

Véronique Billat

# Physiologie & méthodologie de l'entraînement

De la théorie à la pratique



SCIENCES

MD1304

Véronique **Billat**

Avant-propos

# Physiologie et méthodologie de l'entraînement

DE LA THÉORIE À PRATIQUE

3<sup>e</sup> édition

059970

8



# Table des matières

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

## CHAPITRE 1

### LA PERFORMANCE SPORTIVE .....

1. Théorie bioénergétique de la performance sportive .....	9
1.1 Historique .....	9
1.1.1 Définition de la performance sportive .....	9
1.1.2 Analyse bioénergétique des performances en course et natation .....	9
1.1.3 Les modèles de la performance sportive .....	11
1.1.4 Modèles mathématiques de la performance sportive fondés sur la seconde loi du mouvement de Newton .....	14
1.2 Énergie et puissance .....	17
1.2.1 L'énergie .....	17
1.2.2 La puissance .....	18
1.3 Du coût au rendement énergétique des locomotions sportives .....	18
1.3.1 Coût énergétique .....	18
1.3.2 Rendement énergétique .....	18
1.3.3 Rendement brut ( $\eta_b$ ) et rendement net ( $\eta_{net}$ ) .....	19
1.3.4 Coût et rendement énergétiques en course à pied .....	20
1.3.5 Comparaison du coût énergétique de la course sur tapis roulant et sur piste .....	21
1.3.6 Coût et rendement énergétiques en natation : l'influence de la technique sportive .....	22
1.4 Transferts d'énergie .....	22
1.4.1 Métabolisme : définition .....	22
1.4.2 Les transferts d'énergie par l'Adénosine Triphosphate (ATP) .....	23
1.4.3 Lois des transferts d'énergie dans l'organisme .....	23
1.4.4 Réactions chimiques endergoniques et exergoniques (stockant ou libérant de l'énergie) .....	24
1.4.5 Métabolismes et reconstitution de l'ATP à l'exercice .....	26
1.5 Métabolismes et exercice .....	29
1.5.1 Métabolismes et intensité de l'exercice .....	29
1.5.2 Capacité des trois métabolismes énergétiques .....	29
1.5.3 Intervention couplée des métabolismes et intensité de l'exercice .....	30
1.5.4 Contrôle métabolique et intensité de l'exercice : du sprint au marathon .....	32
1.6 Entraînement et effets sur les métabolismes .....	40
1.6.1 Effets de l'entraînement en endurance .....	40
1.6.2 Effets de l'entraînement de sprint .....	41
1.7 Modèles théoriques de la relation puissance temps basés sur les caractéristiques bioénergétiques humaines .....	42
1.8 Modèle bioénergétique de l'optimisation de la variation de la vitesse de course en compétition .....	45
2. Applications : Spécificités bioénergétiques des disciplines sportives .....	47
2.1 Sports continus et cycliques sur courtes et moyennes distances .....	47
2.1.1 Distance de compétition et métabolismes .....	47
2.1.2 La course de sprint prolongé (400 m en course à pied) et de demi-fond .....	47
2.1.3 Le triathlon .....	48
2.1.4 L'aviron .....	49
2.2 Sports à caractère intermittent .....	49
2.2.1 Délais de restauration des substrats énergétiques : du 40 m au 100 m course .....	49
2.2.2 Le tennis .....	50
2.2.3 Le karaté .....	51
2.2.4 Le football et le rugby .....	51
2.2.5 L'escalade .....	52
2.2.6 Le ski alpin .....	53



## CHAPITRE 2 LE MUSCLE : TRANSFORMATEUR D'ÉNERGIE ..... 55

1. Théorie de la contraction musculaire ..... 55	1.3.3 Typologie des fibres musculaires et performance sportive ..... 64
1.1 Le muscle ..... 55	1.3.4 Effets de l'entraînement sur la typologie musculaire ..... 65
1.1.1 Structure macroscopique du muscle ..... 55	1.4 Les limites musculo-tendineuses du record de vitesse ..... 66
1.1.2 Structure microscopique du muscle ..... 56	1.5 La resynthèse de la phosphocréatine à l'effort ..... 67
1.2 La contraction musculaire ..... 57	1.6 Le contrôle énergétique par le glycogène ..... 68
1.2.1 Types de contraction musculaire ..... 57	2. Applications : fatigue musculaire et adaptations à l'exercice ..... 69
1.2.2 Déroulement de la contraction musculaire ..... 59	2.1 La plasticité musculaire ..... 69
1.2.3 Énergie et contraction musculaire ..... 59	2.1.1 Hypertrophie ou hyperplasie ..... 69
1.2.4 ATP et contraction musculaire ..... 60	2.1.2 Adaptations histochimiques et biochimiques du muscle à l'exercice, à court et à long terme ..... 72
1.3 Typologie musculaire ..... 61	2.1.3 Effets de la croissance et du vieillissement sur la force musculaire ..... 74
1.3.1 Classification des fibres musculaires (méthodes et caractérisation) ..... 61	
1.3.2 Recrutement des fibres et intensité de l'exercice (tableau 9) ..... 63	

## CHAPITRE 3 LE SYSTÈME CARDIOVASCULAIRE : ÉLÉMENT CLEF DE LA PERFORMANCE SPORTIVE ..... 75

1. Théorie du système cardiovasculaire et entraînement sportif ..... 75	1.6.5 Relation entre pression, résistances et débit sanguin ..... 92
1.1 Système cardiovasculaire ..... 76	1.6.6 Régulation des ajustements cardiovasculaires à l'exercice ..... 94
1.2 Du débit cardiaque ( $\dot{V}O_2$ ) à la consommation d'oxygène ( $\dot{Q}$ ) ..... 76	1.7 Exercice et réponses circulatoires ..... 95
1.2.1 Débit cardiaque ..... 76	1.7.1 Réponses circulatoires à l'exercice ..... 95
1.2.2 Débit cardiaque et exercice ..... 78	1.7.2 Émotions et fréquence cardiaque ..... 95
1.2.3 Fréquence cardiaque maximale ..... 78	1.7.3 Fréquence cardiaque et transition du repos à l'exercice ..... 95
1.2.4 Réserve cardiaque ..... 78	1.7.4 Fréquence cardiaque postexercice ..... 95
1.2.5 Entraînement et débit cardiaque ..... 79	1.7.5 Fréquence cardiaque et exercice d'intensité croissante ..... 96
1.2.6 Équation de Fick (du nom du physiologiste allemand, 1870) ..... 79	1.7.6 Fréquence cardiaque et exercices intermittents ..... 97
1.2.7 Utilisation de l'équation de Fick pour l'évaluation du volume d'éjection systolique du sportif ..... 79	1.7.7 Fréquence cardiaque et exercice prolongé ..... 97
1.2.8 Redistribution du flux sanguin à l'exercice ..... 82	1.7.8 Le volume d'éjection systolique plafonne-t-il avant d'atteindre la fréquence cardiaque maximale ? ..... 98
1.2.9 Régulation des débits sanguins locaux ..... 83	1.7.9 Le volume d'éjection systolique et le débit cardiaque ont-ils des facteurs limitants sur le marathon ? ..... 99
1.3 Cycle cardiaque et exercice ..... 84	1.7.10 Concept de la vitesse de plafonnement du volume d'éjection systolique ..... 100
1.3.1 Le cycle cardiaque ..... 84	2. Applications : sollicitation cardiaque à l'entraînement ..... 100
1.3.2 Les variations de pression sanguine pendant le cycle cardiaque ..... 84	2.1 Fréquence cardiaque et intensité d'exercice ..... 100
1.4 Pression sanguine artérielle ..... 84	2.2 Adaptations du cœur à l'exercice ..... 101
1.5 Myocarde et activité électrique cardiaque ..... 87	2.3 Cœur et performance ..... 102
1.5.1 Le myocarde ..... 87	
1.5.2 L'activité électrique cardiaque ..... 88	
1.6 Régulation de l'activité cardiaque ..... 89	
1.6.1 Régulation de la fréquence cardiaque ..... 89	
1.6.2 Régulation du volume d'éjection systolique ..... 90	
1.6.3 Régulation du retour veineux pendant l'exercice ..... 91	
1.6.4 Régulation de la pression sanguine ..... 92	



## CHAPITRE 4 LA VENTILATION PENDANT L'EXERCICE ..... 105

1. Théorie de la ventilation ..... 105	1.10 Transport du CO <sub>2</sub> dans le sang et équilibre acido-basique ..... 117
1.1 La fonction pulmonaire ..... 105	1.10.1 Rôle du bicarbonate ..... 117
1.2 Structure du système respiratoire ..... 106	1.10.2 Rôle de la ventilation dans la balance acido-basique ..... 117
1.2.1 Zone conductive ..... 106	1.11 Ventilation à l'exercice ..... 118
1.2.2 Zone respiratoire ..... 108	1.11.1 Transition du repos à l'exercice ..... 118
1.3 Mécanique respiratoire ..... 108	1.11.2 Exercice en conditions chaudes et humides ..... 118
1.3.1 L'inspiration ..... 108	1.11.3 Exercice progressivement accéléré ..... 118
1.3.2 L'expiration ..... 108	1.12 Régulation de la ventilation ..... 119
1.3.3 Résistance des voies respiratoires ..... 108	1.12.1 Contrôle de la ventilation au repos : les facteurs de régulation du débit ventilatoire ..... 119
1.4 Ventilation pulmonaire ..... 109	1.12.2 Régulation de la ventilation pendant un exercice sous-maximal ..... 121
1.5 Volumes et capacités pulmonaires ..... 110	1.12.3 Contrôle de la ventilation pendant un exercice intense (> 80 % de la vitesse associée à $\dot{V}O_2\text{max}$ ) ..... 122
1.6 Diffusion des gaz ..... 111	2. Applications : ventilation et performance ..... 123
1.7 Débit sanguin pulmonaire ..... 112	2.1 Fonction ventilatoire et consommation maximale d'oxygène ..... 123
1.8 Relation « ventilation-perfusion » ..... 113	2.2 Hypoxémie induite par l'exercice et performance ..... 123
1.9 Transport d'O <sub>2</sub> et de CO <sub>2</sub> dans le sang ..... 113	2.3 Seuils ventilatoire et lactique ..... 124
1.9.1 L'hémoglobine ..... 113	2.4 Seuils lactique, ventilatoire et endurance ..... 125
1.9.2 La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (HbO <sub>2</sub> ) ..... 114	2.4.1 Seuil de puissance et réponses physiologiques ..... 125
1.9.3 Effer du pH sanguin ..... 115	2.4.2 Approches méthodologiques des seuils ..... 128
1.9.4 Effer de la température ..... 115	
1.9.5 Effer du 2-3 DPG (2-3 diphosphoglycérate) ..... 116	
1.9.6 Transport de l'oxygène dans le muscle ..... 116	

## CHAPITRE 5 ENVIRONNEMENT PHYSIQUE ET PERFORMANCE SPORTIVE : TEMPÉRATURE ET ALTITUDE ..... 129

1. Théorie des effets de la température et de l'altitude ..... 129	1.7 Adaptation aiguë (acclimatation) et à long terme (acclimatement) à l'altitude ..... 136
1.1 Thermorégulation et balance énergétique ..... 129	1.7.1 L'hypoxie : définition ..... 136
1.2 Échanges de chaleur entre le corps et l'environnement externe ..... 130	1.7.2 L'entraînement en altitude vraie ou simulée : des effets contradictoires et très individualisés ..... 137
1.3 Réactions aiguës (immédiates) à la chaleur ..... 132	1.7.3 Une réponse individuelle à l'hypoxie ..... 139
1.4 Régulation de la température ..... 132	2. Application : altitude et performances sportives ..... 140
1.5 Acclimatation à la chaleur ..... 134	2.1 L'entraînement en altitude ..... 144
1.6 Adaptation au froid ..... 136	2.2 Les effets de l'expérience de la montagne sur les réponses physiologiques lors de l'ascension du Mont-Blanc ..... 148

## CHAPITRE 6 L'ENTRAÎNEMENT SPORTIF ..... 149

1. Théorie de l'entraînement ..... 149	1.3.3 Évaluation de la puissance maximale anaérobie lactique sur le terrain ..... 157
1.1 Apport de la physiologie à l'entraînement sportif ..... 150	1.3.4 Évaluation du métabolisme anaérobie lactique ..... 158
1.2 Méthodologie de l'entraînement ..... 152	1.3.5 Le Déficit Maximal d'Oxygène Accumulé (DMOA) ..... 159
1.3 Rapport entre performance et aptitude physique ..... 153	1.3.6 Évaluation du métabolisme aérobie ..... 162
1.3.1 Évaluation de la courbe de performance (relation vitesse-temps) ..... 153	1.3.7 Détermination de la consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_2\text{max}$ ) ..... 163
1.3.2 Évaluation du métabolisme anaérobie lactique ..... 156	1.3.8 Épreuves d'évaluation directe de $\dot{V}O_2\text{max}$ ..... 166
	1.3.9 Épreuves de performance sur le terrain ..... 167



1.3.10 Temps limite à la puissance ou vitesse associée à (ou vitesse maximale aérobie : VMA) .....	171	croissante » pour rester ses progrès en marchant ou en courant à plat .....	203
1.4 Index d'endurance et seuil lactique .....	174	1.6.7 Correspondance entre la puissance (en watts) atteinte à (souvent appelée la « puissance maximale aérobie » ou PMA) obtenue lors de tests sur bicyclette ergométrique et la vitesse maximale aérobie ascensionnelle (VMAa) .....	205
1.4.1 Fraction d'utilisation de la consommation maximale d'oxygène .....	174	1.7 Les perspectives d'amélioration de la prédiction de l'endurance .....	207
1.4.2 Prédiction de l'endurance .....	174	1.8 Règles de base de l'entraînement sportif .....	210
1.4.3 Index d'endurance .....	174	1.8.1 Principe de surcharge en fonction des objectifs du sujet .....	210
1.4.4 Méthodes d'évaluation du seuil lactique .....	176	1.8.2 Principe de spécificité .....	210
1.4.5 Concept d'état stable maximal de la lactatémie .....	178	1.8.3 Principe d'individualisation .....	211
1.4.6 Évaluation de la puissance maximale d'état stable de la lactatémie .....	179	1.8.4 Principe de réversibilité .....	211
1.4.7 Concept de vitesse critique .....	181	1.9 Charge d'entraînement .....	211
1.4.8 Concept de vitesse de déflexion de la fréquence cardiaque à l'exercice .....	183	1.9.1 Calibration de la charge d'un entraînement .....	211
1.4.9 Le CAT test de Chanon .....	184	1.9.2 L'interval-training .....	211
1.4.10 L'approche subjective de la difficulté de l'exercice (« Rating of Perceived Exertion », Borg, 1970) .....	185	1.9.3 Les réponses physiologiques pendant une séance d'intervaltraining à réalisée jusqu'à épuisement. ....	215
1.4.11 Tests de laboratoire et spécialités sportives .....	187	1.9.4 La récupération de l'énergie anaérobie lors d'un effort intermittent de type interval training : le modèle de puissance critique intermittente .....	219
1.5 Évaluation des sédentaires et des peu actifs .....	187	1.10 Le surentraînement .....	219
1.6 Les tests d'évaluation de la condition physique pour les sports outdoor .....	190	2. Application à la pratique de l'entraînement .....	221
1.6.1 Tests pour les sportifs débutants ou comment se rester sans effort (conseillés aux personnes en phase de reprise après plus de 2 ans d'arrêt). ....	190	3. Analyse d'un record du monde dans une perspective d'entraînement .....	222
1.6.2 Le Test au repos avec les cardiofréquencemètres Polar RS800 .....	191	4. L'apport de la science dans l'entraînement sportif : histoire et perspectives .....	226
1.6.3 Tests sous maximaux de marche à réaliser sur le terrain (conseillé pour les sportifs en phase de reprise après moins de 2 ans d'arrêt) .....	192	4.1 Les années « art nouveau » (1900) .....	227
1.6.4 Tests sur le terrain : le test de marche ou course en montée (« Le test Mont Blanc ») ou dans les escaliers (« Le test Tour Eiffel ») (conseillé pour les sportifs en activité). ....	193	4.2 Les années « Art Déco » (1920-1930) .....	227
1.6.5 Détermination de la vitesse maximale aérobie ascensionnelle sur 5 minutes .....	196	4.3 Les années « Formica » (années 50) .....	228
1.6.6 Test de vérification des progrès réalisés par l'entraînement après 4 semaines de pratique régulière d'au moins deux fois par semaine : le « test à vitesse		4.4 Les années « hippies » (année 60-70) .....	228
		4.5 Les années « Pop » et « Disco » .....	229
		4.6 Les années 2010 ou les années « socio » .....	231
		Unités de mesures, symboles et conversions .....	233
		Glossaire .....	237
		Bibliographie .....	241
		Index .....	255
		Table des matières .....	259

Cet ouvrage établit un lien constant entre les bases physiologiques et leurs applications pratiques à la performance sportive.

Chacun des six chapitres (la performance et ses aspects bioénergétique, musculaire, cardiovasculaire, ventilatoire, environnemental, l'entraînement) est composé de deux parties, l'une théorique physiologique, l'autre pratique.

L'objectif final est de permettre au lecteur d'élaborer les charges d'entraînement (intensité, durée, forme) en connaissant les réponses physiologiques qu'elles occasionnent sur le plan métabolique, cardiorespiratoire et musculaire.

Cette 3<sup>e</sup> édition propose les toutes dernières découvertes notamment dans le domaine de la connaissance scientifique des limites de la consommation maximale d'oxygène. En outre, les progrès en matière de nouvelles technologies ont permis d'acquérir des données physiologiques des besoins énergétiques des sports sur le terrain. Ceci permet d'envisager des nouvelles perspectives en matière d'entraînement sportif.

Le contenu scientifique de l'ouvrage s'appuie sur les données expérimentales les plus actuelles ainsi que sur les articles fondateurs de la physiologie de l'exercice, donnant ainsi au lecteur les clefs de la démarche scientifique.

*Sur la photo ci-contre l'auteur est aux côtés de Robert Marchand après un test réalisé dans l'unité INSERM 902 à l'université d'Évry Val d'Essonne. En effet, Robert Marchand est détenteur du premier record cycliste de l'heure homologué sur piste dans la catégorie des plus de 100 ans depuis 2012. Il possède un VO<sub>2</sub>max extraordinaire pour son âge. Son exemple interpelle donc la santé publique dans une optique très novatrice.*

#### Public :

Ce livre a été écrit à l'attention :

- ▶ des professeurs et des étudiants des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> cycles en sciences et techniques des activités physiques et sportives (STAPS) ;
- ▶ des médecins du sport ;
- ▶ des entraîneurs ;
- ▶ des préparateurs physiques.

#### Présentation de l'auteur :

##### **Véronique Billat**

professeure à l'Université d'Évry (Val d'Essonne), elle est l'auteur de nombreux articles dans les revues scientifiques internationales et assure le suivi de l'entraînement d'athlètes de haut niveau français et kenyans. Par ailleurs, elle défend l'idée que la formation scientifique doit s'adresser à tout sportif ainsi qu'aux intervenants de son environnement.



ISBN : 978-2-8041-7149-0



9 782804 171490

PHYMET

