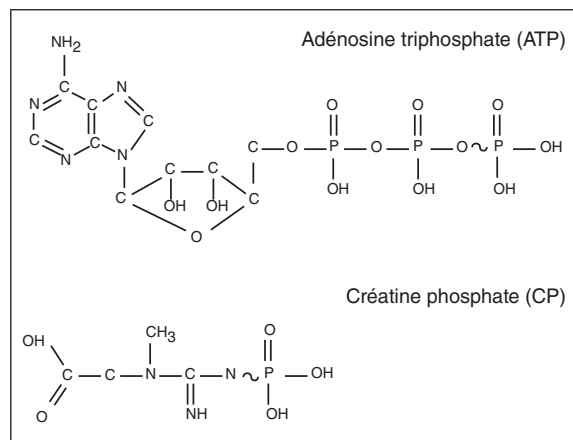


Figure 12

Composition moléculaire de l'ATP et de la CP.

mente à chaque fois que des transferts énergétiques sont opérés dans la cellule, de l'énergie libre étant utilisée (l'entropie augmente lorsque l'énergie libre diminue).

Conformément à la seconde loi de la thermodynamique, tout système va d'un niveau d'énergie élevé, vers un niveau à basse énergie. La contraction musculaire en est un parfait exemple puisque l'énergie chimique contenue dans les aliments (sous forme de liaison entre les atomes) est transformée en énergie mécanique (le mouvement) mais surtout en énergie thermique qui augmente la température corporelle jusqu'à  $40^\circ\text{C}$  à la fin d'un marathon. Cette accumulation de chaleur constitue

▼ La cellule est l'unité de base de l'organisme, la plus remarquable pour les activités sportives étant la cellule ou fibre musculaire squelettique que nous détaillerons dans le chapitre II et qui est capable de se raccourcir. La structure commune à toutes les cellules de l'organisme peut être divisée en trois parties fondamentales (figure 13).

- (1) La membrane cellulaire (également appelée membrane plasmique) est une barrière semi-perméable qui sépare la cellule de son environnement extracellulaire. Les deux fonctions les plus importantes de la membrane cellulaire sont d'englober les composants cellulaires et de réguler le passage des différentes substances à l'intérieur aussi bien qu'à l'extérieur de la cellule.
- (2) Le noyau, qui porte bien son nom quant à sa forme et à ses fonctions, contient tous les composants cellulaires des gènes qui vont permettre à la cellule de se reproduire à l'identique, donnant la carte génétique, véritable carte d'identité de la personne. Les gènes sont composés de la double hélice d'acide désoxyribonucléique, l'ADN, qui sert de base au code génétique. En bref, la fonction des gènes est de réguler la synthèse protéique qui détermine la composition et l'activité cellulaires. Le champ de la

biologie moléculaire est de comprendre la composition et la régulation des gènes (100 000 dans l'organisme). Chaque gène est responsable de la synthèse d'une protéine en particulier. Des signaux cellulaires régulent la synthèse des protéines en déclenchant ou en stoppant les gènes spécifiques. Il importe donc de mieux comprendre ces facteurs qui jouent sur les gènes. La biologie moléculaire est une discipline scientifique en plein développement et offre un intérêt nouveau à la science de l'exercice qui pourrait mieux comprendre les effets de tel ou tel type d'entraînement sur la synthèse protéique par les signaux cellulaires régulateurs. Dans une revue remarquable, Booth (1991) présente l'application de la biologie moléculaire à l'exercice.

- (3) Le cytoplasme (appelé également le sarcoplasme dans les cellules musculaires) est la partie fluide de la cellule située entre le noyau et la cellule membranaire. Sont également contenues dans le cytoplasme, diverses structures (organelles) spécialisées dans des fonctions particulières, comme la mitochondrie, véritable « usine à oxygène », considérée comme la centrale énergétique de la cellule puisque impliquée dans la conversion oxydative des nutriments en énergie utilisable par la cellule.

un facteur limitatif de la performance ainsi que nous l'examinerons dans le chapitre V traitant de l'environnement physique de la performance sportive. La chaleur résulte d'une agitation de molécules effectivement assimilée à un désordre, ce qui est conforme à la seconde loi de la thermodynamique.

L'organisme humain ne peut réutiliser cette chaleur dite « endogène » (créée par notre propre corps). Il lui faut donc, par un ensemble de réactions chimiques, transférer l'énergie sous ses formes diverses ainsi que nous l'avons précédemment évoqué.

Les réactions chimiques cellulaires permettent le transfert d'énergie dans le corps grâce à la cassure des liaisons chimiques (dites liaisons à haute énergie) entre les atomes des diverses molécules. On peut citer par exemple, la cassure du glucose (molécule à 6 atomes de carbone, 12 atomes d'hydrogène et 6 atomes d'oxygène :  $C_6H_{12}O_6$ ) en 6 molécules de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et 6 molécules d'eau ( $H_2O$ ) comme résultat des oxydations cellulaires (libération d'un atome d'hydrogène) au sein de la mitochondrie. En effet, si le glucose a un haut niveau d'énergie libre (4 kilocalories pour un gramme), l'eau n'a aucun pouvoir calorique (c'est pourquoi les sportifs mettent des préparations à base de glucose dans leur boisson de ravitaillement pour les épreuves supérieures à 1 heure).

#### 1.4.4 Réactions chimiques endergoniques et exergoniques (stockant ou libérant de l'énergie)

Ce transfert d'énergie dans la cellule apparaît comme le résultat d'une série de réactions chimiques. Beaucoup de celles-ci requièrent, pour leur amorce, de l'énergie supplémentaire à celle du réactant (molécules destinées à être rompues dans la réaction chimique). On qualifie ces réactions chimiques qui ont besoin d'énergie additionnelle pour leur « lancement », d'« endergoniques ». Cependant, puisque de l'énergie est ajoutée à la réaction chimique, le produit de cette réaction contient plus d'énergie que le réactant initial (le « substrat énergétique »).

La réaction de la transformation du glucose en gaz carbonique est dite « exergonique » puisque elle dégage de l'énergie (à partir du glucose). Beaucoup de réactions chimiques sont dites « couplées » puisqu'elles associent une réaction chimique à une autre, l'énergie libre de la première (de type exergonique) servant à déclencher la seconde (de type endergonique).

Les enzymes, protéines particulières, permettent d'accélérer ou de favoriser le déclenchement de ces réactions en évitant d'avoir recours à de l'énergie additionnelle.

Ainsi les enzymes diminuent l'énergie d'activation nécessaire au déclenchement de la réaction. Ils régulent aussi le cours de ces réactions et en contrôlent le déroulement, assurant de cette façon l'intégrité de l'organisme. Par exemple, à la fin d'un 400 m, l'organisme a une concentration musculaire d'acide lactique d'environ 20 fois celle de la valeur de repos, contribuant à rendre acides le muscle et le sang. Une enzyme (la phosphofructokinase) bloque la réaction de transformation du glucose en acide lactique afin de ne pas tomber en-dessous d'un taux d'acidité (ou pH, potentiel hydrogène  $\nabla$ ) compatible avec la vie.

Chaque enzyme ne peut réagir qu'avec un réactant particulier, qualifié alors de substrat énergétique. Un exemple d'enzyme qui peut, selon l'organe où il intervient, agir alternativement dans un sens ou un autre de la réaction chimique, est l'enzyme lactico-deshydrogénase (LDH) assurant la transformation d'un intermédiaire de la dégradation du glucose (glycolyse), l'acide pyruvique ( $C_3H_4O_3$ ) en acide lactique ( $C_3H_6O_3$ ) au sein du muscle squelettique, et inversement lorsqu'elle agit dans le muscle du cœur (le myocarde). La LDH a, en effet, plusieurs formes chimiques (isoenzymes) dont les isoenzymes LDH-M (M comme muscle) et LDH-H (H comme heart). Outre le pH sanguin, la température corporelle agit sur l'activité des enzymes (ceci étant développé ultérieurement dans le chapitre II). Ainsi, chaque enzyme a une température optimum où elle est la plus active.

En général, une petite augmentation de la température corporelle permet une augmentation de l'activité des enzymes, d'où la nécessité d'un échauffement préliminaire à tout exercice maximal de moins de 2 heures. Au-delà, il est préférable de partir avec la température corporelle la plus basse possible puisque, nous l'avons vu, la chaleur associée à la contraction musculaire pouvait s'accumuler et s'avérer être un facteur limitatif de la performance de longue durée. Le résultat de cette légère augmentation de température est donc une augmentation de la production d'ATP, ceci grâce à l'accroissement de la vitesse des réactions chimiques catalysées par les enzymes. Au contraire, une baisse de la température corporelle a pour effet une baisse de l'activité enzymatique.

#### 1.4.5 Métabolismes et reconstitution de l'ATP à l'exercice

Dans le cytoplasme et la mitochondrie se déroulent les réactions chimiques permettant de métaboliser les « carburants pour l'exercice  $\nabla$  » les lipides, glucides, protides pour la resynthèse de l'A.T.P. le composé directement utilisé pour la contraction muscu-

# PHYSIOLOGIE DE L'ENTRAÎNEMENT ET DE LA PERFORMANCE SPORTIVE

## Le classique de la physiologie du sport

Avec cette 6<sup>e</sup> édition, nous fêtons les **25 ans** de ce livre de référence en physiologie du sport. Dans cette édition, l'auteure a intégré les toutes nouvelles découvertes en matière d'entraînement physiologique pour tendre vers une approche physiologique individuelle et pratique du sportif. Pour cela, chaque chapitre aborde la théorie et les applications pratiques pour l'entraînement.

## Pour maîtriser les notions indispensables

Ce livre est écrit tout spécialement pour celles et ceux qui souhaitent maîtriser les notions de physiologie indispensables. Tout pratiquant et professionnel exigeant et curieux de progresser dans la connaissance trouvera dans ce livre une étude approfondie des transformations

énergétiques opérées par toute activité physique en fonction de son intensité, de sa durée, de sa forme et de son environnement.

## Les nouveautés de la 6<sup>e</sup> édition

Des chapitres ont été ajoutés pour prendre en compte les conditions thermiques et de pollution. L'auteure, Véronique Billat, relève le pari de rendre accessibles les dernières recherches en physiologie de l'exercice et de l'entraînement, aussi bien pour les sportifs que pour les étudiants de la licence au doctorat de STAPS. Par le biais de son approche pluridisciplinaire (médecine, mathématiques, automatisation et informatique), elle offre aux praticiens des méthodes d'entraînement pour une individualisation de l'optimisation énergétique permettant le progrès de chaque personne et le développement de sa performance.

## PUBLIC

Les professeurs et les étudiants en sciences et techniques des activités physiques et sportives (STAPS)  
Les médecins du sport  
Les entraîneurs  
Les préparateurs physiques

## L'AUTEURE

Véronique Billat, spécialiste reconnue en physiologie du sport, est l'auteure de nombreux ouvrages et articles dans des revues scientifiques internationales et elle assure un suivi de l'entraînement de sujets de tout niveau et de tout âge.

## CHEZ LE MÊME ÉDITEUR



39,90€  
ISBN : 978-28073-6582-7



9 782807 365827

deboeck  
SUPÉRIEUR **B**

[www.deboecksuperieur.com](http://www.deboecksuperieur.com)