

SCIENCES
ET PRATIQUES DU SPORT

CYCLISME

ET OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE

4^e
ÉDITION

FRED GRAPPE



deboeck **B**
SUPÉRIEUR

CYCLISME ET OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE

SCIENCES ET PRATIQUES DU SPORT

Collection dirigée par le Pr Véronique Billat (Université Paris-Saclay)
et le Dr Jean-Pierre Koralsztejn (Centre de médecine du sport CCAS, Paris)

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

La collection a pour objectifs de :

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

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

- une série 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 et méthodologie de l'entraînement. De la pratique à la théorie (4^e édition)</i>
N. BOISSEAU <i>et al.</i>	<i>La Femme sportive. Spécificités physiologiques et physiopathologiques</i>
D.L. COSTILL, J.H. WILMORE, W.L. KENNEY	<i>Physiologie du sport et de l'exercice (6^e édition)</i>
R.H. COX	<i>Physiologie du sport (3^e édition)</i>
A. DELLAL	<i>De l'entraînement à la performance en football</i>
A. DELLAL	<i>Une saison de préparation physique de football (2^e édition)</i>
F. DURAND	<i>Physiologie des sports d'endurance en montagne</i>
F. GRAPPE	<i>Cyclisme et optimisation de la performance. Science et méthodologie de l'entraînement (4^e 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>
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^e 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>VO_{2max} à l'épreuve du temps</i>
V. BILLAT	<i>Révolution marathon</i>
V. BILLAT, C. COLLIOT	<i>Régat et performance pour tous</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>
M. RYAN	<i>Nourrir l'endurance</i>

Frédéric Grappe

Cyclisme et optimisation de la performance

4^e édition

Pour toute information sur notre fonds et nos nouveautés,
consultez notre site web :

www.deboecksuperieur.com

© De Boeck Supérieur s.a., 2022
Rue du Bosquet, 7 – 1348 Louvain-la-Neuve

4^e édition

Tous droits réservés pour tous pays.

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

Dépôt légal :
Bibliothèque nationale, Paris : mai 2022
Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2022/13647/069

ISSN 1373-0193
ISBN 9782807336483

Avant-propos

L'objectif principal de cet ouvrage est d'analyser les différentes variables qui sous-tendent la performance en cyclisme à partir des connaissances théoriques proposées par les scientifiques et des connaissances pratiques transmises par les entraîneurs. Il confronte les différentes connaissances, essaie d'établir des relations entre elles et finalement, propose des méthodes d'entraînement éprouvées susceptibles d'améliorer la capacité de performance du coureur. Les aspects scientifiques sont traités avec le plus grand soin dans les différents champs d'étude intervenant dans la performance afin de donner toute leur pertinence aux connaissances scientifiques et pour autoriser le lecteur à une compréhension totale des phénomènes observés. Les aspects pratiques sont traités à partir d'informations recueillies chez des chercheurs reconnus et par l'auteur même de l'ouvrage qui est également entraîneur. Dès que cela devient possible, la relation entre certains fondements théoriques et des méthodes pratiques est effectuée. Cet ouvrage souhaite montrer que le cycliste qui désire accroître sa capacité de performance a devant lui un large éventail de méthodes d'entraînement et d'informations théoriques destinées à améliorer le niveau d'aptitude physique ainsi que le niveau d'analyse et de compréhension de l'activité « cyclisme ».

Frédéric GRAPPE



L'auteur à ses débuts... à 2 ans...

Direction de l'ouvrage

Frédéric GRAPPE : Directeur de la Performance de l'équipe cycliste Groupama-FDJ (Maître de Conférences Universitaire, HDR, UPFR-Sports de Besançon).

Ont collaboré à cet ouvrage les auteurs suivants

William BERTUCCI : Professeur des Universités (UFR-STAPS de Reims)

Bernard BOURREAU : Entraîneur National à la Fédération Française de Cyclisme

Sébastien DUC : Maîtres de Conférence Universitaires (UFR-STAPS de Reims)

Alain GROSLAMBERT : Professeur des Universités (UPFR-Sports de Besançon)

Jean-Philippe HEUZE : Maître de Conférences Universitaire (UFR-STAPS de Reims)

Frédérique HINTZY-CLOUTIER : Maître de Conférences Universitaire, HDR (UFR-STAPS de Chambéry)

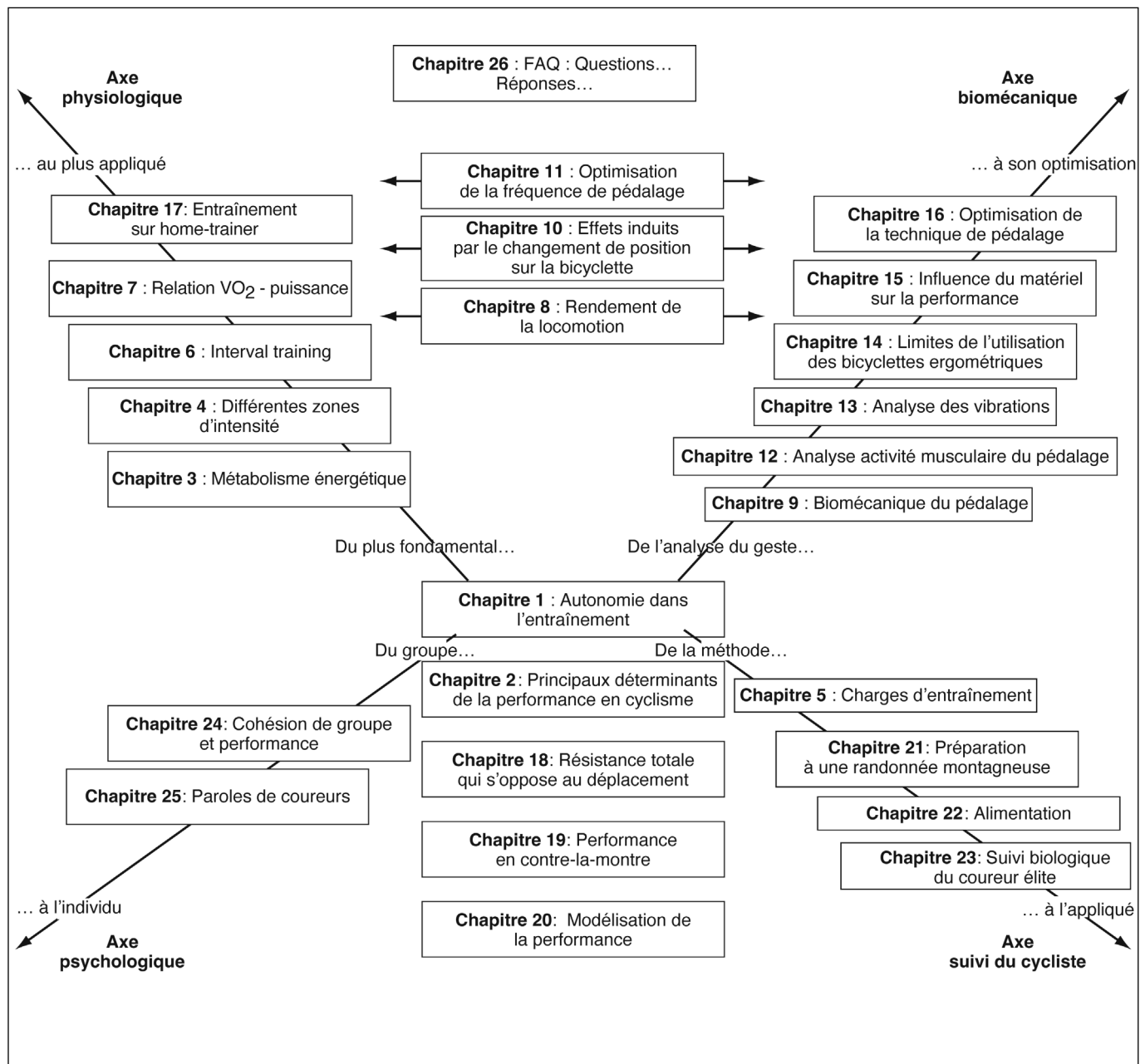
Jacky MAILLOT : Directeur Médical équipe cycliste Groupama-FDJ et des équipes de France de cyclisme

Stéphane PERREY : Professeur des Universités (UFR-STAPS de Montpellier)

Frédéric PUEL : Maître de Conférences Universitaire (UFR-STAPS de Reims)

Denis RICHE : Physiologiste – micronutritionniste, responsable du DU « NMES » de Poitiers

Plan du livre



Modèle d'autonomie dans l'entraînement et performance

Frédéric GRAPPE

1

Sommaire

1. L'écologie sportive
2. L'athlète, une boîte noire
3. Différents modèles de fonctionnement
4. Différents modèles d'autonomie

La performance sportive s'exprime à partir de la capacité de performance maximale que l'athlète est en mesure de produire en fonction d'éléments extérieurs et des impondérables. La capacité de performance maximale représente l'association du potentiel physique maximal et de la force mentale maximale de l'athlète. Ainsi, le champion est rare parce qu'il possède un potentiel physique important capable d'être activé à partir d'une force mentale supérieure. C'est ce qui explique sa rareté dans chaque sport.

La performance sportive peut s'exprimer sous la forme d'un classement, d'une distance, d'un temps ou d'un résultat, le plus souvent lors d'une compétition. Mais elle peut également s'exprimer lors d'épreuves de masse (ou de loisir) qui sont de plus en plus populaires et au cours desquelles les individus se battent essentiellement contre eux-mêmes pour aller chercher le maximum de leur capacité.

La performance sportive résulte du résultat d'un processus assez complexe qui met en œuvre différentes étapes du système d'entraînement. Tous les facteurs déterminants doivent être connus et intégrés dans ce processus pour que la performance établie soit la plus proche possible du maximum espéré, le tout en complète interaction avec milieu. Comme l'explique Edgar Morin (Morin, 1999, p. 2), « *L'être humain est à la fois physique, biologique, psychique, culturel, social historique* ». Ce qui explique toute la complexité de l'athlète qui doit s'intégrer, de façon rationnelle, dans un processus de programmation d'entraînement ayant comme objectif principal l'accession à la meilleure performance possible en compétition.

1. L'écologie sportive

L'établissement d'une performance n'est possible qu'à partir d'une régulation optimale des différents systèmes fonctionnels qui interagissent avec la meilleure synergie possible pour produire de l'énergie mécanique, le tout avec la mise en place d'une stratégie de gestion de l'effort contrôlée par le système nerveux central selon un processus de téléanticipation (Ulmer, 1996 ; St Clair Gibson *et al.*, 1986).

Ce mode de fonctionnement peut faire référence à l'écologie sportive puisque l'athlète évolue constamment en interaction avec le milieu extérieur, les autres et en contrôle avec lui-même. « *L'écologie de l'action c'est en somme tenir compte de la complexité qu'elle suppose, c'est-à-dire aléa, hasard, initiative, décision, inattendu, imprévu, conscience des dérives et des transformations* » (Morin 1990 ; Morin, 1999, p. 47).

La performance s'établit généralement, quel que soit le sport pratiqué, à partir d'un certain nombre d'actions. La somme combinée des différentes actions conduit à un résultat plus ou moins attendu qui détermine un résultat global. Or, produire de l'action n'est pas anodin car l'individu se trouve constamment confronté aux réponses que lui renvoient le milieu extérieur et les autres. Il doit faire preuve d'adaptabilité. « *Dès qu'un individu entreprend une action, quelle qu'elle soit, celle-ci commence à échapper à ses intentions. Cette action entre dans un univers d'interactions et c'est finalement l'environnement qui s'en saisit dans un sens qui peut devenir contraire à l'intention initiale* » (Morin, 1999, p. 47).

2. L'athlète, une boîte noire

On peut assimiler l'athlète à une sorte de boîte noire qui renferme une multitude d'informations. Cette boîte noire demande à être ouverte, découverte, comprise et analysée par l'entraîneur afin d'appréhender la nature du fonctionnement intrinsèque du sportif. Pour améliorer son potentiel physique, ce dernier doit travailler à partir d'un programme d'entraînement adapté et rationnel visant à stimuler dans la plus parfaite symbiose les différents systèmes fonctionnels de l'organisme. Dans un premier temps, les différents stimuli d'entraînement vont avoir pour effet de les désadapter. Ensuite, après une période d'assimilation optimale, les systèmes vont être capables de fonctionner à un niveau supérieur. Ce processus de désadaptation-adaptation permet d'améliorer le potentiel physique pour établir une performance sportive. Toutefois, tout n'est pas si

simple. En effet, lorsque l'athlète travaille à partir de stimuli élevés, il se désadapte mais parallèlement il fatigue. Il n'existe pas d'adaptation sans fatigue. Cette dernière se manifeste de différentes façons : aux niveaux périphérique, central et général. Ainsi, avec la succession des charges d'entraînement, le potentiel physique s'accroît rapidement en début de cycle grâce à une grande plasticité de l'organisme qui est capable, de par sa fraîcheur, d'assimiler rapidement les premières charges de travail. Mais, en fin de cycle, avec des stimuli plus importants, l'organisme fatigue de plus en plus avant d'assimiler complètement ces charges. Durant cette période, le potentiel physique continue de s'accroître mais, avec en contre-partie, une élévation exponentielle du niveau de fatigue. À ce stade du processus d'entraînement, la capacité de performance est relativement faible car la fatigue est prégnante et empêche le potentiel physique de s'exprimer totalement. C'est seulement après la période d'affûtage, qui consiste à diminuer le volume de travail tout en maintenant l'intensité spécifique de compétition, que l'organisme parvient à assimiler quasiment complètement le taux de fatigue préalablement accumulé. À la fin de cette période, le potentiel physique est au plus haut niveau et la fatigue au plus bas. Avec une bonne fraîcheur mentale, le sportif possède une capacité de performance élevée qui l'autorise à établir une excellente performance sportive. L'ensemble de ce processus de gestion de la charge de travail en fonction de la fatigue a été très bien décrit antérieurement (Banister et Hamilton, 1985) et sera décrit plus précisément dans certains chapitres qui suivent.

En résumé, l'amélioration de la capacité de performance de l'athlète passe par l'optimisation du cycle « Stimulation-Performance » qui permet d'accroître les potentiels physique et psychologique à travers cinq étapes importantes du processus d'entraînement : 1) stimulation des qualités physiques, 2) déformation des systèmes fonctionnels à travers leur plasticité, 3) assimilation des charges de travail par une récupération optimale, 4) réadaptation des systèmes fonctionnels à des niveaux plus élevés et 5) période de réglage-régulation des différents potentiels améliorés (*tapering*).

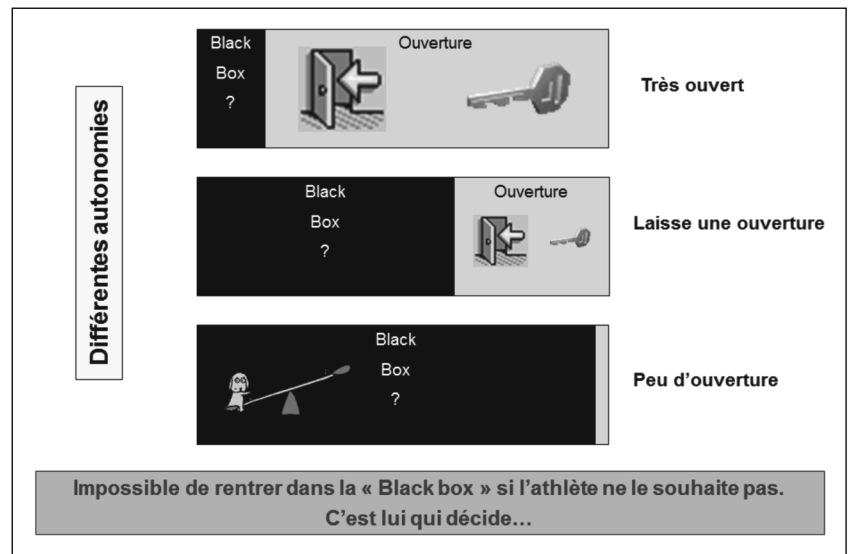
3. Différents modèles de fonctionnement

On vient de voir toute la complexité du système pour amener le sportif au maximum de sa capacité de performance. La gestion de ce processus dépend, en grande partie, du modèle de fonctionnement de l'athlète et de son autonomie de fonctionnement. La tâche première de l'entraîneur

est de comprendre le modèle de fonctionnement de l'athlète qu'il conseille pour mieux appréhender sa façon de s'organiser, d'agir, de répondre, de rebondir, d'analyser son activité. Ensuite, son rôle est de mettre en place le dispositif qui doit permettre la programmation du cycle stimulation-performance appliqué au sportif. L'entraîneur doit trouver les méthodes permettant de placer le sportif à l'intérieur d'un travail actif, stimulant, qui développe le potentiel physique et mental en évitant le travail trop passif qui a plutôt tendance à « endormir » l'organisme. Le cycle stimulation-performance comprend à la base des séances d'entraînement dynamiques qui permettent d'agir sur la plasticité de l'organisme en désadaptant certains systèmes fonctionnels. Ce cycle joue un rôle de déformation. Ensuite, l'organisme doit assimiler tout le travail pour être ensuite capable de se réadapter à un niveau supérieur. C'est seulement à partir de la réussite de ce cycle d'assimilation qu'un niveau de performance élevé peut être attendu. Bien évidemment, il existe de grosses différences entre les sportifs dans la gestion d'un tel cycle. Elles sont en partie dues à leurs capacités de réponses aux différents stimuli d'entraînement et à leur propre modèle et autonomie de fonctionnement.

Il existe, en effet, différents modèles de fonctionnement chez les athlètes qui conduisent tous à des systèmes d'autonomies différentes (fig. 1.1). Le premier modèle autorise une grande ouverture à l'entraîneur qui a la possibilité de pénétrer à l'intérieur du modèle du sportif afin de bien comprendre son fonctionnement interne. La relation entraîneur-entraîné est alors relativement complète car le sportif très ouvert autorise une relation de travail bilatérale. Avec le second modèle, l'athlète ne laisse qu'une petite ouverture à l'entraîneur. Il ne l'autorise à rentrer qu'en partie à l'intérieur de son système de fonctionnement en laissant une petite porte entrouverte. Une bonne partie de la boîte noire est interdite à l'entraîneur qui doit jouer de toute sa compétence et de sa finesse perceptive pour mieux découvrir l'athlète qu'il a en charge. Dans le dernier modèle, l'athlète est relativement fermé et n'entrouvre qu'un trou de souris à l'entraîneur. Ce dernier doit utiliser tous les stratagèmes qu'il possède pour tenter de saisir quelques éléments de fonctionnement du sportif. La relation entraîneur-entraîné se concentre ici sur un mode unilatéral.

Ces trois modèles conduisent à des modes d'autonomie de fonctionnement bien particuliers et spécifiques qui déterminent une loi selon laquelle il est impossible de rentrer dans la boîte noire de l'athlète si ce dernier ne le souhaite pas. Autant d'athlètes, autant de systèmes de fonctionnement et de modèles d'autonomie qui conduisent à des capacités de performance différentes. Au final, c'est toujours le sportif qui décide. À l'entraîneur de s'adapter et de trouver les clés qui le conduiront à guider le mieux possible l'athlète vers sa capacité



de performance maximale en fonction de son modèle de fonctionnement.

Alors, la question que l'on peut se poser est la suivante : quelle stratégie adopter pour gérer le modèle de fonctionnement d'un athlète ? On trouve plusieurs réponses : 1) le laisser gérer seul son modèle ; 2) l'obliger à faire des ajustements à l'intérieur de son modèle ; 3) l'obliger à casser son modèle ; 4) suggérer, proposer des pistes de travail pour qu'il s'améliore. Nous pensons que la dernière réponse semble la plus rationnelle. En effet, à partir du modèle de fonctionnement initial de l'athlète, il semble opportun et judicieux de continuer à travailler sur les bases de ce modèle en évitant de tout casser et surtout, de trouver les ajustements nécessaires qui permettront de faire évoluer le modèle vers plus de rationalité. La réussite sportive passera obligatoirement par la maîtrise totale du modèle de performance personnel à partir d'une certaine autonomie de fonctionnement propre au sportif.

4. Différents modèles d'autonomie

L'autonomie de fonctionnement peut se définir globalement à partir de différents critères. Elle représente la capacité à choisir de son propre chef sans se laisser dominer par certaines tendances naturelles ou collectives. Elle permet une certaine liberté intérieure. Elle autorise la capacité à se gouverner soi-même. Elle permet la faculté d'agir par soi-même en se donnant ses propres règles de conduite. Elle implique la non-domination de façon servile par une autorité extérieure.

Cette autonomie se construit sur plusieurs années à partir de l'expérience acquise et du rôle de l'entraî-

Figure 1.1

Illustration des différents modèles de fonctionnement des athlètes qui conduisent à des systèmes d'autonomies différentes.



Figure 1.2

Le modèle d'autonomie complète qui ne renvoie à aucune dépendance avec quiconque dans le fonctionnement quotidien.



Figure 1.3

Le modèle d'autonomie syncrétique induit une petite dépendance, le dernier qui parle ayant raison.

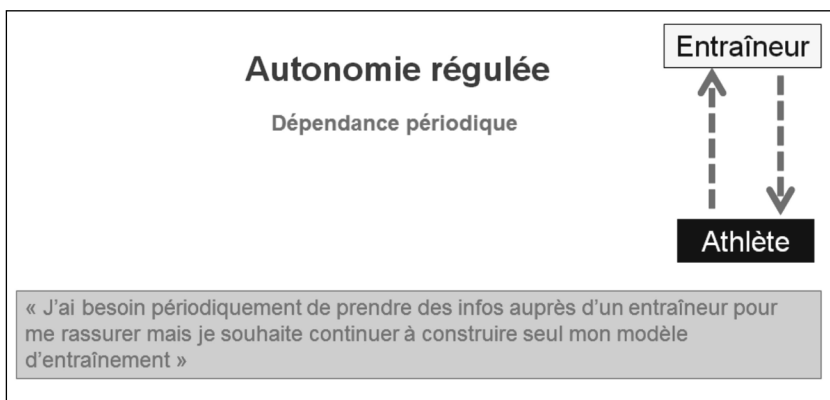


Figure 1.4

Le modèle d'autonomie régulée implique une dépendance périodique de l'athlète.

neur dans la relation entraîneur-entraîné. Il semble manifeste que l'on ne devient pas autonome naturellement. L'autonomie ne peut se construire que dans l'éducation sportive. Elle répond à l'adoption

d'une conduite tenant compte des règles fixées par le modèle sportif dans une perspective de durabilité et de soutenabilité des contraintes imposées par le milieu. Les différents modèles d'autonomie rencontrés chez les athlètes sont fonction de : 1) la perception et l'analyse de la discipline sportive, 2) des résultats sportifs, 3) de la personnalité de l'athlète, 4) de l'âge, 5) du niveau de pratique, 6) du cadre de vie privée, 7) du modèle de fonctionnement de l'équipe à laquelle il appartient, 8) de la discipline sportive.

Dans ce cadre, il est possible de distinguer plusieurs modèles d'autonomie de fonctionnement caractéristiques en fonction des observations de terrain. Leurs particularités renvoient à un certain type d'athlète.

Le modèle d'*autonomie complète* (fig. 1.2) ne renvoie à aucune dépendance avec quiconque dans le fonctionnement quotidien. Ici, l'athlète n'a besoin de personne pour construire son modèle d'entraînement. Il gère seul son processus d'entraînement à partir d'un modèle de fonctionnement qu'il contrôle personnellement. Il peut aller chercher du renfort mais en veillant bien à toujours contrôler le processus. Dans ce modèle, la relation entraîneur-entraîné n'existe pas. Il apparaît qu'à haut niveau de performance, les sportifs qui fonctionnent à partir de ce modèle sont relativement rares. Mais il en existe toutefois certains qui possèdent la capacité d'aller rechercher des éléments d'informations très ciblés leur permettant assez rapidement d'améliorer sensiblement leur capacité de performance. Ces athlètes d'exception possèdent un niveau d'intelligence pratique très élevé qui leur permet d'être à la fois discriminants et fins dans leurs choix.

Le modèle d'*autonomie syncrétique* (fig. 1.3) induit une petite dépendance, le dernier qui parle ayant raison. L'athlète a constamment besoin de prendre des informations en écoutant différentes personnes pour se faire sa propre opinion avant de construire son modèle d'entraînement et le faire évoluer au fil du temps. Il y a ici une forte sensibilité au mélange des influences avec le besoin d'aller chercher des sources d'informations partout autour de soi. On se trouve dans un modèle de fonctionnement très unilatéral où l'athlète se nourrit des informations des autres mais sans donner de retour à quiconque.

Le modèle d'*autonomie régulée* (fig. 1.4) implique une dépendance périodique. L'athlète a besoin de prendre des informations auprès d'un entraîneur pour se rassurer mais il souhaite, en contre-partie, continuer à construire seul son modèle d'entraînement. Il est à la recherche d'informations et de techniques permettant de réguler son processus d'entraînement. Son but est de maintenir une relative stabilité, conforme à ce qui est prévu au niveau du système d'entraînement.

Le modèle d'*autonomie contrôlée* (fig. 1.5) autorise une dépendance relativement ouverte. Ici, le sportif a régulièrement besoin d'un entraîneur pour le gui-

der dans son processus d'entraînement. Ce dernier doit lui offrir une écoute importante pour l'aider à construire ou renforcer son modèle d'entraînement. L'athlète gère son processus d'entraînement en relation étroite avec un entraîneur qui le guide à partir d'un modèle de fonctionnement contrôlé par ce dernier. L'entraîneur est considéré comme un guide qui contribue à apporter de l'aide pour faire en sorte d'améliorer sans cesse le processus. Il porte des vérifications, il surveille, il suggère, il ajuste. Le contrôle vise à réduire les incertitudes. On assiste ici à une relation bilatérale entre l'entraîneur et l'entraîné à partir d'un fort niveau de communication.

Le modèle d'*autonomie limitée* (fig. 1.6) détermine une sorte de dépendance voulue. L'athlète a besoin quotidiennement d'un entraîneur à qui il fait entièrement confiance pour qu'il construise son modèle d'entraînement. Il ne possède pas toujours la faculté d'agir par lui-même en se donnant ses propres règles de conduite. Il est en constante demande d'aide extérieure pour construire son projet, ce qui lui assure un confort de fonctionnement dans le temps. Dans un tel système, l'entraîneur peut avoir tendance à façonner l'athlète à son image, devenir un pygmalion. Il doit surtout veiller à ne pas dépasser certaines limites. La relation bilatérale entre l'entraîneur et l'entraîné se déplace souvent vers un déséquilibre en faveur du sportif qui possède un niveau d'exigence relativement élevé.

Le modèle d'*autonomie dirigée* (fig. 1.7) conduit à une dépendance totale. L'athlète s'en remet totalement à son entraîneur à qui il fait entièrement confiance pour construire son modèle d'entraînement. L'entraîneur dirige et contrôle la totalité du processus en laissant très peu de marge pour faire des propositions. L'autonomie de l'athlète est très limitée car l'entraîneur fonctionne selon un mode autoritaire qui détermine une forte tendance à la domination. Certains athlètes ont réussi à travers ce modèle à devenir de véritables champions. Mais le système possède toutefois ses limites qui sont d'user mentalement et physiquement plus ou moins rapidement le sportif et de voir celui-ci au bout d'un certain temps se détourner de ce modèle. Cela peut même conduire à l'arrêt brutal de la compétition par dégoût et non-plaisir.

Il semble que la résilience de l'athlète soit dépendante du modèle de fonctionnement (fig. 1.8). Par résilience on entend la capacité que possède le sportif à vivre, à réussir à se développer, à rebondir en dépit de l'adversité et des traumatismes extérieurs. La performance est étroitement liée au concept de résilience car le chemin qui y conduit est souvent sinueux et semé d'embûches. En réalité, le sportif espère toujours bénéficier des meilleures conditions possibles pour se préparer. Seulement, le processus d'entraînement est rarement linéaire et est généralement semé d'embûches. Les conditions



Figure 1.5

Le modèle d'autonomie contrôlée autorise une dépendance relativement ouverte de l'athlète.



Figure 1.6

Le modèle d'autonomie limitée détermine une sorte de dépendance voulue de l'athlète.

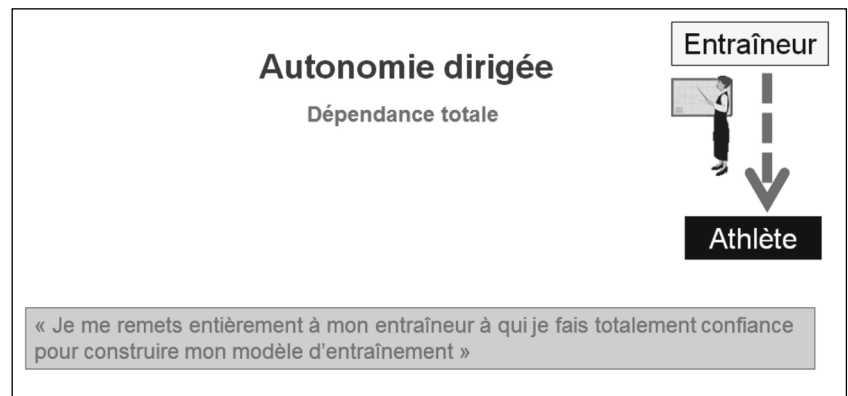


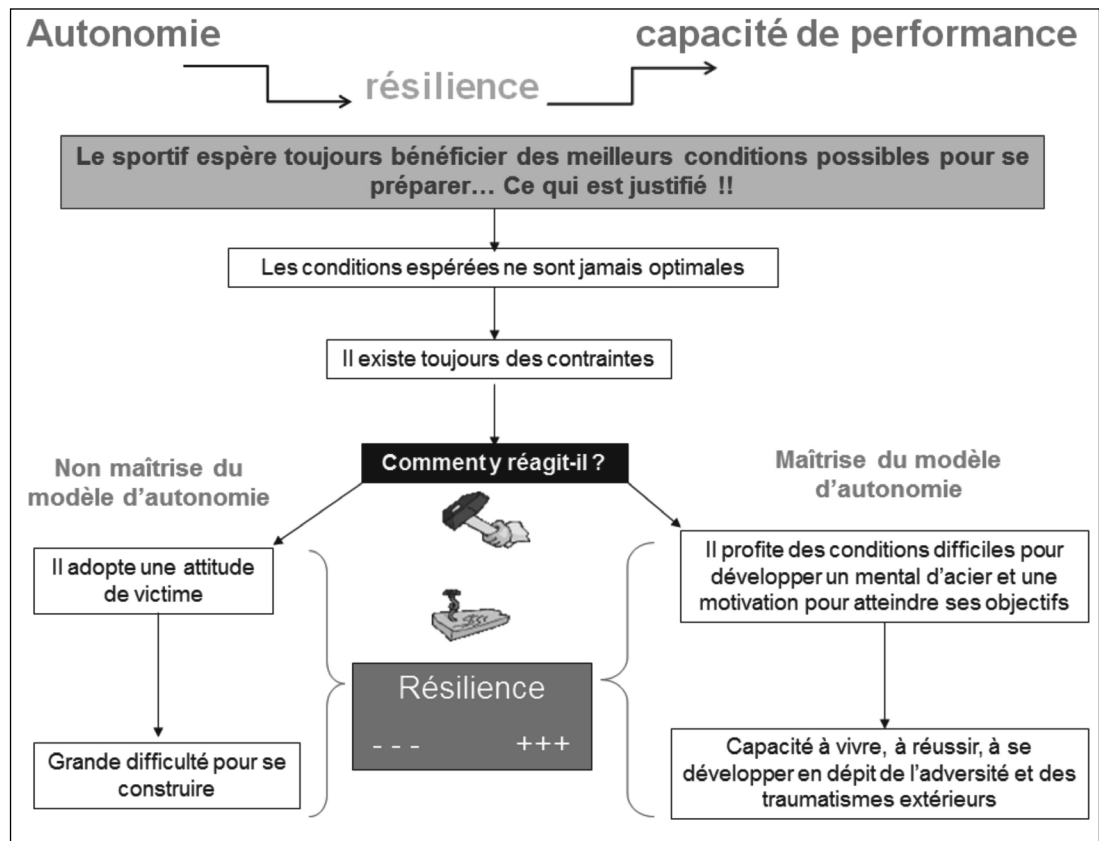
Figure 1.7

Le modèle d'autonomie dirigée conduit à une dépendance totale de l'athlète vis-à-vis de son entraîneur.

espérées ne sont jamais optimales car il existe toujours des contraintes. Or, comment réagit le sportif à l'intérieur d'un tel système ? S'il ne maîtrise pas son modèle d'autonomie, lors d'événements difficiles et déstabilisants, il peut adopter une attitude de victime qui induit souvent une grande difficulté pour se construire dans le temps. En revanche, s'il

Figure 1.8

Illustration de la relation qui existe entre l'autonomie de l'athlète et sa capacité à être performant à travers le concept de « résilience ».



maîtrise relativement bien son modèle, il va savoir profiter des conditions de vie difficiles rencontrées dans certaines périodes pour développer un mental d'acier et se donner une motivation supérieure pour atteindre les objectifs qu'il s'est préalablement fixé. Comme sa résilience est relativement élevée, cela lui permet de rebondir rapidement derrière un fort traumatisme.

Au final, quel serait le meilleur modèle d'autonomie chez un sportif ? Il ne semble pas y avoir un modèle idéal qui se dégage de par la complexité des situations et environnements différents qui existent. Nous suggérons que ce qui est important, ce n'est pas la nature même du modèle d'autonomie d'appartenance de l'athlète, mais davantage sa capacité à

maîtriser totalement le modèle d'autonomie intégré dans le système de fonctionnement dans lequel il se trouve. Nous pensons qu'il s'agit là de l'une des clés qui conduit à la capacité à réaliser une performance sportive maximale.

Terminons par ces quelques lignes d'Edgar Morin qui résument bien la grande complexité du système dans lequel évoluent conjointement et plus ou moins étroitement l'athlète et l'entraîneur : « *Il faudrait enseigner des principes de stratégie qui permettent d'affronter les aléas, l'inattendu et l'incertain et de modifier leur développement, en vertu des informations acquises en cours de route. Il faut apprendre à naviguer dans un océan d'incertitudes à travers des archipels de certitude* » (Morin, 1999, p. 3).

Bibliographie

1. Banister EW, Hamilton CL (1985). « Variations in iron status with fatigue modelled from training in female distance runners », *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, vol. 54, pp. 16-23.
2. Morin Edgar (1990), *Introduction à la pensée complexe*, Paris, ESF.
3. Morin Edgar (1999), *Les Sept Savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, Paris, UNESCO.
4. St Clair Gibson Alan et al, (2006), « The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort », *Sports Medicine*, vol. 36, n° 8, pp. 705-722.
5. Ulmer HV (1996), « Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback », *Experientia*, vol. 52, n° 5, pp. 416-420.

Analyse des principaux déterminants de la performance en cyclisme

Frédéric GRAPPE

2

Sommaire

1. Introduction
2. Analyse des différents axes de la performance
3. Équations de la performance en cyclisme
4. Profil synoptique de la performance du coureur
5. Capacité de performance maximale
6. Conclusion

1. Introduction

L'optimisation de la performance en cyclisme repose sur l'amélioration de nombreuses variables qu'il est important de bien identifier pour prétendre améliorer de manière significative les résultats de l'athlète. Ces différentes variables doivent être clairement définies en fonction du rôle qu'elles sont susceptibles de jouer lors de l'établissement de la performance. Ces principaux déterminants de la performance alimentent les différents compartiments qui composent la réussite sportive en cyclisme, à savoir, les compartiments biomécanique, physiologique, psychologique, technico-tactique et technologique. Les trois premiers compartiments renvoient directement à l'athlète, véritable machine humaine, sur laquelle il est possible d'agir directement à partir de méthodes et de moyens d'entraînement spécifiques. Le quatrième compartiment dépend également de l'athlète mais est profondément lié aux conditions environnementales et aux conditions de compétition. Le dernier compartiment se rapporte à toute la technologie qui est mise en place autour de l'athlète et qui donne lieu à la mise au point de l'ensemble du matériel nécessaire à l'optimisation de la performance.

Au total, ce que recherchent l'entraîneur, le médecin, le directeur sportif, le kinésithérapeute en cyclisme, c'est de maximiser, minimiser ou optimiser certaines variables fondamentales de la performance. Avec le poursuiveur par exemple, l'entraîneur recherche une optimisation de la position sur la bicyclette pour minimiser la traînée aérodynamique du coureur. Il met également tout en œuvre pour maximiser le transfert de force dans ses membres inférieurs afin d'augmenter sa vitesse de déplacement. Enfin, il faut réussir à minimiser au maximum la résistance de roulement due aux pneumatiques sur la piste pour essayer d'augmenter encore légèrement la vitesse de déplacement. C'est la prise en considération de l'ensemble des variables essentielles qui interviennent dans la performance du coureur qui contribue à tendre vers l'excellence.

2. Analyse des différents axes de la performance

2.1 Axe « biomécanique »

2.1.1 Définition

La biomécanique est une science qui étudie le mouvement humain. Elle étudie : 1) la structure et la fonction des systèmes biologiques au moyen des méthodes de la mécanique, et 2) les forces internes et externes qui agissent sur le corps humain ainsi que les effets produits par ces forces. Appliquée au cyclisme, elle étudie, entre autres, l'action des muscles sur le mouvement des différents segments du corps (mouvement de flexion et d'extension du membre inférieur lors du cycle de pédalage) ou encore l'influence de la traînée aérodynamique, de la résistance de roulement et du poids du corps sur la vitesse de déplacement.

Il est possible d'examiner le mouvement du corps humain en cyclisme de la même façon que la mécanique élémentaire examine le mouvement général de tous les corps, en faisant appel aux mêmes concepts, aux mêmes lois et en utilisant les mêmes méthodes. Même si on a l'impression que beaucoup de choses ont été dites, écrites ou découvertes dans le domaine de la biomécanique du cyclisme, il reste encore énormément d'explorations à faire dans les différents compartiments de la performance sachant qu'à haut niveau son amélioration passe obligatoirement par l'étude approfondie de ses principaux déterminants.

2.1.2 L'entraîneur biomécanicien

Les entraîneurs experts en cyclisme sont de véritables spécialistes de l'analyse du mouvement du cycliste. Leur spécialité se situe au niveau de l'apprentissage et du perfectionnement de la technique. Cet apprentissage ou ce perfectionnement du mouvement nécessite l'interaction de plusieurs domaines complémentaires et la maîtrise des éléments fondamentaux qui en font partie. Puisque le corps humain évolue dans un monde physique soumis à un certain nombre de lois, les entraîneurs experts doivent s'attacher à comprendre les lois essentielles qui agissent sur le corps humain et son environnement. Ces spécialistes doivent être capables d'analyser si les gestes réalisés par l'athlète optimisent la performance, si la bicyclette est en parfaite harmonie avec les dimensions corporelles de l'athlète afin que toutes les chances d'atteindre la performance maximale soient réunies.

2.1.3 Objectif biomécanique du cyclisme

En cyclisme, l'objectif biomécanique principal est d'être capable de pédaler avec la meilleure

efficacité possible sachant que l'athlète est en interface avec la bicyclette sur laquelle il repose. Parmi les objectifs biomécaniques secondaires, on peut considérer la position adoptée par l'athlète sur la bicyclette et le type de matériel utilisé (cadre, longueur des manivelles, type de guidon, etc.). Par conséquent, il est important d'établir un ordre de priorité ou d'importance. La position sur la bicyclette est-elle plus importante que le type de bicyclette ? Le type de bicyclette est-il plus important que la longueur des manivelles ? Si la réponse à certaines questions est non, on doit alors effectuer un compromis entre les objectifs biomécaniques étudiés. Cette situation peut se présenter lorsque plusieurs objectifs biomécaniques sont présents lors de la résolution d'un problème.

2.2 Axe « physiologique »

La physiologie de l'exercice est également une science du mouvement puisqu'elle examine les effets de l'activité physique sur les systèmes organiques (systèmes cardio-respiratoire, cardio-vasculaire, nerveux, etc.). Le cyclisme étant composé de plusieurs disciplines qui sont toutes exigeantes au niveau énergétique, la physiologie de l'exercice musculaire trouve ici toute son importance pour aider à la meilleure compréhension des phénomènes bioénergétiques et à l'amélioration des méthodes d'entraînement. Il s'agit pour l'entraîneur expert d'être en mesure de maîtriser parfaitement certaines connaissances de la physiologie élémentaire pour être capable d'effectuer une adéquation entre son savoir théorique au niveau physiologique et son savoir-faire pratique d'homme de terrain. La rationalité et la justesse des méthodes d'entraînement proposées aux athlètes dépendent étroitement de la capacité de l'entraîneur à pouvoir effectuer la meilleure adéquation possible. Toutefois, d'excellentes connaissances en physiologie de l'exercice ne suffisent pas à améliorer l'organisation du processus d'entraînement de l'athlète si, en contrepartie, elles ne sont pas associées à d'importantes connaissances pratiques de terrain. La physiologie de l'exercice constitue donc un outil de travail indispensable qui permet à l'entraîneur de construire des séances d'entraînement rationnelles en vue des objectifs précis.

2.3 Axe « suivi du cycliste »

Pour amener le cycliste à son plus haut niveau de performance sportive, il faut une gestion rationnelle du processus d'entraînement. Cela consiste à organiser, contrôler, quantifier, suivre, corriger, etc., certains paramètres déterminants pour l'établissement de performances de haut niveau. Rien ne doit être laissé au hasard. L'entraîneur, le médecin, le directeur sportif, le kinésithérapeute, le mécanicien doivent tous apporter leurs connaissances

pour optimiser le processus d'entraînement du cycliste. L'athlète doit être suivi quotidiennement aux niveaux de l'entraînement effectué et médical. Le staff technique doit être continuellement à son écoute. En aucun cas le coureur ne doit se préparer seul sans aucun contrôle.

2.4 Axe « psychologique »

La performance à haut niveau est très étroitement liée à la force mentale de l'athlète. En cyclisme, lorsque les « jambes ne vont pas », les coureurs parviennent certaines fois à compenser un déficit physique momentané en puisant dans leurs réserves à partir d'une force mentale surdéveloppée. La difficulté de pratique de cette discipline fait qu'à haut niveau tous les athlètes sont dotés d'un potentiel psychologique remarquablement élevé. Mais, malgré tout, on rencontre des athlètes dotés d'une force mentale supérieure à la moyenne et ce sont généralement ceux-là qui réalisent les meilleures performances. Toutefois, même si cette qualité est assurément développée chez la plupart des coureurs, il n'en demeure pas moins qu'elle peut être améliorée et adaptée à un niveau supérieur à partir de méthodes d'entraînement mental spécifiques. Il apparaît qu'à ce stade de la compétition, l'entraîneur doit faire appel à un véritable spécialiste de la préparation mentale. Par conséquent, l'optimisation du niveau de force mentale chez le coureur cycliste est un élément indispensable à prendre en considération, qui doit trouver sa place dans l'organisation du processus d'entraînement. En cyclisme, à qualités égales, c'est effectivement toujours celui qui est « le plus fort dans la tête » qui gagne car cet athlète est capable d'aller chercher au plus profond de lui les ressources nécessaires pour faire la différence sur son adversaire. De plus, comme à un certain niveau de compétition il existe toujours un noyau de coureurs qui ont des qualités physiques relativement proches, la différence est en partie dépendante du niveau de force mentale de l'athlète.

2.5 Axe « technico-tactique »

Dans la grande majorité des épreuves en cyclisme, la dimension technico-tactique prend également une part importante dans l'établissement de la performance de l'athlète. L'axe technique se rapporte principalement à l'attitude du coureur sur la bicyclette, sa façon de pédaler, sa manière d'utiliser son développement en fonction de la nature du terrain et du déroulement de la course, la position qu'il adopte sur la bicyclette, l'ensemble des moyens qu'il met en œuvre pour gérer l'effort qu'il fournit à chaque instant, la gestion de ses propres ressources. La dimension tactique est davantage centrée sur le déroulement de la compétition. Le coureur doit intégrer une certaine

quantité d'informations et être capable de les traiter par ordre d'importance en fonction de la situation du moment. L'attitude adoptée par les principaux adversaires en course (leur tactique personnelle), l'estimation de leur état de fraîcheur, les conditions climatiques, les impondérables (crevaillon, chute, bris de matériel) représentent toutes des variables que le coureur doit gérer au mieux afin d'optimiser sa tactique personnelle en course. Cet axe est présent dans le livre à l'intersection des axes physiologique et biomécanique.

2.6 Axe « technologique »

Le sport cycliste est une discipline sportive qui fait appel à une technologie relativement importante et particulièrement avancée. Depuis quelques années, les performances sont améliorées grâce à l'apport de la technologie qui contribue largement à optimiser la bicyclette du coureur dans ses moindres détails. Les tests en soufflerie permettent de diminuer au maximum la traînée aérodynamique de la bicyclette, les nouveaux matériaux composites améliorent sa rigidité et diminuent son poids, les nouveaux pneumatiques diminuent la résistance de roulement. Des accessoires spécialement conçus (freins, changement de vitesse, compteurs) autorisent un meilleur confort et améliorent la conduite de la bicyclette. Tout est actuellement mis en œuvre pour optimiser le rendement du cycliste sur sa bicyclette. Le développement de nouveaux équipements et l'amélioration des équipements existants sont ainsi de plus en plus influencés par des soucis de performance accrue. Cet axe est présent dans le livre à l'intérieur de l'axe biomécanique.

3. Équations de la performance en cyclisme

3.1 Généralités

La performance en cyclisme est dépendante de la vitesse de déplacement du coureur (V_d , km.h⁻¹) car ce sont les variations de cette variable qui déterminent le classement dans une compétition. Il est possible d'exprimer V_d à partir de deux modèles, l'un bioénergétique, l'autre biomécanique, mettant en avant des variables déterminantes dans la performance mais de poids différents selon le type de course et de configuration du terrain. Les deux modèles intègrent la résistance totale (R_T , N) qui s'oppose à l'avancement du coureur (traînée aérodynamique, résistance de roulement, poids) et montrent l'importance et le poids qu'elle peut avoir sur V_d .

3.2 Modèle bioénergétique de la performance

La première équation exprime la performance du coureur en cyclisme pour des intensités d'exercice au maximum critique (seuil anaérobie) à partir d'un modèle bioénergétique de l'activité qui tient compte du rendement mécanique (η) et de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$ l.min⁻¹ exprimée en J.s⁻¹) de l'athlète :

$$V_d = (\eta \cdot \dot{V}O_2) / R_T$$

Par exemple, un cycliste ayant un η de 23 %, une $\dot{V}O_2$ de 5 l.min⁻¹ et roulant contre une résistance totale de 30 N roulera à la vitesse de 48,3 km.h⁻¹ :

$$V_d = [0,23 \times (5 \times 21000/60)] / 30 \\ = 13,4 \text{ m.s}^{-1} = 48,3 \text{ km.h}^{-1}$$

sachant que la consommation d'1 l d'O₂ correspond à la production de 21000 J (pour un quotient respiratoire (QR) = 0,9).

Ce modèle bioénergétique montre qu'en cyclisme :

1. pour η et $\dot{V}O_2$ donnés, V_d ne peut être améliorée qu'à partir d'une diminution de R_T . Sur le plat, la position sur la bicyclette revêt donc une importance particulière dans la mesure où elle détermine la magnitude de la traînée aérodynamique, la résistance de roulement ayant un poids beaucoup plus faible. En montée, le poids du cycliste est la résistance principale qu'il convient de diminuer au maximum ;
2. pour R_T donnée, V_d ne peut être améliorée qu'à partir de l'augmentation de $\dot{V}O_2$ et/ou de η . La puissance du métabolisme aérobie doit donc être augmentée au maximum des possibilités physiologiques de l'athlète ;
3. pour R_T donnée, V_d max lors de l'exercice au seuil anaérobie est dépendante du pourcentage d'exploitation de la $\dot{V}O_{2\text{max}}$ au seuil anaérobie. Ainsi, l'entraînement doit conduire le coureur à augmenter au maximum la fraction d'oxygène utilisable lorsqu'il se trouve à des intensités d'exercice importantes.

3.3 Modèle biomécanique de la performance

La seconde équation exprime la performance en cyclisme à partir d'un modèle biomécanique intégrant toutes les intensités d'exercice, en considérant la force motrice appliquée sur la pédale (F , N), la longueur des manivelles (L , m) et la fréquence de pédalage (ω , rad.s⁻¹) :

$$V_d = (F \cdot L \cdot \omega) / R_T$$

Par exemple, le cycliste précédent roulera approximativement à la même vitesse s'il applique une force utile (perpendiculaire) de 276 N sur des manivelles de 0,175 m à une cadence de 80 tr.min⁻¹ (8,4 rad.s⁻¹) contre une résistance totale de 30 N :

$$V_d = (276 \times 0,175 \times 8,4) / 30 \\ = 13,5 \text{ m.s}^{-1} = 48,6 \text{ km.h}^{-1}$$

Ce modèle biomécanique montre que :

1. le développement de la force musculaire (à partir de méthodes spécifiques) est indispensable pour augmenter le niveau de performance ;
2. pour un niveau de force donné, la performance en cyclisme peut dépendre du ratio entre la fréquence de pédalage et R_T sachant que la longueur des manivelles est une variable qui reste constante ;
3. R_T est une variable qu'il convient de minimiser pour améliorer la performance (surtout lorsque les vitesses de déplacement sont élevées) puisque la fréquence de pédalage est une variable relativement stable qu'il est inutile de prétendre augmenter à des valeurs très élevées sous peine d'altérer le rendement de l'athlète ;
4. étant donné que la force est une qualité physique qui peut être difficile à accroître à certains moments du processus d'entraînement, l'augmentation de la longueur des manivelles peut être une solution intéressante pour améliorer la performance dans certaines configurations de course et de terrain.

4. Profil synoptique de la performance du coureur

Il est important de déterminer des indicateurs sensibles inhérents à la capacité de performance du coureur pour obtenir un modèle précis permettant de mesurer les effets induits par la compétition à la fin de chaque année. Dix critères essentiels permettent d'estimer la capacité de performance du coureur et d'établir son profil synoptique. Ils sont présentés dans le tableau 2.1. La comparaison des tableaux d'année en année permet de faire un bilan de base général, de recentrer le travail et de surtout montrer à l'athlète ses points forts et ses points faibles. L'expérience montre que les athlètes les plus performants sont ceux qui présentent le maximum de croix dans la colonne « Fort » où les critères « Mental », « Potentiel physique », « Santé » et « Rigueur et régularité dans le travail » sont ceux qui

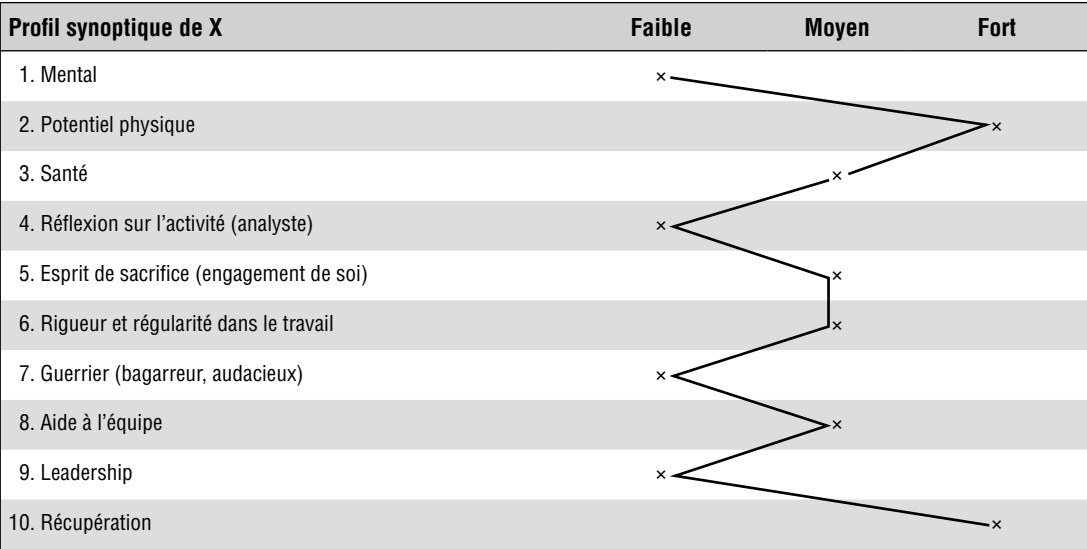


Tableau 2.1
Critères permettant de dresser le profil synoptique d'un coureur à l'issue de chaque saison.

pèsent le plus dans la capacité à établir de grandes performances. Ils doivent donc être développés au maximum de leur possibilité.

5. Capacité de performance maximale

La capacité de performance maximale d'un coureur renvoie à l'aptitude qu'a celui-ci de réaliser la meilleure performance possible en compétition. Pour y parvenir, il doit exploiter le maximum de son potentiel physique pour que ce dernier lui permette de produire une réponse physique maximale, le conduisant à réaliser la meilleure performance possible. Or, pour recruter le maximum du potentiel physique, la condition sine qua non est d'avoir une stimulation, au maximum de leurs possibilités, des différents systèmes fonctionnels en action au cours de l'effort. La stimulation n'est maximale que si le coureur est capable d'activer son système nerveux central de façon rationnelle. Plus la force mentale ou psychologique du sportif est importante et plus il est en mesure de stimuler et mobiliser fortement son propre potentiel physique. C'est seulement dans cette condition de fonctionnement optimal interne qu'il est en mesure de produire une capacité de performance maximale. Aussi, pour être certain d'atteindre la capacité de performance maximale, il faut également s'assurer que le niveau de fatigue du sportif (fatigue générale et fatigue périphérique) soit le plus faible possible. Ainsi, la gestion optimale du potentiel physique, de la force mentale et de la fatigue constitue la voie d'excellence qui conduit à l'établissement de la capacité maximale de performance chez un athlète (figure 2.1).

En d'autres termes, un athlète peut très bien avoir développé à un niveau très élevé son potentiel

physique mais s'il n'est mentalement pas très fort ou s'il est fatigué psychologiquement, il sera dans l'incapacité de fournir un haut niveau de performance. La production d'une capacité de performance maximale passe donc obligatoirement par un potentiel physique développé à son maximum associé à un haut niveau de force mentale.

Le tableau 2.2 présente le niveau de capacité de performance maximale qu'un cycliste peut prétendre avoir en fonction de l'importance de son potentiel physique et de sa force mentale. Ce modèle est évidemment à prendre en relativisant les choses mais il a le mérite de montrer le poids que peuvent avoir le potentiel physique et la force mentale sur la capacité à établir une performance maximale. Par exemple, on observe qu'il est possible d'évoluer au plus haut

Figure 2.1
Modèle qui permet de réaliser la meilleure performance possible en compétition.

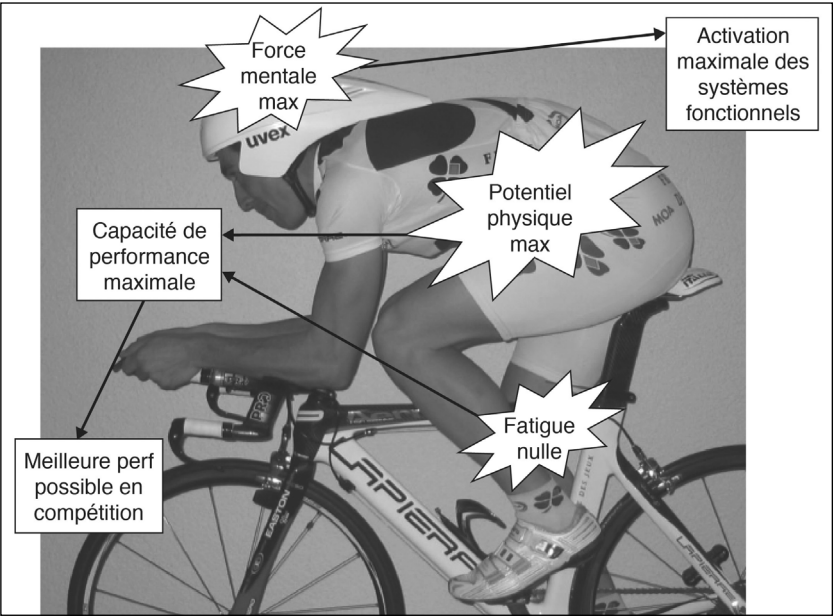


Tableau 2.2

Niveau de capacité de performance d'un cycliste en fonction de la grandeur de son potentiel physique (PP) et de la magnitude de sa force mentale (FM).

	PP+++	PP++	PP+	PP-	PP--	PP---
FM+++	Grand champion	Champion	Pro Moyen Très régulier	Régional Très régulier	Départemental Très régulier	Départemental
FM++	Champion	Bon pro Très régulier	Pro Moyen Bonne régularité	Régional Régularité moyenne	Départemental	Départemental
FM+	Très bon pro Régularité moyenne	Bon pro Régularité moyenne	Amateur National	Régional Peu régulier	Départemental	Départemental
FM-	Bon pro Peu régulier	Pro moyen Peu régulier	Régional	Départemental	Départemental	Amateur Loisir
FM--	Pas professionnel	Amateur National	Régional	Départemental	Amateur Loisir	Amateur Loisir
FM---	Amateur loisir	Amateur Loisir	Amateur Loisir	Amateur Loisir	Amateur Loisir	Amateur Loisir

niveau chez les professionnels à partir d'un potentiel physique moyen mais obligatoirement avec une force psychologique très importante. En revanche, malgré un excellent potentiel physique, il y a peu de chance de faire une carrière intéressante dans le haut niveau si l'état psychologique du coureur est trop fragile.

6. Conclusion

L'identification des nombreuses variables qui sous-tendent les cinq grands compartiments de la performance sportive en cyclisme permet

d'explorer et d'analyser l'axe principal de la réussite sportive en cyclisme. L'optimisation de ces variables à partir d'un travail rationnel à l'entraînement doit permettre d'améliorer significativement la capacité de performance maximale du coureur. Les chapitres qui suivent font référence aux différents compartiments et variables de la performance évoqués précédemment et proposent des moyens et des méthodes pour améliorer, optimiser ou minimiser certaines variables. Aucune recette miracle n'est proposée mais il s'agit davantage de soumettre et de suggérer au lecteur les grandes tendances qui se dégagent à partir des connaissances théoriques et pratiques qui existent en l'état actuel des connaissances.

Le métabolisme énergétique lors de l'exercice

Frédéric GRAPPE

3

Sommaire

1. Les différentes voies métaboliques
2. Continuum énergétique des différents systèmes d'apport d'énergie
3. Métabolisme anaérobie alactique
4. Métabolisme anaérobie lactique
5. Métabolisme aérobie
6. Processus de récupération et resynthèse des réserves énergétiques au cours de la récupération
7. Zones d'intensité en fonction des voies métaboliques
8. Conclusion

Lors de l'effort, comment le corps libère-t-il de l'énergie ?

Chaque fois qu'un cycliste réalise un exercice, qu'il soit léger, modéré, intense ou maximal, une certaine quantité d'énergie doit être libérée par son organisme. Chacun s'est déjà rendu compte que la libération de l'énergie ne se produit pas de la même façon selon le type d'effort effectué. Lorsque l'on fait un sprint, cela requiert la libération d'une grosse quantité d'énergie sur un temps relativement court et très rapidement. Sur les premières secondes du sprint, on se sent très fort mais très rapidement, cette sensation de puissance s'estompe et laisse place à une sorte de « vide » où l'on ne perçoit plus qu'une faible libération d'énergie. À l'inverse, lorsqu'on effectue une séance d'entraînement à intensité modérée, en décontraction, on a le sentiment de pouvoir rouler pendant des heures sans aucun problème. Dans les deux cas, l'exercice a été réalisé avec une certaine libération d'énergie, indispensable à la production du mouvement, mais de manière tout à fait différente. Dans le premier cas, l'objectif était de libérer le maximum d'énergie dans un minimum de temps alors que, dans le second cas, le but était de maintenir un exercice sur une longue durée.

On peut alors se demander pourquoi, après un sprint, il est possible de continuer un exercice sur un niveau d'intensité plus faible alors que l'énorme quantité d'énergie préalablement libérée durant le sprint aurait normalement dû épuiser les stocks. Lorsqu'il n'y a plus d'essence dans une voiture, il n'est plus possible de la faire avancer même à faible vitesse ! Il est indispensable de réapprovisionner en carburant pour reprendre la route. Le corps humain a cet avantage de pouvoir libérer de l'énergie à partir de différents réservoirs qui s'approvisionnent à partir de différents

substrats. C'est pourquoi, après avoir épuisé le réservoir d'énergie utilisé pour les efforts très violents de sprint, il est possible d'utiliser l'énergie provenant d'un autre réservoir, celui inhérent aux exercices légers, et continuer à rouler tranquillement pendant des heures comme si rien ne s'était passé. Ces réservoirs d'énergie n'ont pas tous le même contenu, ne se remplissent pas tous à la même vitesse une fois « vidés » et libèrent de l'énergie à partir de systèmes de fonctionnement différents. Le fonctionnement de l'ensemble s'avère relativement complexe et demande des explications précises.

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer le fonctionnement de la libération de l'énergie par le corps humain lors d'exercices réalisés à différentes intensités. La compréhension de ce qu'on appelle le « métabolisme énergétique » lors de l'exercice doit amener le lecteur à mieux interpréter le fonctionnement de l'organisme lorsqu'un certain type d'effort est réalisé. Bien intégrer le fonctionnement des différentes filières d'approvisionnement de l'énergie permet : 1) de mieux gérer le potentiel physique en compétition, 2) d'améliorer la conception des séances d'entraînement et 3) d'optimiser la récupération du sportif dans la séance d'entraînement et entre les séances d'entraînement.

1. Les différentes voies métaboliques

Le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et, pour les protéines l'azote sont les éléments fondamentaux qui constituent les aliments. Seulement, la dégradation des aliments libère peu d'énergie. C'est pourquoi ils ne sont pas utilisés directement pour fournir de l'énergie au muscle. La seule énergie provenant des aliments et utilisable directement par le muscle est stockée sous la forme d'un composé hautement énergétique : l'ATP (Adénosine Tri-Phosphate). Il faut noter qu'environ 60 % à 70 % de l'énergie du corps humain est libérée sous forme de chaleur. C'est seulement le reste qui est utilisé pour la contraction musculaire.

Tableau 3.1

Réserves énergétiques du muscle chez l'homme (Poortmans, 1988).

	$\mu \text{ mol.g}^{-1}$ de tissu frais	Énergie libérée par mole de substrats (kJ.mol^{-1})
ATP	6	44
PC	15	58
Glycogène	121	2 900
Triglycérides	9	29 300
Acides aminés	36	1 870

Au début de l'exercice, la concentration d'ATP dans le muscle est suffisante pour quelques contractions seulement. Par conséquent, pour que le muscle puisse se contracter en continuité, l'ATP doit être reconstitué au fur et à mesure qu'il est hydrolysé. Cela est rendu possible à partir des différentes voies métaboliques de fourniture d'énergie pour le muscle. Ces différentes filières énergétiques fonctionnent chacune avec un certain délai pour délivrer de l'ATP aux muscles mais en parfaite symbiose. C'est la raison pour laquelle on n'assiste jamais à une chute importante de la concentration d'ATP dans le muscle. Les substrats issus des différentes voies énergétiques présents dans le muscle et utilisés durant toute la durée de la contraction sont :

- La créatine phosphate (CP) : qui constitue le premier réservoir d'énergie immédiatement indispensable à la contraction musculaire. Toutefois, ce réservoir est très limité et permet un approvisionnement d'énergie mais seulement pour quelques secondes (10 sec en moyenne).
- Les glucides : les réserves glucidiques comprennent les stocks de glycogène musculaire et de glycogène hépatique. Cela constitue les réserves d'hydrates de carbone ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Ces réserves sont également limitées puisqu'elles permettent avec un bon niveau d'entraînement de tenir entre 45 min et 1 heure à un exercice réalisé au seuil anaérobie (75-80 % $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$). Les stocks de glycogène musculaire et hépatique correspondent à environ 2 000 kcal. Les sucres apportent une quantité d'énergie de 4 kcal.g^{-1} . Cette énergie est facilement disponible.
- Les lipides : les réserves lipidiques (triglycérides) fournissent une grande quantité d'énergie utilisée par les muscles lors des exercices réalisés à intensité sub-critique (sous le seuil anaérobie). Les triglycérides sont répartis essentiellement dans les tissus adipeux. Les stocks lipidiques correspondent à environ 70 000 kcal, soit 35 fois plus que les stocks de glycogène. Les graisses apportent une quantité d'énergie de 9 kcal.g^{-1} , soit 2,3 fois plus d'énergie par gramme que les sucres. Toutefois, cette énergie est moins facilement disponible que celle apportée par les sucres.
- Les protéines : à partir du catabolisme des acides aminés. Elles peuvent fournir 5 à 10 % de l'énergie nécessaire lors d'un exercice prolongé réalisé en endurance fondamentale. Seuls les acides aminés (unités fondamentales des protéines) peuvent être utilisés pour produire de l'énergie.

Les réserves énergétiques du muscle chez l'homme exprimées en $\mu\text{mol.g}^{-1}$ de tissu frais et disponibles chez un homme de 70 kg ayant 25 kg de muscles sont résumées dans les tableaux 3.1 et 3.2 (Poortmans, 1988).

Conséquences pour le cycliste

L'ATP ne lui est pas apporté de manière exogène à l'intérieur d'un bidon. Il est reconstitué au fur et à mesure qu'il est hydrolysé à partir des différentes voies métaboliques de fourniture d'énergie. Ces différentes filières énergétiques fonctionnent chacune avec un certain délai pour délivrer de l'ATP en parfaite symbiose. Les substrats utilisés sont la phosphocréatine, les glucides, les lipides et les protéines. Les glucides, les lipides et les protéines sont apportés à partir des aliments solides et liquides.

Il convient de noter que l'exercice ne conduit jamais à une déplétion importante de l'ensemble des substrats disponibles au niveau musculaire et des réservoirs tissulaires. Seules les réserves en glycogène peuvent être significativement diminuées lorsque l'exercice a été mené jusqu'à épuisement à des intensités proches du seuil anaérobie ou sur-critique (exercice fractionné).

2. Continuum énergétique des différents systèmes d'apport d'énergie

L'utilisation des différents substrats au cours de l'exercice dépend de sa puissance et de sa durée. On peut rappeler par ailleurs que la puissance et la durée de l'exercice sont les deux variables qui déterminent la quantité de travail réalisée par le sujet ou, en d'autres termes, la charge d'entraînement (voir le chapitre sur la quantification des charges d'entraînement). Ainsi, le travail peut être défini à partir d'une faible intensité et une longue durée d'exercice ou alors, à partir d'une intensité importante et une courte durée de l'exercice. Pour le premier cas, le maintien de l'activité ne peut s'exécuter qu'à un taux métabolique relativement bas. En revanche, dans le second cas, l'activité métabolique peut rester élevée. Dans tous les cas, on observe une décroissance exponentielle de la dépense énergétique avec le niveau de la puissance développée (figure 3.1). Chaque niveau de puissance fait appel à la fourniture de différents substrats pour permettre la contraction musculaire.

Les premières secondes de l'exercice demandent un apport immédiat d'énergie à partir des réserves extrêmement faibles d'ATP (0,076 kg pour un homme de 70 kg) et de CP (0,087 kg pour un homme de 70 kg). Lorsque l'exercice se poursuit jusqu'à environ 2 min, la glycogénolyse anaérobie (dégradation du glycogène sans apport d'O₂) permet la fourniture d'ATP pour le maintien de l'effort. Au fur et à mesure que l'exercice se poursuit (donc, à une intensité sub-critique), l'oxydation

Substrats	Quantité (kg)	Énergie disponible (kJ)
ATP	0,076	5
CP	0,087	17
Substrats circulant (glucose, acide gras...)	0,023	420
Glycogène musculaire	0,400	4 252
Glycogène hépatique	0,060	638
Protéines	6	78 250
Triglycérides	12	446 500

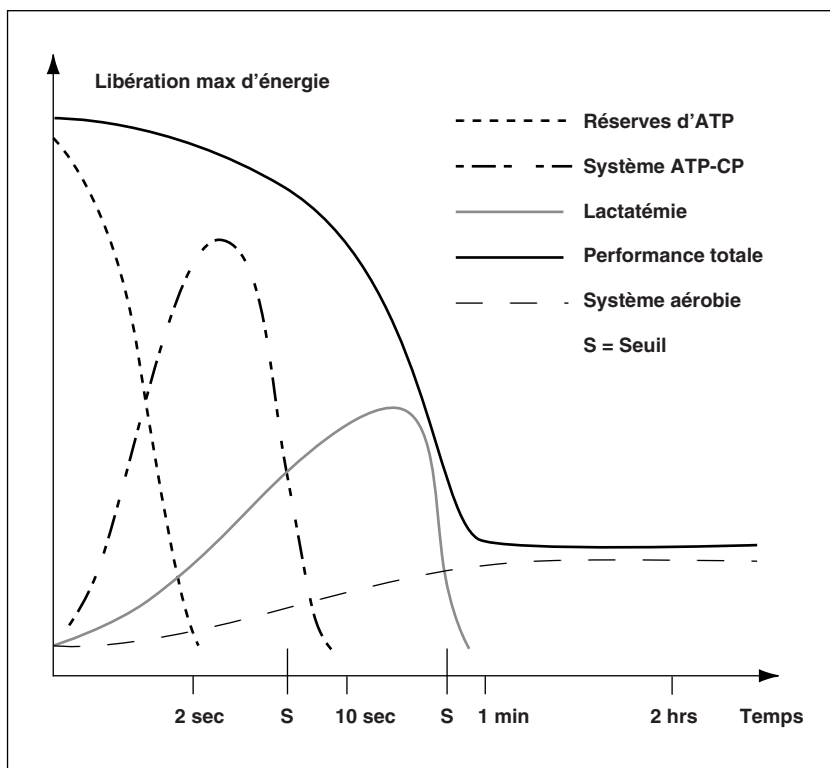
par voie aérobie (avec apport d'O₂) du glycogène et des acides gras libres prend de plus en plus d'importance. Lorsque l'exercice est de très longue durée (plusieurs heures), l'organisme peut faire appel à l'oxydation des acides aminés. Mais c'est toujours tardivement que l'oxydation de ces derniers intervient durant l'exercice.

Tableau 3.2

Substrats disponibles chez un homme de 70 kg ayant 25 kg de muscles (Poortmans, 1988).

Figure 3.1

Trois systèmes contribuent à fournir de l'énergie dès le début d'un exercice mais leur contribution dépend de la puissance de l'exercice et du taux de libération d'énergie de chaque système. La figure montre comment les différents systèmes d'apport d'énergie contribuent chacun à la production d'ATP en fonction du temps lors d'un effort maximal. Les seuils (S) indiquent le moment où le système d'apport d'énergie est épuisé. L'entraînement peut reculer les limites de temps des seuils.



Conséquences pour le cycliste

Il utilise l'énergie libérée par son organisme de manière très organisée à partir du fonctionnement en parfaite symbiose des différentes voies métaboliques qui opèrent en fonction de la puissance et de la durée de l'exercice qu'il effectue. Les filières énergétiques fonctionnent ainsi en toute complémentarité, en fonction de la demande liée à l'exercice qu'il réalise.

Ainsi, la fourniture d'énergie durant l'exercice fait appel à une sorte d'assemblage des voies aérobie et anaérobies associées au passage progressif des métabolismes glucidiques, lipidiques et protéiques.

3. Métabolisme anaérobie alactique

3.1 Hydrolyse de l'ATP

La molécule d'ATP est composée d'adénosine combinée à trois phosphates inorganiques (P_i). La liaison entre les deux derniers phosphates est riche en énergie (figure 3.2). Pour permettre les premières contractions musculaires du début de l'exercice, sa rupture ou hydrolyse par l'ATPase (enzyme) libère l'énergie stockée dans la liaison (7,6 kcal.mol. $^{-1}$ d'ATP). L'ATP est ainsi transformée en ADP (adénosine diphosphate) et P_i . Ces processus de stockage de l'énergie sous forme d'ATP sont appelés phosphorylations.

3.2 Le système ATP-CP

La première voie métabolique qui permet de palier la chute d'ATP dès les toutes premières secondes de l'exercice est l'hydrolyse de

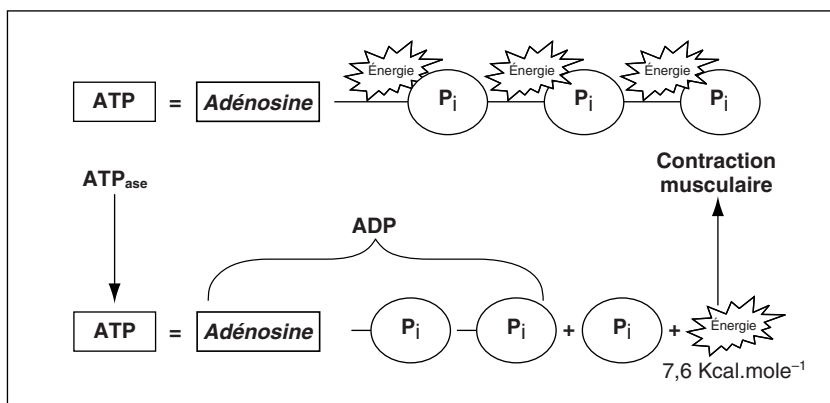
la phosphocréatine (CP). Sa concentration dans le muscle (de 14 à 18 mmol.kg $^{-1}$ de muscle frais) est trois à quatre fois plus élevée que celle de l'ATP. La CP est une molécule possédant une liaison phosphate à haute énergie. L'énergie libérée par l'hydrolyse de la liaison phosphate sert principalement à reconstituer les stocks d'ATP. La créatine kinase (CK, enzyme) agit pour séparer le phosphate de la créatine (figure 3.3) en permettant la libération d'énergie. Cette énergie permet de réunir le phosphate à l'ADP afin de reformer de l'ATP. Les stocks d'ATP sont ainsi préservés. L'énergie libérée par le système ATP-CP est de 1 ATP pour une mole de PC. Ce système de production d'ATP ne nécessite aucun apport d'O $_2$. C'est la raison pour laquelle cette voie métabolique de production d'énergie est appelée anaérobie.

La resynthèse de l'ATP par la CP permet de brusques variations de niveau de dépense d'énergie qui, autrement, seraient impossibles à cause de l'inertie d'ajustement du métabolisme aérobie. Elle autorise le développement pour de courtes périodes de temps (15 à 30 sec), de pics de puissance 12 fois plus élevés que ceux produits par la voie oxydative.

Lors des premières secondes d'un exercice, le taux d'ATP est maintenu constant grâce à l'hydrolyse de la CP. La cinétique de diminution de cette dernière est exponentielle en fonction du temps (figure 3.4). Sa décroissance est fonction de la régénération de l'ATP durant les toutes premières secondes de l'exercice. Les deux premières secondes entament les stocks de CP de 50 %. Vers 6 sec d'exercice, 80 % de la CP a été utilisée. Au bout de 15 sec, le restant de CP ne suffit plus à fournir de l'ATP. Le maintien de la contraction musculaire requiert par conséquent le relais d'autres voies métaboliques. La glycolyse et la voie métabolique aérobie assurent ensuite l'approvisionnement de l'ATP.

Figure 3.2

Structure d'une molécule d'ATP et processus de libération d'énergie (adapté de Wilmore et Costill, 1998).



Conséquences pour le cycliste

Dès les premiers coups de pédales, le premier substrat énergétique qui lui permet de palier rapidement la chute d'ATP est la phosphocréatine. Sans elle, la continuité de l'effort serait impossible. Elle lui autorise le développement de pics de puissance 12 fois plus élevés que ceux produits par l'intermédiaire de l'utilisation des graisses. Seulement, les réserves de phosphocréatine sont très faibles et requièrent le relais d'autres filières énergétiques.

4. Métabolisme anaérobie lactique

La production d'ATP est rendue possible à partir de la dégradation du glucose par hydrolyse (enzymes glycolytiques) sans apport d'O₂, d'où l'appellation « glycolyse anaérobie ». Le glucose représente 99 % du sucre circulant dans le sang. Il vient de la digestion des hydrates de carbone (pâtes, riz, pommes de terre...) et de la dégradation du glycogène hépatique. Le glycogène est stocké au niveau musculaire et dans le foie à partir du glucose par la glycogénèse. Le glucose hépatique provient de l'hydrolyse de ses réserves en glycogène et de la gluconéogenèse. Au repos, la glycogénolyse représente environ 75 % du glucose libéré par le foie ($\pm 150 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$), le restant étant fourni par la gluconéogenèse à partir de différents précurseurs (pyruvate, lactate, glycérol, acides aminés) (Wahren, 1977). La gluconéogenèse hépatique au repos chez le sujet normal est estimée à $0,2-0,3 \text{ mmol} \cdot \text{min}^{-1}$, soit 25 % de la production totale de glucose par le foie (Wahren et coll., 1971 ; Hultman, 1978).

Avant de fournir de l'énergie, le glucose et le glycogène doivent se transformer en glucose-6-phosphate (G6P). Pour arriver à ce composé, le glucose a besoin d'un ATP. En revanche, le glycogène se transforme préalablement en glucose-1-phosphate (G1P) et se dégrade en G6P sans apport d'ATP (figure 3.5).

Le métabolisme de la glycolyse anaérobie débute à partir du G6P et se termine avec la formation de l'acide pyruvique. Le devenir de ce dernier composé dépend de la nature de l'exercice, à savoir, s'il est effectué en aérobie ou en anaérobie. L'utilisation ou non de l'O₂ est déterminante. Si l'exercice est réalisé sans apport d'O₂, l'acide pyruvique est dégradé en acide lactique. Au total, 12 réactions enzymatiques

Conséquences pour le cycliste

Les pâtes, le riz, les pommes de terre, le pain (hydrates de carbone) ainsi que le sucre (glycogène) stocké dans les muscles et le foie permettent d'obtenir le glucose que l'on trouve dans le sang. Sa dégradation sans oxygène permet de produire de l'ATP en faible quantité. Mais l'avantage pour le cycliste est que l'énergie libérée est disponible rapidement et lui permet de produire un effort de type résistance, donc à une intensité relativement élevée sur plusieurs secondes. La contrepartie, c'est la production inévitable de lactate au niveau du muscle, l'acide lactique, qui s'accumule rapidement et limite l'intensité de l'exercice dès que la concentration est trop importante. Un entraînement bien conduit permet : 1) d'augmenter les réserves de glycogène, 2) de limiter la production de lactate pour une intensité d'exercice donnée et 3) d'habituer le muscle à travailler avec une concentration importante de lactate. Le cycliste ne doit surtout pas considérer le lactate comme un produit de « déchet » et encore moins comme une « toxine qui empoisonne le muscle » (comme il le pense souvent), mais plutôt comme un métabolite intermédiaire à fort potentiel énergétique.

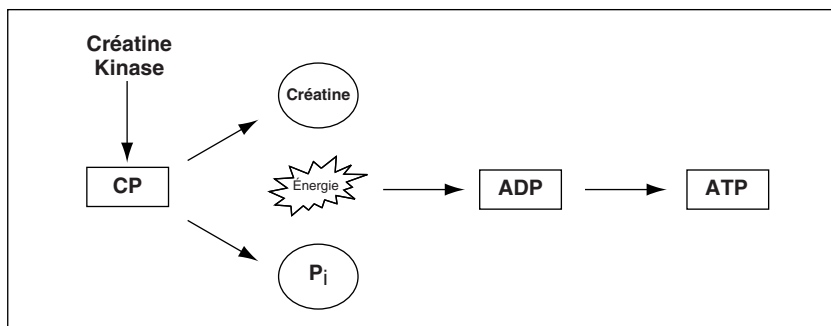


Figure 3.3

Reconstitution de l'ATP à partir de l'hydrolyse de la créatine phosphate (CP) (adapté de Wilmore et Costill, 1998).

qui se déroulent dans le cytoplasme cellulaire sont nécessaires pour dégrader le glycogène en acide lactique. De ce processus, 3 ATP sont produits pour une molécule de glycogène hydrolysée ou 2 ATP pour une molécule de glucose (car 1 ATP est utilisé pour la transformation du glucose en G6P). La molécule d'acide lactique est ensuite entièrement dissociée en un proton (H⁺) et en un anion qui est le lactate.

Il est par conséquent très important de bien faire la distinction entre l'acide lactique (C₃H₆O₃) et le lactate. En effet, ce sont deux composés différents. L'acide lactique produit par la glycolyse anaérobie se dissocie rapidement pour donner un sel : le lactate. Le lactate est donc un sel d'acide lactique.

Il en découle que, lorsqu'on fait un exercice en anaérobie, il est plus exact de parler de production de lactate que d'acide lactique car le lactate n'est rien de plus que le témoin d'une production d'ATP par la glycogénolyse ou/et la glycolyse. Le lactate peut même être considéré comme un témoin imparfait puisque sa présence dans le muscle ou dans le sang

Figure 3.4

Variations des taux musculaires d'ATP et de CP lors des premières secondes d'un exercice maximal (adapté de Wilmore et Costill, 1998).

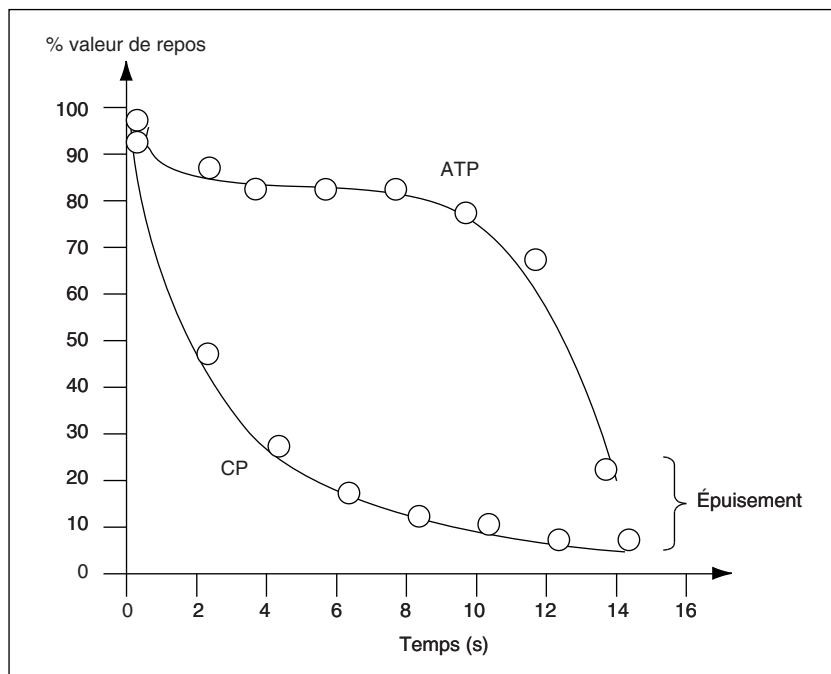
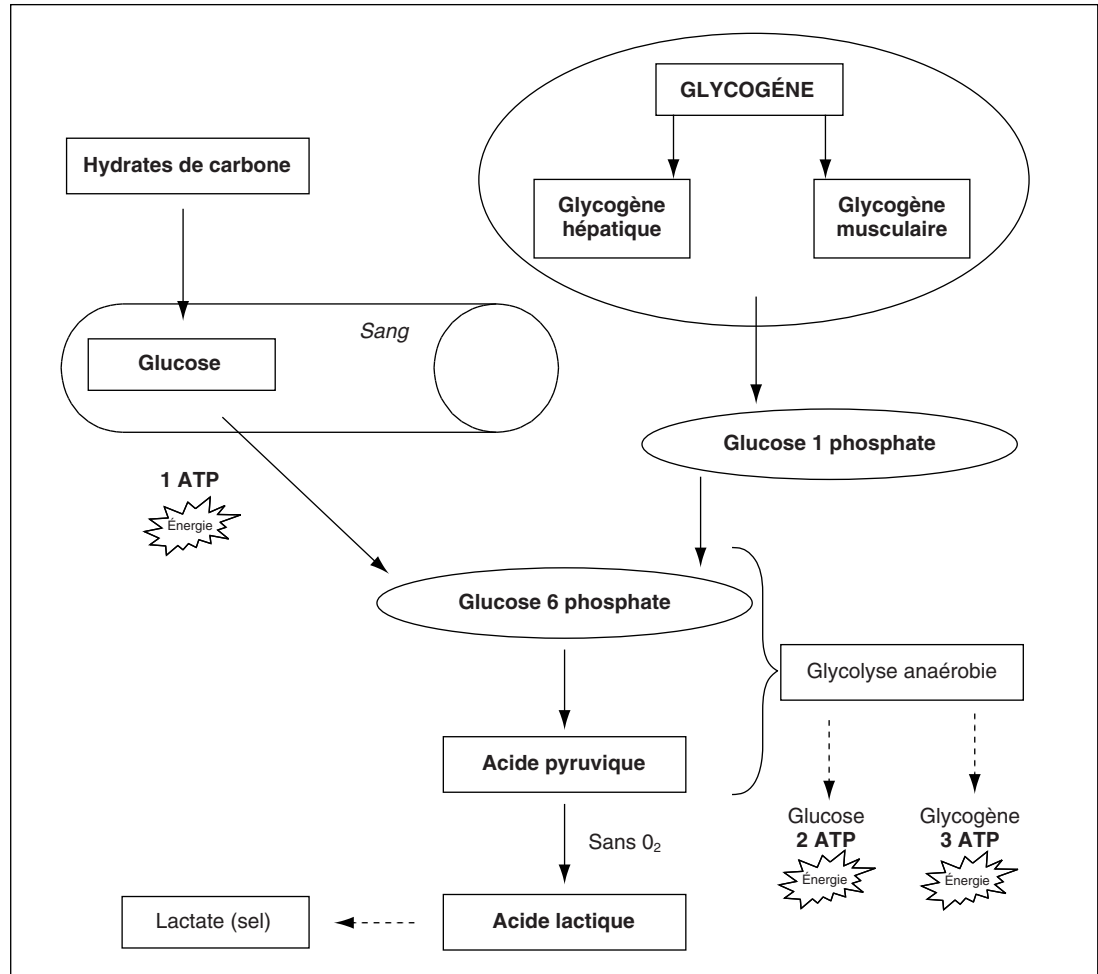


Figure 3.5

Illustration des différentes réactions biochimiques qui ont lieu lors du métabolisme anaérobie lactique.



représente seulement une partie de ce qui reste de sa production, une fois éliminée la partie métabolisée lors de processus concomitants.

Mais alors, quel est le devenir du lactate ? Au cours de l'exercice intense anaérobie, le lactate s'accumule dans le cytosol. Une partie en équilibre avec le pyruvate est oxydée dans la mitochondrie (Brooks et coll. 1999), tandis que la partie restante est transportée à travers le sarcolemme, hors de la fibre musculaire dans le milieu interstitiel et dans les capillaires sanguins (Brooks et Fahey, 1984, Brooks, 2000). À partir de son transport sanguin, sa destinée est multiple. Une partie est oxydée par le myocarde et surtout par les fibres lentes oxydatives des groupes musculaires au repos ou peu sollicités. Une autre partie est utilisée comme précurseur de la glyconéogenèse hépatique et reconstitue donc du glucose. Le bilan du devenir du lactate lors de l'exercice se répartit globalement en l'oxydation des trois-quarts de la production, le dernier quart étant destiné à reconstituer les réserves du glycogène hépatique. La lactatémie n'est donc que le témoin indirect et incomplet de la production cellulaire du lactate. Elle reflète davantage la résultante de débits entrant (de la cellule vers le milieu

interstitiel qui conduit au sang) et sortant (du sang vers le myocarde, foie, muscles).

La glycolyse anaérobie fournit au total peu d'ATP mais ce système a l'avantage d'être disponible rapidement en permettant la production d'une puissance importante dans les 15 premières secondes de l'exercice.

Les limites du système sont évidemment la production inévitable d'acide lactique, véritable poison pour le muscle, qui altère progressivement au fur et à mesure de l'augmentation de sa concentration le fonctionnement enzymatique de la glycolyse. La contraction musculaire se trouve progressivement diminuée.

5. Métabolisme aérobie

5.1 Introduction

Il permet la fourniture d'énergie à partir de l'apport d'O₂. L'exercice est réalisé en aérobie. Les processus d'oxydation de l'O₂ sont réalisés au sein de la mitochondrie et constituent la respiration

cellulaire. Comparé au métabolisme anaérobie, le système aérobie a un rendement énergétique très important. C'est pourquoi il constitue le principal système d'approvisionnement d'énergie pour les exercices pratiqués en endurance.

Le métabolisme aérobie est capable de fournir de l'ATP à partir de l'oxydation des hydrates de carbone (glycogène hépatique et musculaire, $C_6H_{12}O_6$) et des graisses (triglycérides).

5.2 Oxydation des hydrates de carbone

Pour délivrer de l'ATP, les hydrates de carbone doivent subir une succession de processus biochimiques (figure 3.6). Le premier concerne la glycolyse qui vient d'être évoquée précédemment. Le second renvoi au cycle de Krebs, véritable centrale chimique cellulaire. Le troisième à la chaîne de transport des électrons qui permet la phosphorylation oxydative.

En présence d' O_2 durant la glycolyse, l'acide pyruvique est dégradé en acétyl-CoA (acétyl-Coenzyme A). Ce composé entre dans le cycle de Krebs pour y être complètement oxydé et dégradé en carbone (C) et hydrogène (H_2). Suite à ce processus d'oxydation, 2 ATP sont formées. Le carbone se combine à l' O_2 pour former le dioxyde de carbone (CO_2) qui est directement transporté vers les poumons pour y être rejeté.

L'élimination de la quantité importante d'hydrogène produite durant la glycolyse et le cycle de Krebs est réalisée à partir de la chaîne de transport des électrons qui intervient juste après le cycle de Krebs. Ce processus d'élimination évite l'acidification trop importante du milieu cellulaire. Deux coenzymes, le NAD (nicotinamide adénine dinucléotide) et le FAD (flavine adénine dinucléotide) sont chargées de transporter les H_2 vers cette chaîne de transport qui les divise en protons (H^+) et électrons (e^-). Les H^+ se combinent à l' O_2 pour former de l'eau (H_2O)

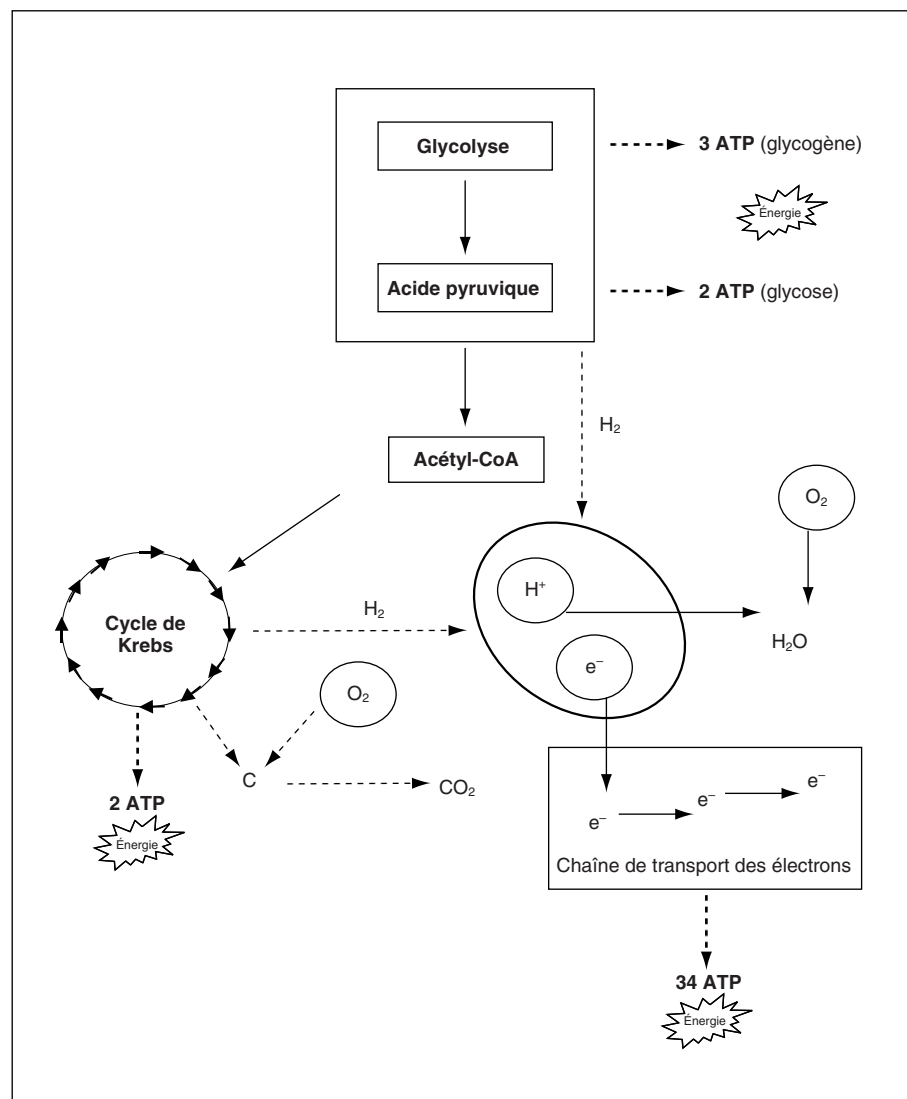


Figure 3.6

Illustration des différentes réactions biochimiques qui ont lieu lors du métabolisme aérobie.

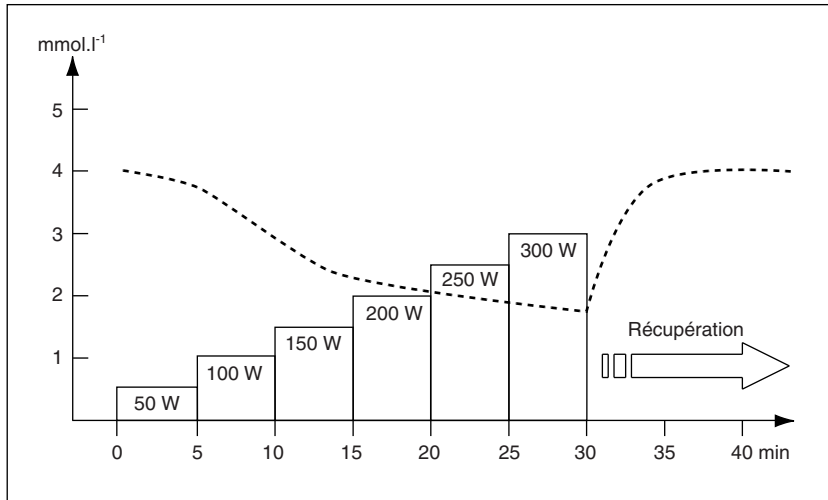


Figure 3.7

Évolution de la concentration sanguine en glucose dans l'artère fémorale lors d'un exercice d'intensité croissante exécuté sur bicyclette ergométrique (adapté d'après Poortmans, 1988).

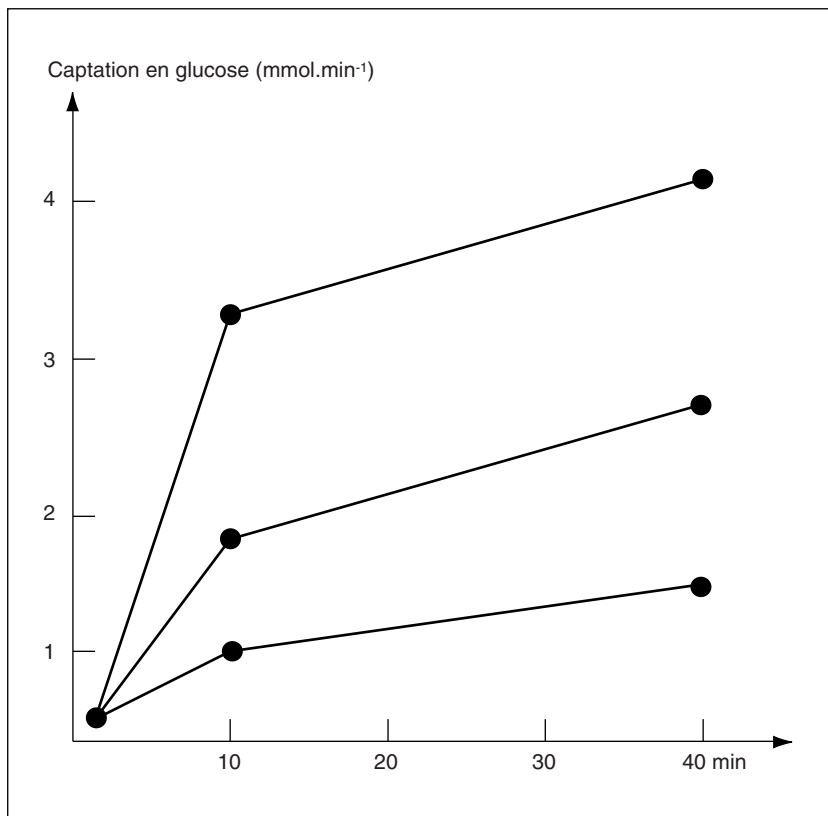


Figure 3.8

Évolution de la captation en glucose sanguin dans les muscles des membres inférieurs lors de différents exercices maintenus à charge constante pendant 40 min sur bicyclette ergométrique (adapté de Wahren 1977).

prévenant par là-même l'acidification du milieu. Les e^- subissent une série de réactions chimiques en passant à l'intérieur de la chaîne de transport des électrons et, par phosphorylation de l'ADP en ATP, fournissent 39 ATP à partir d'une molécule de glycogène ou 38 ATP par molécule de glucose.

5.2.1 Captation du glucose durant l'exercice

Le contenu total en glucose est estimé à 24,8 g (127,8 mmoles) chez l'homme (Reichard et coll., 1961). Pour un volume sanguin moyen de 5,4 l, le glucose sanguin est proche de 4,4 g (24,3 mmoles). Ainsi, la majeure partie du glucose libre dans l'organisme est distribuée au niveau de nombreux territoires autres que le compartiment sanguin (organes splanchniques, cerveau). Le glucose ne constitue pas le substrat fondamental de la contraction musculaire mais il joue cependant un rôle non négligeable en tant que substrat énergétique du muscle en activité.

Lors de l'exercice intense ou modéré, la glycémie est maintenue constante. Toutefois, au-delà de plusieurs heures et en fonction du niveau d'entraînement, la glycémie chute progressivement pour atteindre des valeurs relativement basses, voisines de 2,5 mmol.l⁻¹ (Christensen, 1931 ; Wahren et coll., 1975). C'est ce qu'on appelle le phénomène d'hypoglycémie, bien connu chez les sportifs pratiquant des sports d'endurance. Il faut savoir que cette hypoglycémie a des effets néfastes sur le fonctionnement du système nerveux central. C'est pourquoi les athlètes en état hypoglycémique se sentent complètement vidés nerveusement, présentent des troubles du comportement et ont de la peine à poursuivre leur effort.

La captation du glucose sanguin dépend étroitement de l'intensité de l'exercice (figure 3.7). Lors d'un exercice sur bicyclette ergométrique, plus l'intensité de l'exercice augmente et plus la concentration en glucose dans la veine fémorale décroît.

Après l'arrêt de l'exercice, la récupération est relativement rapide puisqu'il faut environ 5 min pour revenir au taux de base de glucose.

Lors de l'exercice à charge constante, la captation du glucose évolue en fonction de l'intensité de l'exercice mais de manière non linéaire en fonction du temps (Wahren et coll., 1971 ; Wahren, 1977). Après 10 min d'exercice, elle s'infléchit et augmente plus modérément en fonction du temps (figure 3.8). La captation glucosée dans les membres inférieurs peut atteindre 10 à 20 fois la valeur de repos. L'exercice constitue donc un puissant stimulus de l'oxydation du glucose sanguin par les muscles en action.

5.2.2 Libération du glucose hépatique

Le maintien de la glycémie durant l'exercice est possible à partir de l'équilibre entre la captation

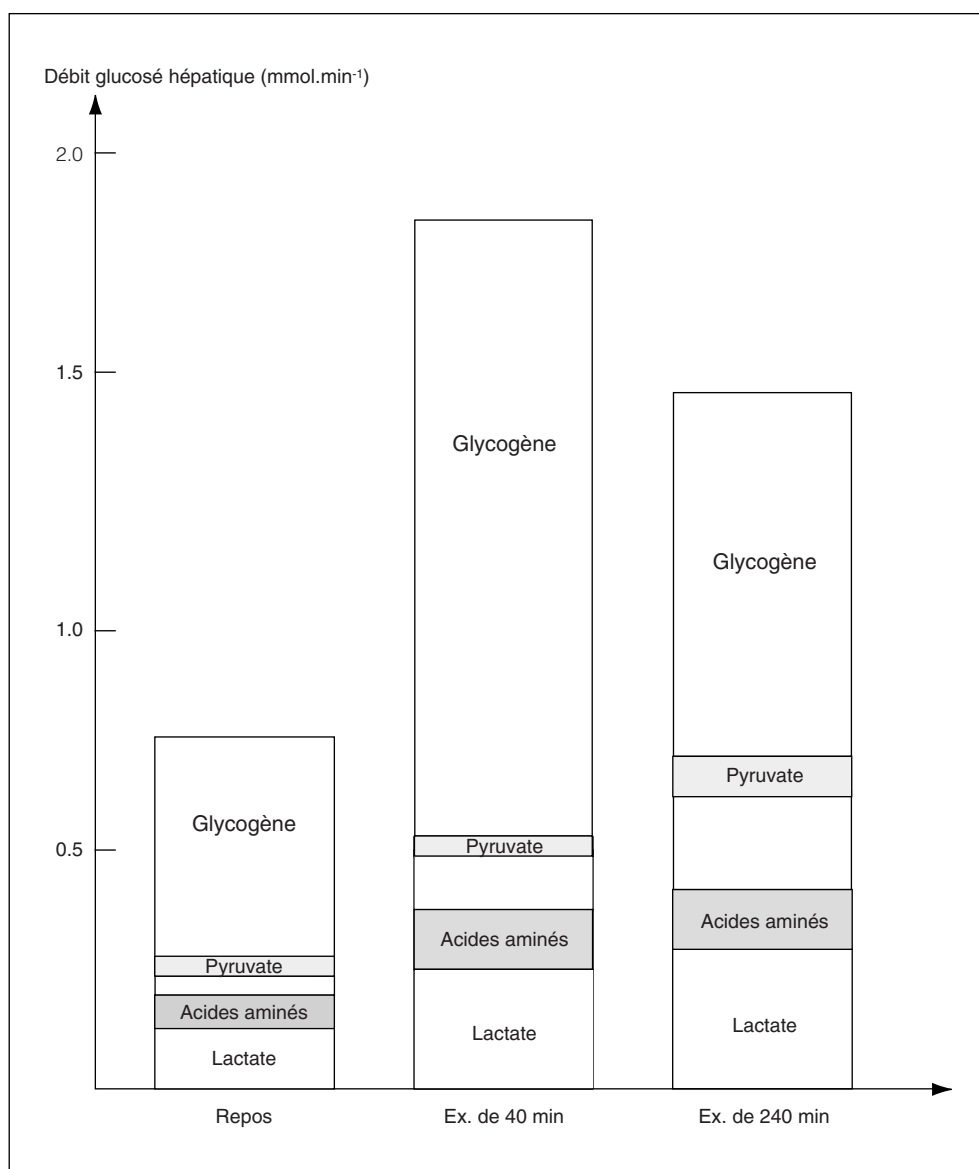


Figure 3.9

Débit glucosé hépatique au cours de l'exercice moyen de longue durée. La captation des précurseurs glucogéniques par le foie est exprimée en équivalents glucose (d'après Ahlborg et coll., 1974).

du glucose et sa libération provenant du glycogène. Il existe des relations étroites entre la libération du glucose hépatique et, d'une part, la charge de travail (durée et intensité) et, d'autre part, la captation de glucose au niveau des muscles en activité (Wahren et coll., 1971). Le foie représente donc une source glucosée importante lors de l'exercice. Lors de l'exercice intense (70-80 % de $\dot{V}O_2\text{max}$) la libération du glucose hépatique peut atteindre $0.7 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. C'est pourquoi, après 2 heures d'exercice à intensité élevée, la déplétion en glycogène est importante (mais pas totale). Lors de l'exercice modéré (30 % de $\dot{V}O_2\text{max}$) maintenu plusieurs heures, la gluconéogenèse hépatique augmente progressivement (Ahlborg et coll., 1974). Elle est triplée et proche de $100 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$. Cette production de glucose importante provient des principaux précurseurs que sont le lactate,

le glycérol et les acides aminés (figure 3.9). Ainsi, la gluconéogenèse a un rôle relativement important dans le maintien de la glycémie pour les exercices de longue durée.

5.2.3 Ingestion de glucose avant l'exercice

L'absorption orale de 30 g de glucose au repos apparaît dans le sang entre 5 à 7 min et présente un pic vers environ 30 min (Costill et coll., 1973b). La glycémie retourne à son état basal entre 60 à 75 min. Parallèlement, une hyper-insulinémie est observée. Lors de l'exercice, l'hyperglycémie et l'hyper-insulinémie entraînent une captation importante du glucose par les muscles en action. L'exercice intense associé à une absorption de glucose peut provoquer une hypoglycémie (Costill et coll., 1977 ; Foster et coll., 1979 ; Koivisto et

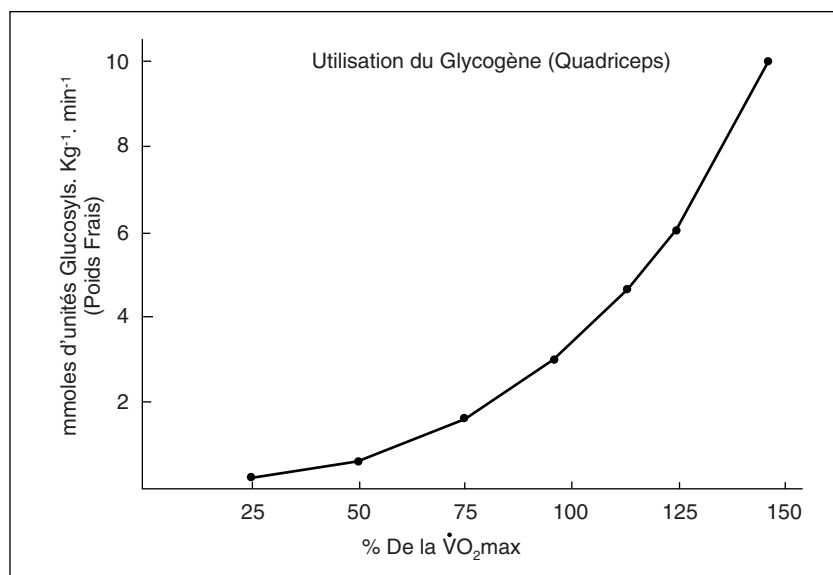
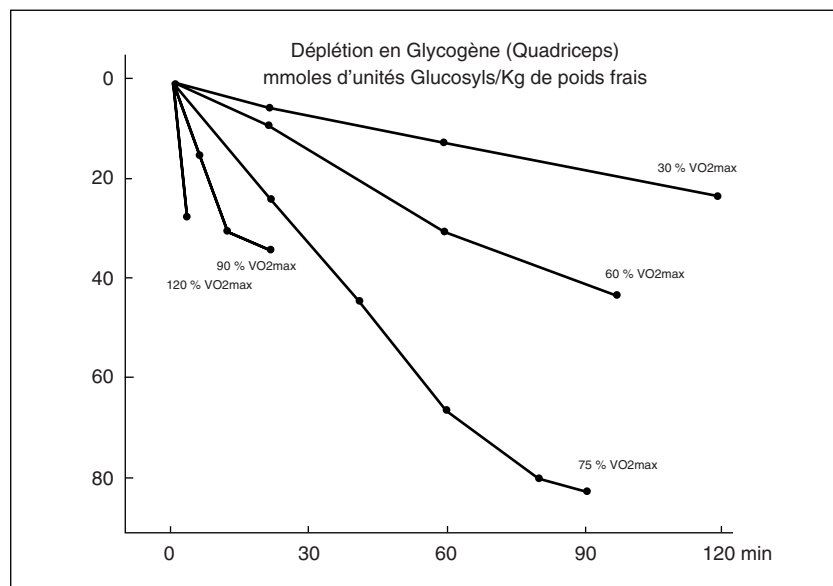


Figure 3.10

Consommation du glycogène musculaire (quadriceps) lors d'exercices d'intensité croissante sur cyclo-ergomètre (Saltin et Karlsson, 1971).

Figure 3.11

Déplétion en glycogène dans le quadriceps humain durant des exercices à différentes intensités. Les différentes charges (75, 90 et 120 % de $\dot{V}O_2\text{max}$) sont maintenues jusqu'à épuisement (Saltin et Karlsson, 1971).



coll., 1981). Cela induit automatiquement un état d'épuisement avancé et une diminution significative de l'intensité de l'exercice, voire l'arrêt complet. Ainsi, il est conseillé de ne pas ingérer de boisson fortement glucosée entre 1 heure et 2 heures précédant un exercice intense et prolongé.

En revanche, il apparaît que chez l'athlète bien entraîné, l'absorption de 75 g de fructose 45 min avant un exercice soutenu de 30 min (70 % de $\dot{V}O_2\text{max}$) entraîne une légère élévation de l'insulinémie qui permet de maintenir l'intensité de l'exercice sans la présence d'une hypoglycémie (Koivisto et coll., 1981). Comparée à une ingestion de glucose, elle induit parallèlement une moindre déplétion en glycogène

musculaire (Levine et coll., 1983). L'ingestion de 75 g de glucose ou de fructose avant un exercice d'intensité moyenne (55 % de $\dot{V}O_2\text{max}$) n'a aucun effet sur la déplétion en glycogène musculaire (Levine et coll., 1983).

Un repas riche en glucides (2 g.kg⁻¹ de poids corporel) pris 4 heures avant un exercice intense maintenu 1h45 (70 % de $\dot{V}O_2\text{max}$) entraîne une augmentation de 42 % du glycogène musculaire (dans le vaste externe) et une oxydation accrue de ce glycogène (+ 45 %) au cours de l'exercice (Coyle et coll., 1985). Il est donc important pour un athlète de bien s'alimenter en hydrates de carbone 4 heures avant de réaliser un exercice soutenu qui dure au moins 2 heures.

5.2.4 Ingestion de glucose pendant l'exercice

L'ingestion de glucose pendant l'exercice intense a peu d'effet sur la consommation du glycogène musculaire (Hultman, 1967). En revanche, lorsque l'intensité est moyenne (< 50 % $\dot{V}O_2\text{max}$), l'ingestion de glucose réduit la glycogénolyse musculaire (Hultman, 1967 ; Issekutz, 1981) et hépatique (Costill et coll., 1973b ; Issekutz, 1981). Quand l'exercice dure plusieurs heures, il est donc conseillé d'ingérer entre 25 à 30 g de glucose par heure par petites prises répétées d'une boisson glucosée pour stabiliser la glycémie et l'insulinémie (Lefebvre et coll., 1980). La plus grande partie de ce glucose exogène est complètement oxydée au niveau du muscle en activité.

L'idéal pour absorber 25 à 30 g de glucose par heure est de préparer une boisson appropriée à cet effet où le glucose est dilué. Pour permettre une évacuation stomacale rapide et prévenir parallèlement la déshydratation et l'hyperthermie, il convient de boire par petites quantités en moyenne 800 ml par heure de liquide glucosé. Sachant que l'évacuation gastrique est d'autant plus rapide que le liquide est froid (4-6 °C) et que la concentration en sucre est faible, une boisson contenant 2 à 2,5 g de glucose pour 100 ml constitue un bon compromis (Poortmans, 1988b).

5.2.5 Déplétion en glycogène musculaire en fonction de la charge de travail

La glycolyse musculaire augmente de manière exponentielle avec l'accroissement de l'intensité de l'exercice (Saltin et Karlsson, 1971). Il a été montré lors d'exercices d'intensité croissante réalisés sur cyclo-ergomètre que plus l'intensité de l'exercice augmente et plus les réserves de glycogène musculaire (quadriceps) diminuent rapidement (Saltin et Karlsson, 1971) (figure 3.10). La concentration en glycogène dans le quadriceps (vaste externe) chez l'homme est comprise entre 9,5 et 20 g.kg⁻¹ de muscle frais (moyenne à 14 g.kg⁻¹) (Hultman, 1967).

À charge constante, la déplétion en glycogène dépend de l'intensité et de la durée de l'exercice. Il a été montré (Saltin et Karlsson, 1971), en faisant

Conséquences pour le cycliste

Le métabolisme aérobie permet la fourniture d'énergie à partir de l'apport d'oxygène en constituant le principal système d'approvisionnement d'énergie pour les exercices d'endurance. L'ATP est fourni à partir des hydrates de carbone et des graisses. Durant l'exercice, le cycliste doit maintenir sa glycémie constante à partir de l'équilibre entre la captation du glucose et sa libération provenant du glycogène. Plus l'intensité de l'exercice augmente, plus la captation de glucose augmente de manière exponentielle. Ainsi, ce sont ses réserves de glycogènes, dépendantes de son niveau d'entraînement, qui vont lui permettre le maintien d'une certaine intensité d'exercice durant un certain temps. L'épuisement des stocks de glycogène conduit inévitablement à une chute dramatique du glucose et ainsi au phénomène bien connu d'hypoglycémie qui conduit le cycliste à se sentir vidé nerveusement. L'absorption de glucose mal maîtrisée avant et pendant l'exercice peut conduire à une hyper-insulinémie qui entraîne une hypoglycémie soudaine et rapide durant l'exercice.

pédaler des sportifs sur cyclo-ergomètre à différentes intensités jusqu'à épuisement, que lorsque la charge représente de 30 à 60 % de la PMA, la glycogénolyse est faible ou modérée (figure 3.11). Si l'intensité atteint 75 % de $\dot{V}O_2$ max, la déplétion en glycogène devient importante et le sujet doit arrêter son effort. En revanche, au-delà de 85 à 90 % de la PMA, l'arrêt par épuisement n'est jamais associé à une déplétion prononcée du glycogène musculaire.

5.2.6 Déplétion en glycogène musculaire en fonction du type de fibre

Chaque type de fibres musculaires (types I, IIa, IIb) peut travailler dans des conditions aérobie et anaérobies. Toutefois, chaque type présente une disposition particulière pour l'un ou l'autre

de ces métabolismes. Toutes les fibres musculaires ont le même contenu en glycogène. Des études ont montré la relation entre l'utilisation préférentielle du type de fibre musculaire et la déplétion en glycogène en fonction de la charge de travail (Costill et coll., 1973 ; Gollnick et coll., 1973 ; Essen, 1978 ; Thomson et coll., 1979 ; Vollestad et Blom 1985). L'exercice sous-maximal induit une déplétion en glycogène dans les fibres oxydatives (type I). Si l'intensité de l'exercice augmente, les fibres rapides viennent suppléer les fibres lentes en dégradant également une partie de leur glycogène. À l'épuisement, en endurance, la déplétion est importante dans toutes les fibres musculaires (figure 3.12).

Deux heures à 60 % de PMA entraîne une déplétion dramatique dans les fibres I, importante (– 60 %) dans les fibres IIa et faible (– 30 %) dans les IIb (Thomson et coll., 1979).

La déplétion glycogénique des IIb est supérieure à celle des IIa lors de l'exercice *supra*-max de 5 à 10 min. Les variations de la déplétion en glycogène musculaire dans les différentes fibres sont donc en relation directe avec le recrutement du nombre de fibres sollicitées par l'intensité croissante de l'exercice.

5.3 Métabolisme des lipides

5.3.1 Introduction

Parmi les lipides, seules les triglycérides permettent de délivrer de l'énergie. La majeure partie des triglycérides stockées dans l'organisme se trouve dans le tissu adipeux, le muscle et le foie. Toutefois, le foie ne constitue pas une réserve

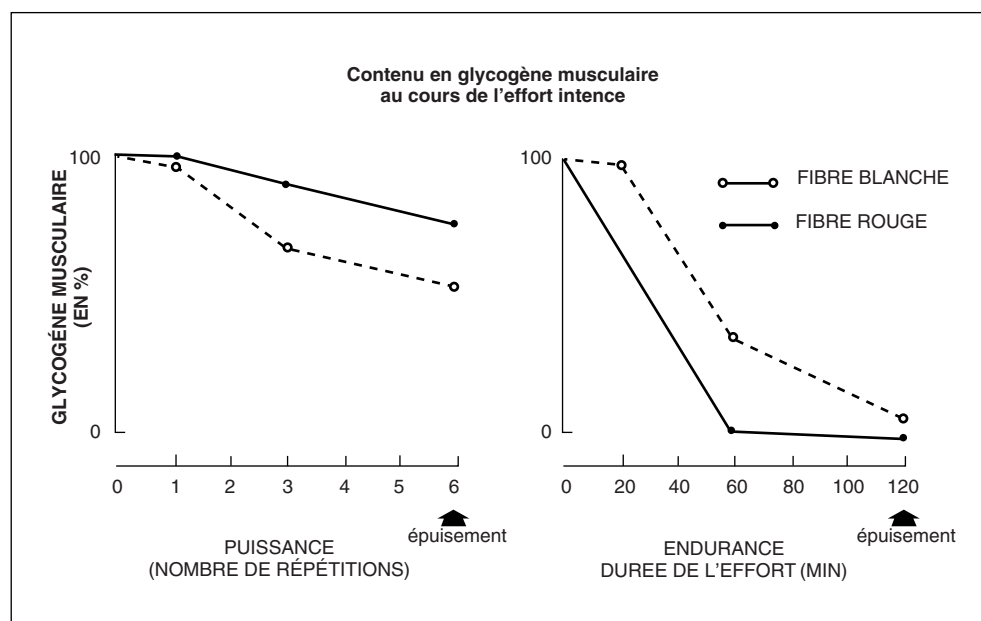
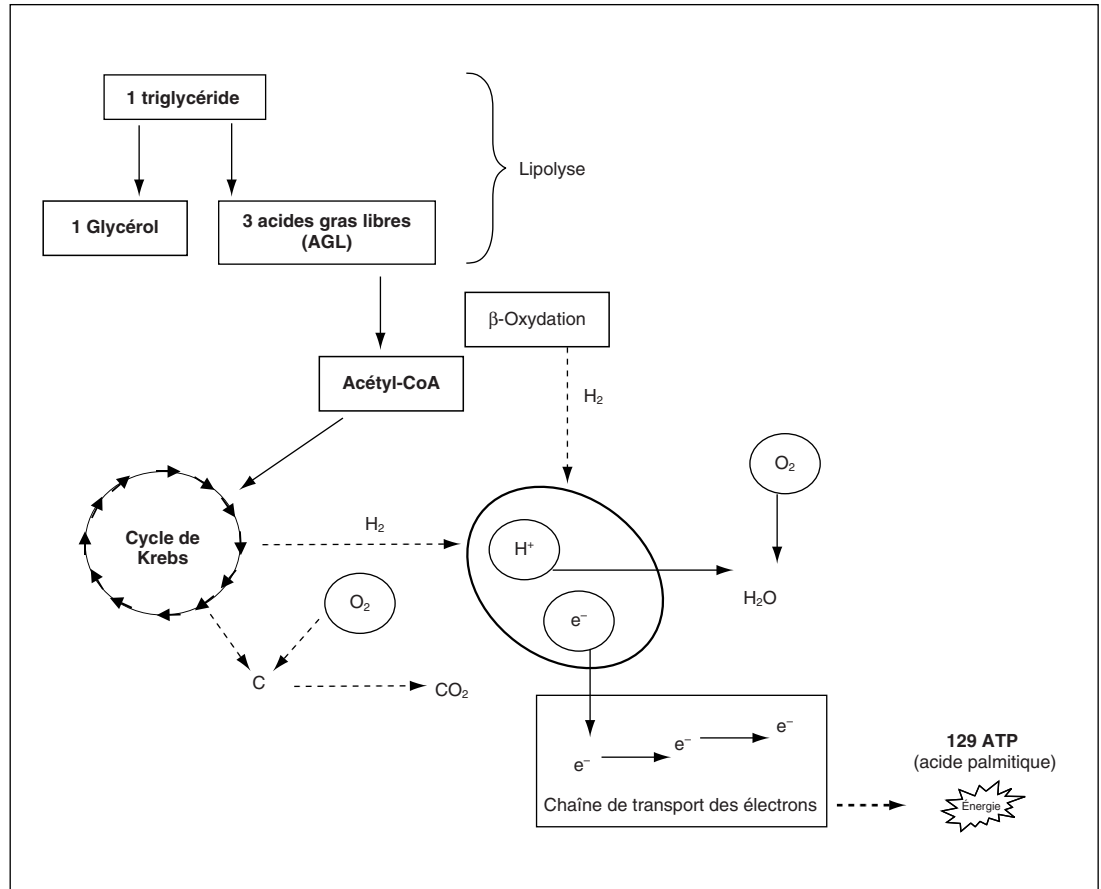


Figure 3.12

Déplétion en glycogène dans les différentes fibres du quadriceps humain, en fonction d'un exercice fractionné à puissance maximale et d'un exercice d'endurance conduits jusqu'à épuisement (Gollnick et coll., 1973).

Figure 3.13

Illustration du métabolisme des lipides.



lipidique mobilisable pour la contraction musculaire (Poortmans, 1988b). L'organisme humain dispose d'un réservoir de 10 à 12 kg de triglycérides. Pour être utilisables comme source d'énergie, une molécule de triglycéride doit être dégradée par la lipolyse (les enzymes lipases) en une molécule de glycérol et trois molécules d'acides gras libres (AGL, $C_{16}H_{32}O_2$). Les AGL libérés dans le muscle sont dégradés par des enzymes à l'intérieur des mitochondries. Ce processus d'oxydation des graisses au sein des mitochondries est la bêta-oxydation (β -oxydation). La β -oxydation des AGL donne de l'acétyl-CoA qui entre ensuite dans le cycle de Krebs pour y subir une série de dégradations (même processus que pour les hydrates de carbone). Ensuite, la chaîne de transport des électrons effectue le même processus que pour les hydrates de carbone pour fournir de l'ATP (figure 3.13).

Le métabolisme des graisses délivre davantage d'énergie que celui du glucose car la quantité d'acétyl-CoA issue du métabolisme lipidique est plus importante que celle issue du métabolisme glucidique. En d'autres termes, les lipides apportent plus de kcal par gramme que les glucides. En revanche, l'oxydation d'une mole d'acide gras nécessite une plus grande quantité d' O_2 par rapport à celle du glucose car elle contient plus d'atomes de carbone :

8,6 moles d' O_2 pour 1 mole d'acide gras et 6 moles d' O_2 pour 1 mole de glucose. Ainsi, une molécule d' O_2 permet de produire 5,6 ATP avec l'utilisation des graisses contre 6,3 ATP lors de l'utilisation des hydrates de carbone. L'oxydation de l'acide palmitique permet de fournir au total 129 ATP. En tout, les réserves en triglycérides du tissu adipeux et musculaire ne constituent pas un facteur limitant de la performance pour l'exercice en endurance sur-critique.

On peut considérer que les acides gras libres, les triglycérides, les corps cétoniques et le glycérol constituent l'ensemble des substrats énergétiques utilisables par les muscles en activité.

5.3.2 Utilisation des acides gras libres durant l'exercice

La teneur en AGL du plasma est comprise entre 0,4 et 0,6 mmol.l⁻¹. La réserve totale plasmatique avoisine les 12,5 mmoles, soit 3,5 g. Cela représente un équivalent énergétique suffisant pour maintenir un exercice à 70 % de la PMA pendant 4 min (Poortmans, 1988b). L'évolution de la teneur en AGL dépend du type d'exercice. Lors d'un exercice supérieur au seuil anaérobie, les AGL participent peu à la production d'énergie (Pernow et Wahren, 1962). En revanche, lorsque

l'exercice est modéré, la captation des AGL augmente avec la durée de celui-ci (Ahlborg et coll., 1974 ; Hagenfeldt et Wahren, 1971). Toutefois, la captation des AGL par le muscle diminue lorsque l'intensité de l'exercice augmente (Issekutz et coll., 1965 ; Jones et coll., 1980 ; Havel et coll., 1964 ; Green et coll., 1979). La comparaison entre un exercice continu et un exercice intermittent, de dépenses énergétiques égales, ne montre pas de différence de captation des AGL par les muscles en activité (Essen et coll., 1977).

Le tissu adipeux sollicité par l'exercice est étendu dans l'ensemble du corps et plus particulièrement réparti entre les faisceaux ou les masses musculaires. Il existe une mobilisation importante des AGL du tissu adipeux lors de l'exercice prolongé conduit jusqu'à épuisement. Toutefois, la quantité précise d'AGL mobilisés au niveau du tissu adipeux et utilisés par les muscles en activité reste difficile à apprécier.

5.3.3 Utilisation des triglycérides durant l'exercice

La teneur en triglycérides plasmatiques chez l'homme est en moyenne de 0,7 à 1,2 mmol.l⁻¹. Pour les exercices de courte durée, il n'y a pas de variations en triglycérides. En revanche, lors de l'exercice prolongé et intense, on observe une baisse significative pouvant atteindre les 50 % du taux initial (Carlson et Mossfeldt, 1964 ; Fröberg, 1969 ; Keul et coll., 1981 ; Liesen et coll., 1975). Toutefois, la contribution des triglycérides plasmatiques dans l'apport des AGL aux muscles actifs semble limitée (Poortmans, 1988b).

La teneur moyenne en triglycérides intramusculaires chez l'homme est de 8 à 12 nmol.kg⁻¹ de poids frais (Fröberg, 1969 ; Fröberg et Mossfeldt, 1971 ; Fröberg et coll., 1971 ; Morgen et coll., 1971 ; Essen et coll., 1977). Les fibres I contiennent trois fois plus de triglycérides que les fibres II (Essen, 1978). Les triglycérides intramusculaires sont principalement utilisés lors d'exercices de longue durée (Costill et coll., 1973 ; Essen, 1977). Des déplétions comprises entre 30 et 37 % ont été observées dans le muscle vaste externe. Les fibres I sont les plus touchées par la déplétion. Les fibres II conservent leurs réserves de triglycérides alors que les fibres intermédiaires (IIa) présentent une situation intermédiaire.

5.3.4 Utilisation du glycérol plasmatique durant l'exercice

La concentration sanguine moyenne en glycérol chez l'homme au repos est de 50 nmol.l⁻¹. Il ne constitue pas une source énergétique directe pour l'exercice musculaire. Lors de l'exercice relativement long (plusieurs heures), on observe une

augmentation constante du glycérol plasmatique (Havel et coll., 1964 ; Essen et coll., 1977 ; Ahlborg et coll., 1974 ; Wahren et coll., 1971) qui peut atteindre des valeurs de 600 nmol.l⁻¹ lors d'exercices de très longue durée (Keul et coll., 1981). Cela témoigne d'une lipolyse importante lors de l'exercice réalisé en endurance sur-critique.

5.3.5 Utilisation des corps cétoniques plasmatiques durant l'exercice

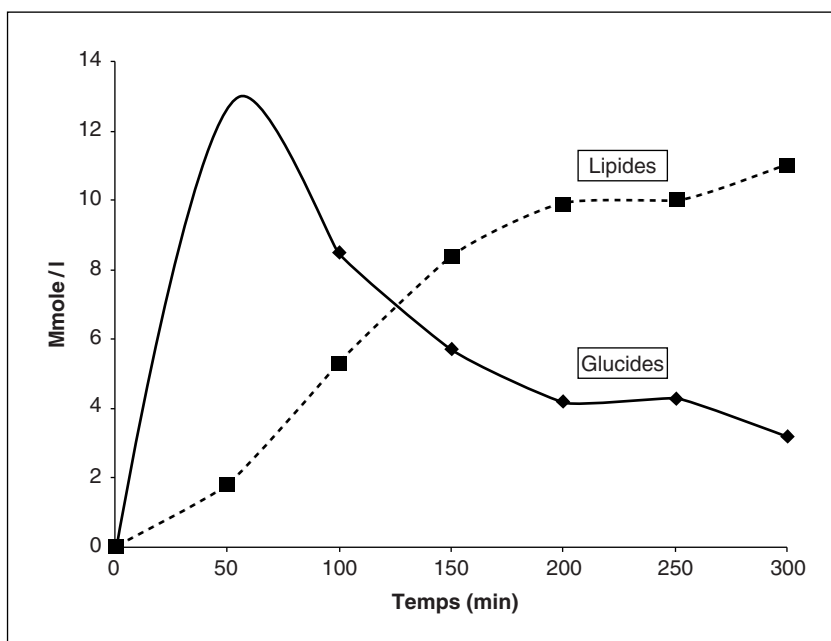
La teneur moyenne en corps cétoniques plasmatiques chez l'homme au repos est de 0,1 nmol.l⁻¹. Au repos, le muscle utilise peu de corps cétoniques. L'oxydation des corps cétoniques par les muscles en activité s'accroît lors de l'exercice mais elle reste négligeable (Keul et coll., 1972). Elle peut toutefois constituer un apport énergétique appréciable pour le tissu cérébral lorsque s'installe progressivement une hypoglycémie durant un exercice de longue durée.

5.3.6 Interrelations lipides-glucides au cours de l'exercice en endurance

Les résultats obtenus avec un athlète (figure 3.14) lors d'une course à vitesse constante sur tapis roulant pendant plusieurs heures (5 heures) montrent une diminution de plus en plus importante du métabolisme glucidique au cours du temps et une participation accrue du métabolisme lipidique (McGilvery, 1979). On observe également l'installation progressive d'une hypoglycémie qui passe de 5,6 mmol/l au début de l'exercice à 3,2 mmol/l en fin d'exercice au bout de 5 heures.

Figure 3.14

Distribution énergétique entre les lipides et les glucides lors d'un exercice d'endurance de longue durée réalisé à 60 % de la PMA (d'après les données de McGilvery, 1979).



Conséquences pour le cycliste

La plus grande partie des stocks de graisse du cycliste sont situés dans le tissu adipeux, le muscle et le foie. Le métabolisme des graisses permet de délivrer davantage d'énergie que celui du glucose mais il a besoin d'un apport en oxygène supérieur. En revanche, les réserves de graisses ne constituent pas un facteur limitant de la performance en endurance du cycliste qui a la possibilité de les utiliser sur une durée très longue. Plus l'exercice est de longue durée et plus il brûlera ses graisses réparties dans l'ensemble du corps, et plus particulièrement entre les faisceaux ou les masses musculaires. Ainsi, la perte de poids chez le cycliste passe obligatoirement par la mise en place de séances d'entraînement longues réalisées en endurance fondamentale.

Pour une demande énergétique constante, la consommation en oxygène augmente progressivement. Cela est dû à la β -oxydation des graisses qui nécessite davantage d'oxygène pour la synthèse en ATP comparé à la glycogénolyse. L'énergie dérivant des lipides passe de 12 % à la 50^e min d'exercice à 77 % en fin d'exercice.

Cette étude montre qu'au cours d'un exercice de longue durée en endurance réalisé à intensité moyenne (60 % PMA), l'oxydation des graisses prend une part importante à partir de 2 h 30 min d'exercice. Entre 3 h 30 min et 5 h d'exercice, l'oxydation des graisses est au niveau le plus élevé et reste relativement stable.

5.4 Métabolisme protéique

5.4.1 Introduction

Le système musculaire chez l'homme représente environ 45 % du poids corporel. Le contenu

en protéines d'un muscle comprend un cinquième de sa masse dont 65 % constituent les éléments contractiles. Les muscles peuvent contenir jusqu'à 80 % de l'ensemble des acides aminés libres du corps (Munro, 1970). Malgré l'utilisation préférentielle des hydrates de carbone et des acides gras lors des exercices en endurance, les protéines par l'intermédiaire des acides aminés sont également utilisées. Les acides aminés peuvent être convertis en glucose (gluconéogenèse) ou en composés intermédiaires du métabolisme oxydatif comme le pyruvate ou l'acétyl-CoA (figure 3.15). Le catabolisme des acides aminés libère de l'azote. Une partie de l'azote forme de nouveaux acides aminés. L'azote restant qui ne peut pas être oxydé est transformé en urée qui est ensuite excrétée par les urines. Cette transformation nécessite de l'énergie. L'évaluation du métabolisme protéique passe obligatoirement par la connaissance de la quantité d'azote éliminée par l'organisme.

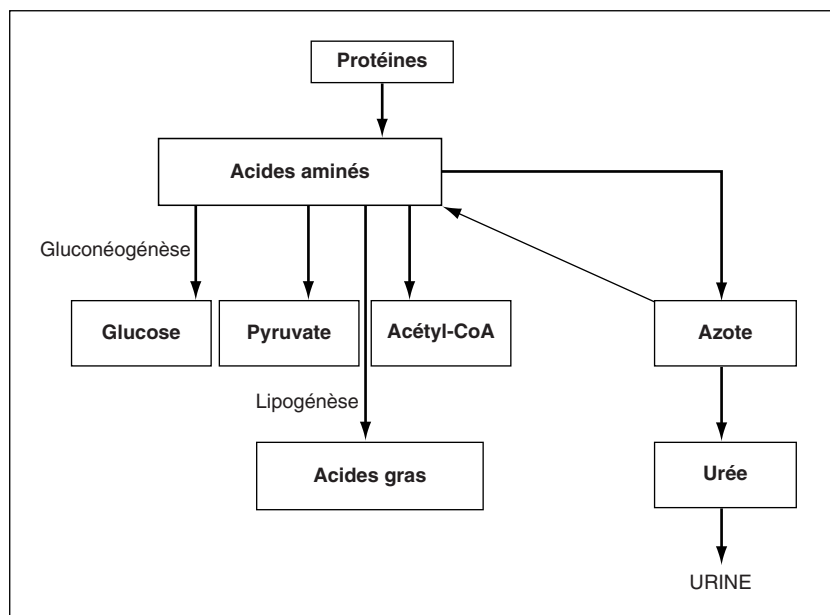
En dehors de leur rôle énergétique, les protéines et acides aminés jouent un rôle tampon important au sein du muscle et tendent à limiter les effets de l'acidose lactique (Poortmans, 1986).

5.4.2 Cycle glucose-alanine

Lors d'exercices dépassant les 60 min, on peut considérer que l'oxydation des protéines représente 3 à 15 % de la dépense totale en énergie (Poortmans, 1988b). L'exercice en endurance prolongé détermine une faible augmentation des acides aminés plasmatiques due essentiellement à l'alanine. Cela a permis de mettre en évidence l'existence d'un cycle glucose-alanine (Felig et Wahren, 1971). Au cours de l'exercice, la disponibilité accrue de pyruvate et la présence d'acides aminés dans le muscle augmentent la synthèse de l'alanine qui entre dans la circulation sanguine. Dans le foie, l'alanine se transforme en pyruvate. Ce dernier par gluconéogenèse se transforme en glucose qui repasse dans le compartiment sanguin et arrive au muscle. Lorsque l'exercice est modéré, l'alanine participe à la gluconéogenèse hépatique mais lorsqu'il devient intense, il diminue cette reconversion (Ahlborg et coll., 1974). Toutefois, le cycle glucose-alanine reste quantitativement négligeable dans la gluconéogenèse hépatique au cours de l'exercice. La participation de l'alanine dans la gluconéogenèse représente 6 % au repos, 4 % pendant l'exercice et 9 % durant la période de récupération, du total du débit glucosé hépatique (Wahren et coll., 1973). L'exercice intense et prolongé (supérieur à deux heures) induit une baisse des acides aminés plasmatiques au cours de l'effort. Il faut 24 heures de récupération pour avoir un retour à la normale des valeurs (Decombaz et coll., 1979 ; Refsum et coll., 1979).

Figure 3.15

Illustration du métabolisme protéique.



5.4.3 Production d'ammoniaque

La production d'ammoniaque rend compte avec celle de l'urée du catabolisme des protéines via leur concentration plasmatique et leur élimination rénale. L'élévation de la concentration sanguine en ammoniaque évolue exponentiellement en fonction de l'augmentation de l'intensité de l'exercice. La production accrue d'ammoniaque n'apparaît que lorsque l'intensité de l'exercice est proche de 70 à 80 % de la puissance maximale aérobie (Wilkerson et coll., 1977). Cela correspond à un effort voisin du seuil anaérobie (contre-la-montre). La production d'ammoniaque est à l'origine des fibres à métabolisme principalement glycolytique (type IIb) (Meyer et Terjung, 1979 ; Meyer et coll., 1980).

5.4.4 Production d'urée

Elle rend également compte du catabolisme des protéines (avec l'ammoniaque). Lorsque la durée d'un exercice intense est inférieure à une heure, la teneur en urée plasmatique reste relativement stable (Haralambie et Berg, 1976). En revanche, à partir d'une durée supérieure, la concentration en urée augmente linéairement en fonction du temps d'exercice (Haralambie et Berg, 1976 ; Refsum et coll., 1979 ; Decombaz et coll., 1979 ; Berg et Keul, 1981). La mesure de l'urée sudorale est nécessaire pour évaluer correctement le catabolisme protéique à l'effort.

5.4.5 Taux de renouvellement des protéines

Le taux de renouvellement des protéines musculaires (« turnover rate ») qui comprend la synthèse et le catabolisme des protéines, représente 26 à 50 % de l'ensemble des protéines du corps humain. La synthèse protéique dans le muscle est inhibée pendant l'exercice. L'exercice intense diminue la synthèse des protéines musculaires et accroît leur catabolisme. En revanche, dès l'arrêt de l'exercice, durant la phase de récupération, l'anabolisme

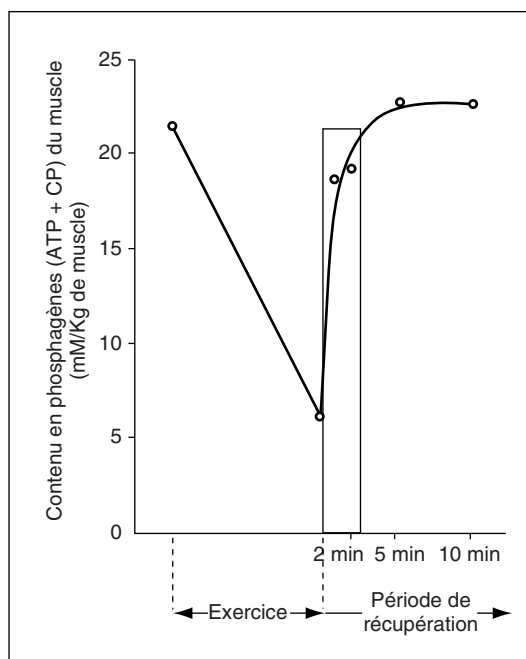


Figure 3.16

Resynthèse des phosphagènes (ATP-CP) après un exercice épuisant de 10 min sur bicyclette ergométrique (Hultman et coll., 1967).

du métabolisme des protéines apparaît. La synthèse post-exercice des protéines peut dépasser son taux de renouvellement de base pendant plusieurs heures (Rogers et coll., 1979 ; Wenger et coll., 1981 ; Rennie et coll., 1980).

6. Processus de récupération et resynthèse des réserves énergétiques au cours de la récupération

6.1 Resynthèse des phosphagènes (ATP-CP)

Les phosphagènes sont resynthétisés très rapidement pendant la période de récupération (figure 3.16), c'est-à-dire au cours des premières minutes qui suivent l'exercice (Harris et coll., 1976 ; Hultman et coll., 1967 ; Karlsson et coll., 1975 ; Karlsson et coll., 1975b ; Piiper et coll., 1968 ; Piiper and Spiller, 1970). Leur resynthèse atteint 70 % en 30 sec. Elle se termine dans un délai de 3 à 5 min (Hultman et coll., 1967). La resynthèse des phosphagènes est réalisée à partir du métabolisme aérobie qui fournit de l'énergie sous forme d'ATP.

La resynthèse de la CP seule suit une cinétique similaire à celle des phosphagènes (Harris et coll., 1976). Ainsi, 84 % de la CP est resynthétisée après 2 min de récupération (figure 3.17). Après 8 min, 97 % de la CP est resynthétisée.

Conséquences pour le cycliste

Malgré l'utilisation préférentielle des hydrates de carbone et des acides gras lors de l'exercice en endurance, les protéines sont également utilisées mais en très faible quantité. La dégradation des protéines par l'intermédiaire des acides aminés libère de l'azote. Une partie de l'azote forme de nouveaux acides aminés, le restant étant transformé en urée qui est ensuite excrétée par les urines. On retrouve généralement des taux d'urée assez élevés chez les cyclistes qui s'hydratent mal. Il faut donc que le cycliste pense toujours à bien s'hydrater durant l'exercice pour diminuer la production d'urée qui constitue un véritable déchet métabolique. La production d'ammoniaque rend compte également du catabolisme des protéines. Son élévation sanguine évolue exponentiellement en fonction de l'augmentation de l'intensité de l'exercice.

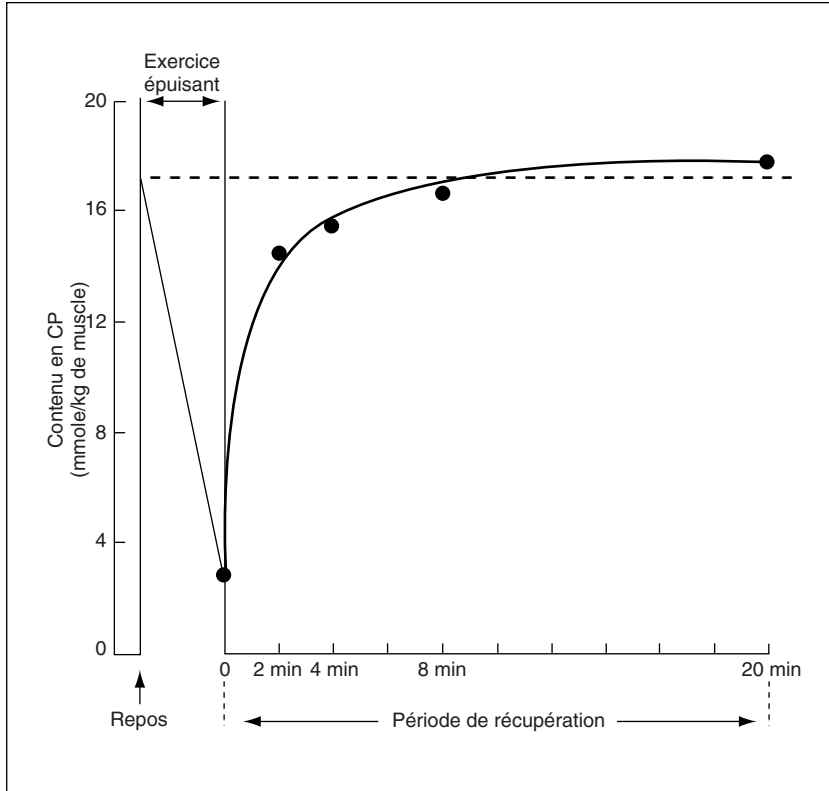
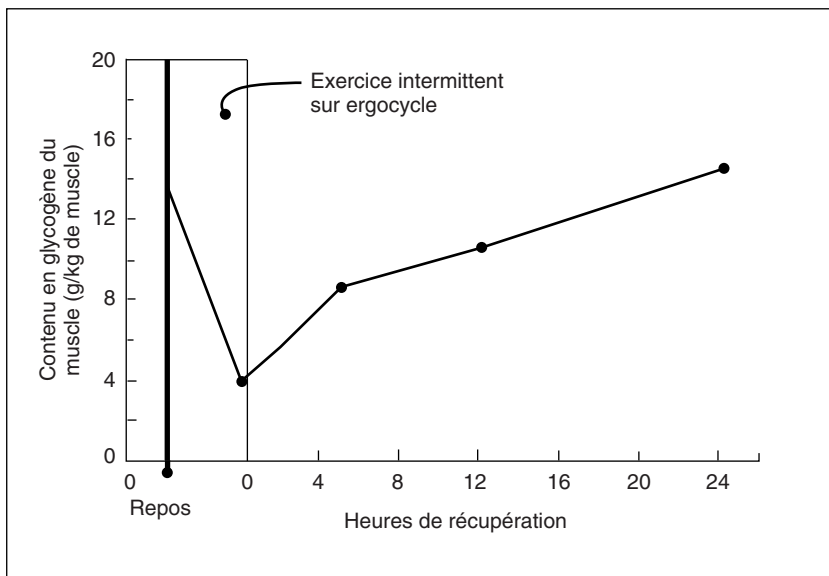


Figure 3.17

Resynthèse de la CP après un exercice épuisant (Harris et coll., 1976).

Figure 3.18

Resynthèse du glycogène musculaire après un fractionné (1 min à PMA suivi de 3 min de récupération) conduit jusqu'à épuisement (McDougall et coll., 1977).



Conséquences pour le cycliste

La resynthèse des phosphagènes (ATP + CP) est relativement rapide. En moyenne, après 2 min de récupération complète, près de 85 % des réserves sont resynthétisées. Cela implique que pour les séances d'entraînement ciblées force-vitesse (sprint), la récupération du cycliste doit durer au moins 2 à 3 min avant que l'exercice suivant ne reprenne. À savoir que malgré la resynthétisation rapide des réserves, il n'est pas possible d'enchaîner une multitude de sprints les uns derrière les autres. En effet, une fatigue nerveuse s'accumule rapidement entre les exercices. Elle a comme conséquences directes une diminution de la capacité de concentration du cycliste, une altération de la contraction musculaire et ainsi, une baisse de la performance. Il semble qu'une série de 4 à 6 sprints bien réalisés techniquement représente une séance idéale.

6.2 Resynthèse du glycogène musculaire

La resynthèse complète des réserves de glycogène musculaire peut prendre plusieurs jours. Elle dépend du type d'exercice qui a été réalisé et de l'alimentation durant la période de récupération (quantité de glucides consommés). La réplétion en glycogène musculaire peut apparaître pendant l'exercice modéré si un excès en glucose est disponible.

6.2.1 Exercices épuisants de courte durée

Une étude (McDougall et coll., 1977) conduite sur bicyclette ergométrique a proposé un exercice fractionné composé de 1 min d'exercice à PMA suivi de 3 min de repos jusqu'à épuisement. Les résultats de cette étude montrent que (figure 3.18) :

1. une grande partie des réserves de glycogène musculaire est resynthétisée pendant les quatre premières heures de récupération ;

Conséquences pour le cycliste

La resynthèse complète des réserves de glycogène musculaire peut prendre plusieurs jours. Elle dépend du type d'exercice qui a été réalisé et de l'alimentation durant la période de récupération. Pour les exercices épuisants de courte durée, une grande partie des réserves de glycogène musculaire est resynthétisée pendant les quatre premières heures de récupération, la resynthèse totale durant approximativement 24 h. En revanche, pour les exercices d'endurance conduisant à l'épuisement, les premières heures de récupération permettent de resynthétiser qu'une faible part des réserves, la resynthèse totale pouvant durer jusqu'à 48 h voir plus. Ces informations indiquent qu'il est important 1) de tenir compte des effets induits par les séances d'entraînement pour la programmation du processus d'entraînement et 2) d'avoir une alimentation adéquate après des séances d'entraînement intenses conduisant à l'épuisement.

- la resynthèse du glycogène musculaire est terminée après 24 h de récupération ;
- la cinétique de resynthèse du glycogène musculaire comprend une première phase rapide de resynthèse (jusqu'à 5 h de récupération) et une seconde phase plus lente (de 5 à 24 h de récupération). En effet, 53 % des réserves sont resynthétisées après 5 h de récupération.

La majeure partie du glucose ingéré après l'exercice est emmagasinée dans les muscles qui ont été actifs plutôt que dans le foie, comme à l'état basal de repos (Maehlum et coll., 1978). Les fibres IIa ont une vitesse de resynthèse du glycogène double comparée à celle des fibres IIb, alors que les fibres I ont des vitesses de resynthèse intermédiaires (Bergstrom et coll., 1972 ; Conlee et coll., 1978). La resynthèse du glycogène provient du glucose ingéré pendant la phase de récupération, du lactate, du glycérol et des acides aminés. Il apparaît que 20 % au plus du lactate présent à la fin de l'exercice est reconverti en glycogène durant la phase de récupération par l'intermédiaire du foie et du rein (Poortmans, 1988).

6.2.2 Exercices d'endurance

La resynthèse du glycogène musculaire après un effort intense et prolongé dépend étroitement du type d'alimentation et plus particulièrement des glucides ingérés (Conlee et coll., 1978 ; Maehlum et coll., 1978 ; Fell et coll., 1980). Suite à un exercice d'endurance épuisant, la resynthèse du glycogène musculaire durant la période de récupération suit une cinétique différente de celle observée après une exercice fractionné (Hultman et Bergström, 1967 ; Piehl, 1974). Les premières heures de récupération ne permettent de resynthétiser qu'une faible part des réserves (figure 3.19). En effet, environ 35 % des réserves sont resynthétisées après 5 heures de récupération avec une alimentation riche en glucide. C'est sur les dix premières heures de récupération que la resynthèse du glycogène musculaire est la plus rapide (60 % des réserves). Mais il faut encore 35 heures de récupération pour que la resynthèse soit complète. Ainsi, il faut environ deux jours de récupération (48 h) avec une alimentation riche en glucide pour arriver à une resynthèse complète des réserves de glycogène musculaire. La réplétion totale en glycogène apparaît simultanément dans les fibres I et II mais à une vitesse supérieure dans les fibres II.

Ces données indiquent qu'un exercice d'endurance difficile effectué tous les jours (cas d'une course par étapes) peut conduire à un épuisement

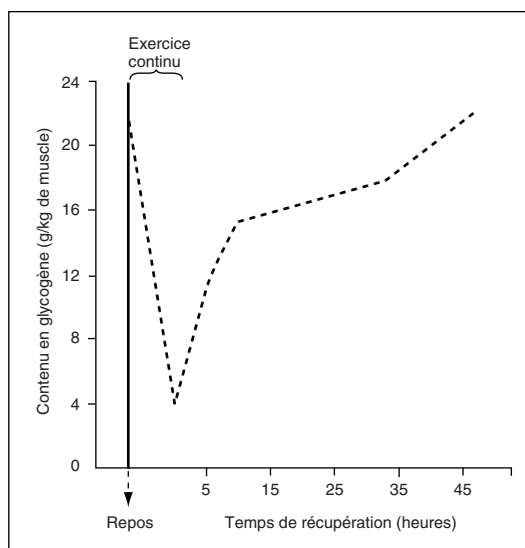


Figure 3.19

Resynthèse du glycogène musculaire après un exercice d'endurance épuisant (Hultman et Bergström, 1967 ; Piehl, 1974).

plus ou moins rapide des réserves de glycogène musculaire. Toutefois, il faut tenir compte des qualités de récupération inhérentes à chaque sujet qui peuvent déterminer de gros écarts de récupération. C'est d'ailleurs certainement la raison pour laquelle certains athlètes récupèrent mieux que d'autres sur des courses par étapes. Une étude conduite sur des coureurs à pieds (Costill et coll., 1971) qui effectuaient trois jours successifs de course à pieds sur une distance de 16 km, a montré que les réserves de glycogène musculaire étaient progressivement épuisées au bout du troisième jour et ce, malgré une alimentation normale.

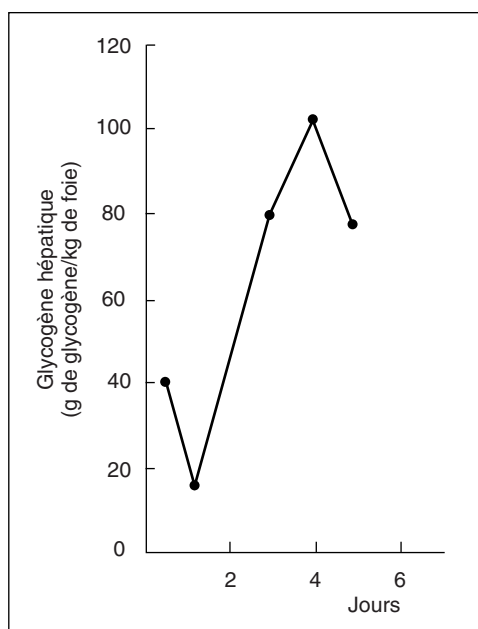
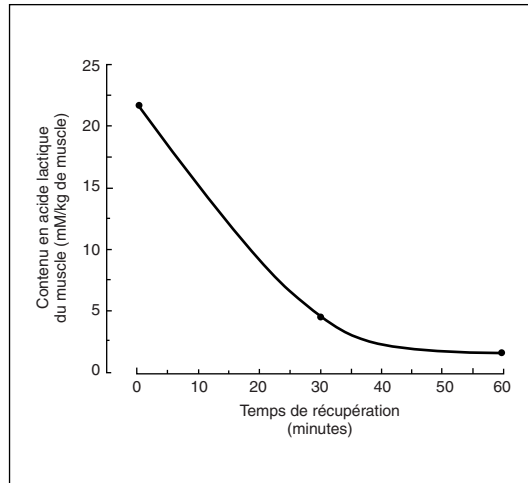


Figure 3.20

Resynthèse du glycogène hépatique après 1 heure d'exercice intense (Hultman et Nilsson, 1971).

Figure 3.21

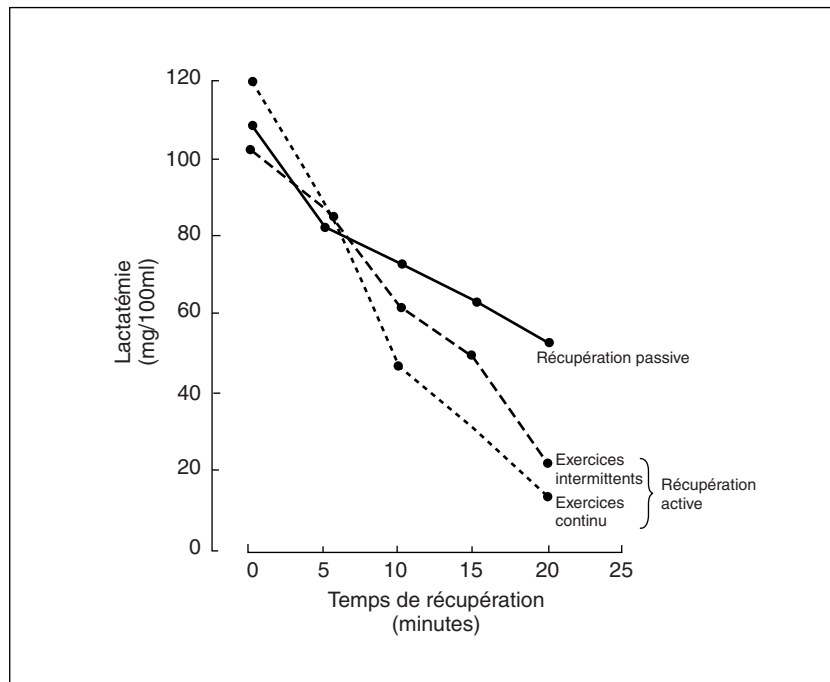
Cinétique d'élimination du lactate musculaire après un exercice fractionné [5 x (1' à 120 % PMA) + 5' repos] conduit jusqu'à épuisement (Karlsson et Saltin, 1971).



La resynthèse moins rapide du glycogène musculaire après un exercice d'endurance épuisant comparé à un exercice épuisant fractionné pourrait être due au fait que la resynthèse du glycogène dans les fibres lentes est moins rapide que dans les fibres rapides (Piehl, 1974). Or les fibres rapides sont davantage recrutées lors d'un exercice intermittent car la puissance développée est sur-critique lors de la phase d'exercice.

Figure 3.22

Cinétique d'élimination des lactates après un exercice jusqu'à épuisement au cours de trois types de récupération différentes (Bonen et Belcastro, 1976).



6.3 Resynthèse du glycogène hépatique

Lorsque l'intensité de l'exercice s'accroît, le glycogène hépatique constitue également une source d'énergie importante. Après 1 heure d'exercice intense, il diminue de manière importante (- 45 %) (Hultman et Nilsson, 1971) (figure 3.20). Après une alimentation correcte en glucide, une surcompensation est observée lors du premier jour de récupération. L'augmentation des réserves atteint un pic au cours de la deuxième journée pour atteindre 2,5 fois le niveau des réserves initiales. Ensuite, on observe une décroissance des effets de la surcompensation des réserves. Rappelons que le stockage du glycogène dans le foie et le muscle s'accompagne d'eau (2,7 g d'eau par gramme de glycogène).

6.4 Cinétique d'élimination du lactate musculaire

6.4.1 Avec une récupération passive

La cinétique de récupération du lactate au cours de la récupération passive a été étudiée après un exercice conduit jusqu'à épuisement (Karlsson et Saltin, 1971) comprenant cinq répétitions de 1 min d'exercice maximal (120 % PMA) suivi de 5 min de repos. Les lactates revenaient à leur valeur de repos après 1 heure de récupération (figure 3.21). On observe que la demi-vie d'élimination des lactates musculaires est d'environ 20 min. Ainsi, après 1 heure de récupération, une grande partie des lactates est éliminée. Lors d'un exercice inférieur au seuil anaérobie mais intense, l'élimination des lactates est plus rapide par le fait d'une moindre accumulation.

6.4.2 Avec une récupération active

La cinétique de récupération des lactates a été étudiée au cours de trois types de récupérations différentes (Bonen et Belcastro, 1976) avec des athlètes ayant parcouru 1,6 km jusqu'à épuisement (110 % PMA). Après 20 min de récupération, c'est à partir d'exercices intermittents et d'une course à intensité légère (récupération active) que l'élimination des lactates est la plus efficace (figure 3.22). Ainsi, après un exercice intense, la récupération active associée à un exercice effectué à intensité légère à moyenne permet une meilleure élimination des lactates (Belcastro et Bonen, 1975 ; Bonen et Belcastro, 1976 ; Bonen et coll., 1978 ; Gisolfi et coll., 1966 ; Hermansen et coll., 1975 ; Hermansen et Stensvold, 1972).

6.4.3 En fonction de l'intensité de l'exercice de récupération

L'intensité avec laquelle l'exercice est effectué durant la période de récupération est importante pour déterminer la vitesse à laquelle les lactates seront éliminés. Selon les données de Belcastro et Bonen (1975) rapportées sur des sujets sédentaires ayant effectué une récupération active sur bicyclette ergométrique, il apparaît que l'intensité d'exercice optimale permettant la plus grande élimination des lactates est entre 30 et 40 % de la $\dot{V}O_2\text{max}$ (figure 3.23). L'évolution de la cinétique d'élimination des lactates en fonction de l'intensité de l'exercice suit une courbe en forme de « U » inversé qui montre que si l'intensité de l'exercice est trop basse ou trop élevée, l'élimination des lactates est freinée.

Chez les athlètes entraînés, une intensité d'exercice située entre 50 et 65 % de la $\dot{V}O_2\text{max}$ permettrait une meilleure élimination des lactates (Gisolfi et coll., 1966 ; Hermansen et Stensvold, 1972). On peut en déduire que meilleur est le niveau d'entraînement des sujets, et plus l'intensité de l'exercice durant la période de récupération doit être importante pour éliminer rapidement les lactates.

6.4.4 Destinée du lactate pendant la récupération

Pendant la période de récupération à la suite d'un exercice anaérobie, on peut considérer que des fractions variables du lactate accumulé passent par la voie oxydative et par la voie de resynthèse en glycogène hépatique ou musculaire. Si pendant l'exercice anaérobie la quantité d'acide lactique accumulée est faible, sa destinée est de préférence l'oxydation. Par contre, si la quantité accumulée est importante et que la récupération

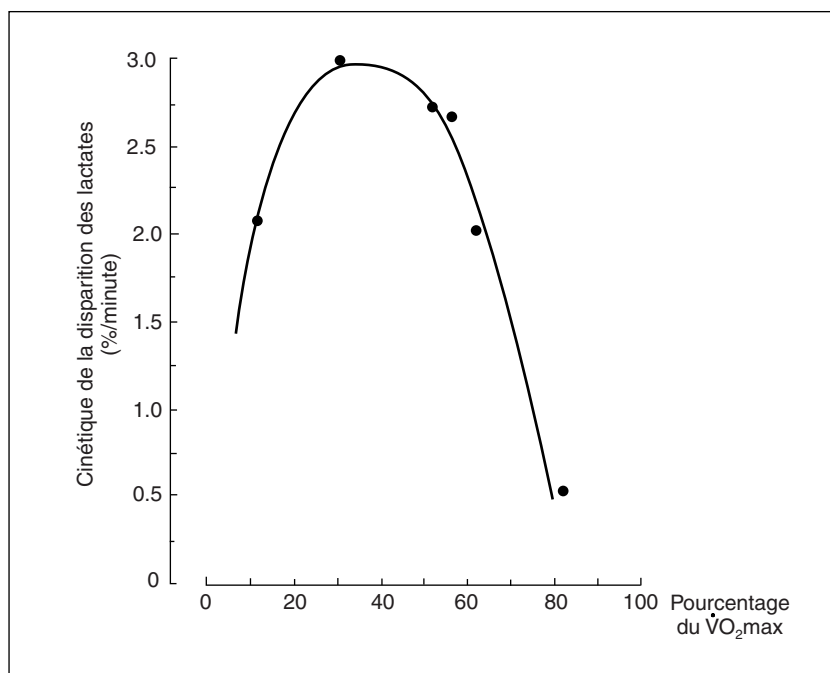


Figure 3.23

Cinétique d'élimination des lactates en fonction de l'intensité de l'exercice de récupération (d'après Belcastro et Bonen, 1975).

est effectuée au repos, une fraction importante de lactate est resynthétisée en glycogène. L'oxydation d'une mole de lactate demande la consommation de 3 moles d'oxygène (67 l). En revanche, sa resynthèse en glycogène ne demande que 0,5 mole d'oxygène (11 l). L'énergie libérée par l'oxydation du lactate peut être utilisée par l'organisme en substitution d'autres substrats comme le glucose et les lipides. Cependant, l'énergie nécessaire à la resynthèse du glycogène représente une charge métabolique supplémentaire imposée par la nécessité de resynthétiser du glycogène à partir du lactate.

Tableau 3.3

Durées minimales et maximales des périodes de récupération après un exercice conduit jusqu'à épuisement (Fox et Mathews, 1984).

Conséquences pour le cycliste

Après un exercice conduit jusqu'à épuisement, la moitié des lactates produits est éliminée en une vingtaine de minutes au cours d'une récupération passive. Il faut environ 1 h pour éliminer la totalité des lactates. La récupération active réalisée à partir d'un exercice modéré permet d'éliminer plus rapidement les lactates. Ainsi, pour des cyclistes entraînés, un exercice réalisé aux alentours de 60 % de la max s'avère adéquate. Lorsqu'en compétition, suite à un effort violent de type résistance le cycliste perçoit une élévation rapide des lactates au niveau des membres inférieurs, s'il en a la possibilité, il doit avoir le réflexe de penser à effectuer le plus rapidement possible un exercice soutenu pendant quelques minutes de manière à diminuer efficacement la concentration des lactates accumulés dans les muscles en action. Par exemple, après une montée longue et difficile, il est important qu'il pédale dans la descente. Il doit à tout prix éviter de faire toute la descente en roue libre.

Processus de récupération	Temps de récupération minimum	Temps de récupération maximum
Phosphagènes (ATP — CP)	2 min	5 min
Glycogène musculaire	10 h (après un ex. continu)	46 h
	5 h (après un ex. fractionné)	24 h
Glycogène hépatique	inconnu	12 – 24 h
Élimination des lactates	30 min (avec récup. active)	1 h
	1 h (avec récup. passive)	2 h

6.5 Durée des processus de récupération

Le tableau 3.3 résume les durées minimales et maximales des périodes de récupération après un exercice conduit jusqu'à épuisement (Fox et Mathews, 1984).

7. Zones d'intensité en fonction des voies métaboliques

La fourniture d'énergie durant l'exercice faisant appel à différentes voies métaboliques, il est possible de déterminer 7 zones d'intensité différentes utiles pour l'entraînement du cycliste (tableau 3.4). Les zones 1 et 2 réfèrent à l'exercice réalisé en endurance fondamentale. Selon la durée, les protéines peuvent être utilisées comme substrat énergétique (mais en très faible pourcentage). La zone 3 renvoie à ce qui est appelé le « seuil aérobie » où l'exercice est réalisé à une allure soutenue, ce qui entraîne une très légère production de lactates. La zone 4 correspond au seuil anaérobie, c'est-à-dire à l'intensité d'effort où il y a équilibre entre la production et l'élimination des lactates. Les hommes de terrain appellent encore cette zone la « zone rouge ». Tout exercice réalisé à une puissance supérieure à celle de cette zone engendre une production accrue des lactates et un temps d'effort relativement court (quelques minutes). La zone 5 correspond au dernier palier d'une épreuve d'effort classique incrémentée amenant le coureur jusqu'à épuisement (test de $\dot{V}O_2\text{max}$) permettant de déterminer la puissance maximale aérobie (PMA) ou encore la $\dot{V}O_2\text{max}$ ou la vitesse maximale aérobie (VMA). La zone 6 renvoie à un effort de

résistance pure durant lequel la production de lactates augmente très rapidement avec le temps et est maximale en fin d'effort. Le niveau de puissance est comparable à celui obtenu lors d'un test de Wingate sur 30 sec. La dernière zone d'intensité correspond à un exercice court (< 7 sec) réalisé à vitesse ou force maximale analogue à un test force-vitesse permettant d'estimer les propriétés mécaniques musculaires des membres en action.

Toutes ces zones d'intensité vont être très utiles pour la construction des séances d'entraînement et pour la gestion des ressources énergétiques du coureur en compétition. Le chapitre 3 donne la méthodologie pour permettre au coureur et à l'entraîneur de travailler rationnellement avec ces différentes zones d'intensité.

8. Conclusion

La connaissance du fonctionnement des différentes filières d'approvisionnement de l'énergie doit permettre au cycliste de mieux comprendre le fonctionnement de son propre corps durant l'exercice et après l'exercice, durant la période de récupération. Chaque intensité d'exercice requiert une certaine libération d'énergie qui renvoie à l'utilisation d'une filière énergétique dominante mais avec l'utilisation parallèle des autres filières à un niveau moins important. Ainsi, lors d'un entraînement ou d'une compétition, le cycliste passe la majorité de son temps à solliciter de manière plus ou moins importante certaines voies métaboliques. Les exercices de sprint, de résistance et d'endurance constituent les exercices types mobilisant les trois principales sources d'énergie métabolique, à savoir respectivement, les métabolismes anaérobie

Tableau 3.4

Détermination des différentes zones d'intensité utiles à l'entraînement en cyclisme à partir des différentes voies métaboliques. ↑ : taux d'utilisation ou de production.

Zones d'intensité	Exercices	Puissance des métabolismes	% PMA	Substrats	Produits de déchets
Zone 1	décontraction	aérobie ↑	30-50 %	lipides ↑↑↑ + glucides ↑ (+ protéines ↑)	CO ₂ + H ₂ O (+ azote + urée)
Zone 2	dans le peloton	aérobie ↑↑	50-60 %	lipides ↑↑ + glucides ↑↑ (+ protéines ↑)	CO ₂ + H ₂ O (+ azote + urée)
Zone 3	échappée	aérobie ↑↑↑ + anaérobie lactique ↑	60-75 %	lipides ↑ + glucides ↑↑↑	CO + H ₂ O + lactates ↑
Zone 4	contre-la-montre	aérobie ↑↑↑↑ + anaérobie lactique ↑↑ (seuil anaérobie)	75-85 %	glucides ↑↑↑	CO ₂ + H ₂ O + lactates ↑↑
Zone 5	poursuite piste	aérobie ↑↑↑↑↑ + anaérobie lactique ↑↑↑ (PMA)	85-100 %	glucides ↑↑↑↑	lactates ↑↑↑↑
Zone 6	Km piste	aérobie ↑ + anaérobie lactique ↑↑↑↑	100-180 %	glucides ↑↑↑↑↑	lactates ↑↑↑↑↑
Zone 7	sprint	anaérobie alactique ↑↑↑↑	180-300 %	ATP-CP	–

alactique, lactique et aérobie. Le métabolisme alactique a l'avantage de pouvoir produire une quantité d'énergie très importante mais sur un laps de temps relativement court. Le métabolisme lactique permet une libération d'énergie importante mais a l'inconvénient majeur de produire des lactates dans les muscles en action, ce qui limite la durée de l'exercice. Le métabolisme aérobie a l'énorme avantage de produire de l'énergie au muscle de façon pratiquement illimitée puisqu'il utilise en grande partie les graisses du cycliste. Toutefois, il ne permet de

faire que des exercices en endurance fondamentale. Le cycliste devra penser à s'alimenter correctement après une séance d'entraînement ou une compétition ayant conduit à l'épuisement pour refaire le plus rapidement possible ses réserves de glycogène musculaire et hépatique. Il doit également essayer de récupérer le mieux possible suite à un effort en résistance ayant entraîné une augmentation des lactates en effectuant un exercice relativement soutenu sur une certaine durée afin de diminuer rapidement les lactates accumulés.

Bibliographie

1. Ahlborg G, Felig P, Hagenfeldt L, Hendler R, Wahren J. Substrate turnover during prolonged exercise in man. Splanchnic and leg metabolism of glucose, free fatty acids and amino acids. *J Clin Invest*, 53 : 1080-1090, 1974.
2. Belcastro AN, Bonen A. Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *J Appl Physiol*, 39(6) : 932-936, 1975.
3. Berg A, Keul J. Physiological and metabolic responses of female athletes during laboratory and field exercise. In: J Borms, M Hebbelink, A Venerando (Eds), *Women and sport*, Basel, S Karger, p. 77-96, 1981.
4. Bergstrom J, Hultman E, Rochnorlund AE. Muscle glycogen synthetase in normal subjects. Basal values, effects of glycogen depletion by exercise and of a carbohydrate-rich diet following exercise. *Scand J Clin Lab Invest*, 29 : 231-236, 1972.
5. Bonen A, Belcastro AN. Comparison of self-selected recovery methods on lactic acid removal rates. *Med Sci Sports*, 8(3) : 176-178, 1976.
6. Bonen A, Campbell CJ, Kirby RL, Belcastro AN. Relationship between slow-twitch muscles fibers and lactic acid removal. *Can J Appl Sport Sci*, 3 : 160-162, 1978.
7. Brooks GA, Fahey TD. Lactic acid turnover during exercise (production versus removal) in Brooks GA, Fahey TD. *Exercise physiology. Human Bioenergetics and Its Applications*. (édit. Wiley J. & Sons) : 202-203, 1984.
8. Brooks GA et coll. Role of mitochondrial lactate dehydrogenase and lactate oxidation in the intracellular lactate shuttle. *Proc Natl Acad Sci. USA* 96, 1129-1134, 1999.
9. Brooks GA. Intra- and extra-cellular lactate shuttles. *Med Sci Sports Exerc*, Vol. 32, 4 : 790-799, 2000.
10. Carlson LA, Mossfeldt F. Acute effect of prolonged heavy exercise on the concentration of plasma lipids and lipoproteins in man. *Acta Physiol Scand*, 62 : 51-59, 1964.
11. Christensen EH. Beiträge zur physiologie schwerer körperlicher arbeit. I. Der blutzucker während und nach körperlicher arbeit. *Arbeitsphysiol*, 4 : 128, 1931.
12. Conlee RK, Hickson RC, Winder WW, Hagberg JM, Holloszy JO. Regulation of glycogen resynthesis in muscles of rats following exercise. *Am J Physiol*, 235 : 145-150, 1978.
13. Costill DL, Bowers RW, Branam G, Sparks K. Muscle glycogen utilization during prolonged exercise on successive days. *J Appl Physiol*, 31 : 834-838, 1971.
14. Costill DL, Gollnick PD, Jansson ED, Saltin B, Stein EM. Glycogen depletion pattern in human muscle fibres during distance running. *Acta Physiol Scand*, 89 : 374-383, 1973.
15. Costill DL, Bennet A, Branam G, Eddy D. Glucose ingestion at rest and during prolonged exercise. *J Appl Physiol*, 34 : 764-769, 1973b.
16. Costill DL, Coyle E, Dalsky G, Evans W, Fink W, Hoopes D. Effects of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise. *J Appl Physiol*, 43 : 695-699, 1977.
17. Coyle EF, Coggan AR, Hemmert MK, Lowe RC, Walters TJ. Substrate usage during prolonged exercise following a preexercise meal. *J Appl Physiol*, 59 : 429-43, 1985.
18. Decombaz J, Reinhardt P, Anantharaman K, Von Glutz G, Poortmans J. Biochemical changes in a 100 km run. Free amino acids, urea and creatine. *Eur J Appl Physiol*, 41 : 61-72, 1979.
19. Essen B, Hagenfeldt L, Kaijser L. Utilization of blood-borne and intramuscular substrates during continuous and intermittent exercise in man. *J Physiol*, 265 : 489-506, 1977.
20. Essen B. Intramuscular substrate utilization during prolonged exercise. *Ann NY Acad Sci, J Physiol*, 301 : 30-44, 1977.

21. Essen B. Studies on the regulation of metabolism in human skeletal muscle using intermittent exercise as an experimental model. *Acta Physio Scand*, suppl. 454 : 1-64, 1978.
22. Felig P, Wahren J. Amino acid metabolism in exercising man. *J Clin Invest*, 50 : 2703-2714, 1971.
23. Fell RD, McLane JA, Winder WW, Holloszy JO. Preferential resynthesis of muscle glycogen in fasting rats after exhaustive exercise. *Am J Physiol*, 238 : 328-332, 1980.
24. Foster C, Costill DL, Fink WJ. Effects of preexercise feedings on endurance performance. *Med Sci Sports Exerc*, 11 : 1-5, 1979.
25. Fox EL, Mathews DK. *Bases physiologiques de l'activité physique*. Paris, Ed. Vigot, 1984.
26. Fröberg SO. Metabolism of lipids in blood and tissues during exercise. In J Poortmans (Ed.), *Biochemistry of exercise*, Basel, S Karger, p. 100-113, 1969.
27. Fröberg SO, Mossfeldt F. Effect of prolonged strenuous exercise on the concentration of triglycerides, phospholipids and glycogen in muscles of man. *Acta Physiol Scand*, 82 : 167-171, 1971.
28. Fröberg SO, Carlson LA, Ekelund LG. Local lipid stores and exercise. In, B Pernow, B Saltin (Eds), *Muscle metabolism during exercise*, New York, Plenum Press, p. 307-313, 1971.
29. Gisolfi C, Robinson S, Turrell ES. Effects of aerobic work performed during recovery from exhaustive work. *J Appl Physiol*, 21 : 1767-1772, 1966.
30. Gollnick PD, Armstrong RB, Sembrowich WL, Shepherd RE, Saltin B. Glycogen depletion pattern in human skeletal muscle fibers after heavy exercise. *J Appl Physiol*, 34 : 615-618, 1973.
31. Green HJ, Houston ME, Thomson JA, Sutton JR, Gollnick P. Metabolic consequences of supramaximal arm work performed during prolonged submaximal leg work. *J Appl Physiol*, 46 : 249-255, 1979.
32. Hagenfeldt L, Wahren J. Metabolism of free fatty acids and ketone bodies in skeletal muscle. In B Pernow, B Saltin (Eds), *Muscle metabolism during exercise*. New York, Plenum Press, p. 153-163, 1971.
33. Haralambie G, Berg A. Serum urea and amino nitrogen changes with exercise duration. *Eur J Appl Physiol*, 36 : 39-48, 1976.
34. Harris RC, Edwards RHT, Hultman E, Nordesjö LO, Nylinde B, Saltin K. The time course of phosphoryl-creatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflügers Arch*, 367 : 147-142, 1976.
35. Havel RJ, Carlson LA, Ekelund LG, Holmgren A. Turnover rate and oxidation of different free fatty acids in man during exercise. *J Appl Physiol*, 19 : 613-618, 1964.
36. Hermansen L, Stensvold I. Production and removal of lactate during exercise in man. *Acta Physiol Scand*, 86 : 191-201, 1972.
37. Hermansen L, Maehlum S, Pruett EDR, Vaage O, Waldum H, Wessel-Aas T. Lactate removal at rest and during exercise. In Howald H and Poortmans JR (Eds) : *Metabolic adaptation to prolonged physical exercise*. Basel, Switzerland, Birkhäuser Verlag, pp. 101-105, 1975.
38. Hultman E. Regulation of carbohydrate metabolism in the liver during rest and exercise with special reference to diet. In : F Landry, W Orban (Eds), *3rd International Symposium on Biochemistry of Exercise*, Miami, Symposia Specialists, p. 99-126, 1978.
39. Hultman E. Studies on muscle metabolism of glycogen and active phosphate in man with special reference to exercise and diet. *Scand J Clin Lab Invest*, 19, suppl., 94 : 1-63, 1967.
40. Hultman E, Bergström J, McLennan NA. Breakdown and resynthesis of phosphoryl-creatine and adenosine triphosphate in connection with muscular work in man. *Scand J Clin Lab Invest*, 19 : 56-66, 1967.
41. Hultman E, Bergström J. Muscle glycogen synthesis in relation to diet studied in normal subjects. *Acta Med Scand*, 182 : 109-117, 1967.
42. Hultman E, Nilsson LH. Liver glycogen in man : effect of different diets and muscular exercise. In Pernow B and Saltin B (Eds.) : *Muscle metabolism during exercise*. New York, Plenum Press, 143-151, 1971.
43. Issekutz BJ, Miller HI, Paul P, Rodahl K. Aerobic work capacity and plasma NEFA turnover. *J Appl Physiol*, 20 : 293-296, 1965.
44. Issekutz BJ. Effects of glucose infusion on hepatic and muscle glycogenolysis in exercising dogs. *Am J Physiol*, 240 : 451-457, 1981.
45. Jones NL, Heigenhauser GJF, Kuksis A, Matsos CG, Sutton JR, Toews CJ. Fat metabolism in heavy exercise. *Clin Sci*, 59 : 469-478, 1980.
46. Karlsson J, Saltin B. Oxygen deficit and muscles metabolites in intermittent exercise. *Acta Physiol Scand*, 82 : 115-122, 1971.

47. Karlsson J, Bonde-Petersen F, Hendriksson J, Knuttgen HG. Effects of previous exercise with arms or legs on metabolism and performance in exhaustive exercise. *J Appl Physiol*, 38 : 763-767, 1975.
48. Karlsson J, Funderburk CF, Essen B, Lind A. Constituents of human muscles in isometric fatigue. *J Appl Physiol*, 38 : 208-211, 1975b.
49. Keul J, Doll E, Keppler D. *Energy metabolism in human muscle*. Basel, S Karger, p. 174-182, 1972.
50. Keul J, Kohler B, Von Glutz G, Lüthi U, Berg A, Howald H. Biochemical changes in a 100 km run : carbohydrates, lipids and hormones in serum. *Eur J Appl Physiol*, 47 : 181-189, 1981.
51. Koivisto VA, Karonen SL, Nikkilä EA. Carbohydrate ingestion before exercise. Comparison of glucose, fructose, or placebo. *J Appl Physiol*, 51 : 783-787, 1981.
52. Lefebvre P, Luyckx A, Krzentowski G, Pirnay F, Lacroix M, Morosa F, Pallikarakis N. Le glucose : substrat énergétique au cours de l'exercice musculaire prolongé. In JR Lacour (Ed.), *Place de l'alimentation dans la préparation biologique à la compétition*, Saint-Etienne, P Guichard, p. 49-57, 1980.
53. Levine L, Evans WJ, Cadarette BS, Fisher EC, Bullen A. Fructose and glucose ingestion and muscle glycogen use during submaximal exercise. *J Appl Physiol*, 55 : 1767-1771, 1983.
54. Liesen H, Korsten H, Hollman W. Effects of a marathon race on blood lipid constituents in younger and older athletes. In H Howald, J Poortmans (Eds), *Metabolic adaptations to prolonged physical exercise*, Basel, Birkhäuser, p. 194-200, 1975.
55. McDougall JD, Ward GR, Sale DG, Sutton JR. Muscle glycogen repletion after high-intensity intermittent exercise. *J Appl Physiol*, 42 : 129-132, 1977.
56. McGilvery RW. Biochemistry. *A functional approach*. London, Saunders Co, p. 702-70, 1979.
57. Maehlum S, Felig P, Wahren J. Splanchnic glucose and muscle glycogen metabolism after glucose feeding during post-exercise recovery. *Am J Physiol*, 235 : 255-260, 1978.
58. Meyer RA, Terjung RL. Differences in ammonia and adenylate metabolism in contracting fast and slow muscle. *Am J Physiol*, 237 : 111-118, 1979.
59. Meyer RA, Dudley GA, Terjung RL. Ammonia and IMP in different skeletal muscle fibers after exercise in rats. *J Appl Physiol*, 49 : 1037-1041, 1980.
60. Morgen TE, Cobb LA, Short FA, Ross R, Gunn DR. Effects of long-term exercise on human muscle mitochondria. In B Pernow, B Saltin (Eds), *Muscle metabolism during exercise*, New York, Plenum press, p. 87-95, 1971.
61. Munro HN. Free amino acid pool and their role in regulation. In, HN Munro (Ed.), *Mammalian protein metabolism*, vol. 4, New York, Academic Press, p. 299-386, 1970.
62. Pernow B, Wahren J. Lactate and pyruvate formation and oxygen utilization in the human forearm muscles during work of high intensity an varying duration. *Acta Physiol Scand*, 56 : 267-285, 1962.
63. Piehl K. Time course for refilling of glycogen stores in human muscles fibres following exercise-induced glycogen depletion. *Acta Physiol Scand*, 90 : 297-302, 1974.
64. Piiper J, DiPrampo PE, Cerritelli P. Oxygen debt and high-energy phosphates in gastrocnemius muscle of the dog. *Am J Physiol*, 215 : 523-531, 1968.
65. Piiper J, Spiller P. Repayment of O₂ debt and resynthesis of high energy phosphates in gastrocnemius muscle of the dog. *J Appl Physiol*, 28 : 657-662, 1970.
66. Poortmans J. Use and usefulness of amino acids and related substances during physical exercise. In, G Bnezi (Ed.), *Problems in the biochemistry of physical exercise and training*, Amsterdam, Elsevier, 1986.
67. Poortmans J. Aspect quantitatif de la dépense énergétique. In Rieu M, *Bioénergétique de l'exercice musculaire et de l'entraînement physique*, Paris, PUF, p. 141-145, 1988.
68. Poortmans J. Métabolismes aérobie. In Rieu M, *Bioénergétique de l'exercice musculaire et de l'entraînement physique*, Paris, PUF, p. 146-217, 1988b.
69. Refsum HE, Ghessing LR, Strømme SB. Changes in plasma amino acid distribution and urine amino acids excretion during prolonged heavy exercise. *Scand J Clin Lab Invest*, 39 : 407-413, 1979.
70. Reichard GA, Issekutz BJ, Kimbel P, Putnam RC, Hochella NJ, Weinhouse S. Blood glucose metabolism in man during muscular work. *J Appl Physiol*, 16 : 1001, 1961.
71. Rennie MJ, Edwards RHT, Davies M, Kryawych S, Halliday D, Waterlow JC, Millward DJ. Protein and amino acid turnover during and after exercise. *Biochem Soc Trans*, 8 : 499-501, 1980.
72. Rogers PA, Jones GH, Faulkner JA. Protein synthesis in skeletal muscle following acute exhaustive exercise. *Muscle and nerve*, 2 : 250-256, 1979.
73. Saltin B, Karlsson J. Muscle glycogen utilization during work of different intensities. In B Pernow, B Saltin (Eds), *Muscle metabolism during exercise*, New York, Plenum Press, p. 289-299, 1971.

74. Thomson JA, Green HJ, Houston ME. Muscle glycogen depletion pattern in fast twitch fibre subgroups of man during submaximal and supramaximal exercise. *Pflügers Arch*, 379 : 105-108, 1979.
75. Vollestad NK, Blom PCS. Effect of varying exercise intensity on glycogen depletion in human muscle fibres. *Acta Physiol Scand*, 125 : 395-405, 1985.
76. Wahren J, Felig P, Ahlborg G, Jorfeldt L. Glucose metabolism during leg exercise in man. *J Clin Invest*, 50 : 2715-2725, 1971.
77. Wahren J, Felig P, Hendler R, Ahlborg G. Glucose and amino acid metabolism during recovery after exercise. *J Appl Physiol*, 34 : 838-845, 1973.
78. Wahren J, Felig P, Hagenfeldt L, Hendler R, Ahlborg G. Splanchnic and leg metabolism of glucose, free fatty acids and amino acids during prolonged exercise in man. In, H Howald, J Poortmans (Eds), *Metabolic adaptation to prolonged exercise in man*. Basel, S Karger, p. 144-153, 1975.
79. Wahren J. Glucose turnover during exercise in man. *Ann NY Aca Sci*, 301 : 45-55, 1977.
80. Wenger HA, Wilkinson JG, Dallaire J, Nihei T. Uptake of ³H-leucine into different fractions of rat skeletal muscle following acute endurance and sprint endurance. *Eur J Appl Physiol*, 47 : 83-92, 1981.
81. Wilkerson JE, Batterton DL, Horvath SM. Exercise-induced changes in blood ammonia levels in humans. *Eur J Appl Physiol*, 37 : 255-263, 1977.
82. Wilmore JH, Costill DL. *Physiologie du sport et de l'exercice physique*. Paris, De Boeck Université, 550 p., 1998.

Utilisation de la perception de l'effort comme outil d'estimation de l'intensité de l'exercice

Frédéric GRAPPE

4

Sommaire

1. L'évaluation perceptive de l'exercice
2. Échelle d'Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice (échelle d'ESIE)
3. Utilisation de l'échelle d'ESIE pour l'entraînement
4. Conclusion

Utiliser le corps humain comme instrument de mesure

Lorsqu'un cycliste effectue une sortie d'entraînement ou une compétition, il est important qu'il sache à quelle intensité d'exercice il travaille s'il souhaite optimiser la gestion de ses ressources énergétiques et donner une orientation rationnelle à la séance. Pour ce faire, la méthode la plus utilisée est celle qui consiste à utiliser la fréquence cardiaque comme témoin de l'intensité de l'exercice. La méthode est simple, efficace, utilisable en routine mais n'en demeure pas moins aléatoire. En effet, la fréquence cardiaque est une variable biologique interne à l'organisme qui peut être soumise à d'importantes variations en fonction des conditions de pratique. La chaleur, le stress, la fatigue, la géométrie du terrain peuvent induire de brusques changements de fréquence cardiaque. De plus, la sensation de difficulté qu'un cycliste peut avoir pour une fréquence cardiaque donnée n'est pas obligatoirement la même en fonction de la géométrie du terrain et des conditions environnementales. En effet, nombreux sont les coureurs qui se sont aperçus que rouler à 170 puls/min en montée ou sur le plat n'induit pas la même difficulté dans l'effort. Et pourtant, la fréquence cardiaque est identique. En réalité, elle ne semble pas pouvoir faire la différence entre deux situations qui induisent des techniques de pédalage différentes (montée/plat). Cela montre que la relation entre fréquence cardiaque et intensité de l'exercice n'est pas si évidente et demande une certaine prudence.

En revanche, l'athlète a cette capacité de pouvoir ajuster de manière plus ou moins précise la puissance qu'il développe à partir des sensations qu'il ressent durant l'exercice. Le calibrage de l'intensité est réalisé de manière perceptive. La justesse de l'ajustement dépend en grande partie de la sensibilité perceptive du sportif. Certains ont la capacité d'échelonner l'intensité de l'exercice sur une échelle interne individuelle établie à partir de l'expérience acquise et d'un travail régulier à l'entraînement. D'autres ont plus de difficulté pour calibrer l'intensité de

l'exercice. Avoir la capacité de calibrer avec une grande justesse l'intensité de l'exercice en compétition constitue sans aucun doute un déterminant important de la performance en cyclisme car cela intervient directement dans la gestion des ressources énergétiques.

Ce chapitre se propose de montrer comment il est possible d'utiliser la perception de l'exercice comme instrument de calibrage de l'intensité de l'exercice durant l'effort. Une méthode relativement facile à apprendre et utilisable en routine pour le plus grand nombre est proposée.

1. L'évaluation perceptive de l'exercice

1.1 Le RPE de Borg

D'après Borg (1998), l'utilisation de l'évaluation perceptive de l'exercice pour quantifier l'intensité du travail effectué est très appropriée dans les sports à dominante énergétique. Pour réaliser un exercice à un niveau d'intensité optimal, l'athlète peut reconnaître de manière subjective quand le niveau est atteint et comment réaliser les ajustements d'intensité autour de ce niveau. Cela constitue une tâche perceptible et psychomotrice élaborée. L'évaluation perceptive de l'exercice peut ainsi être utilisée de manière rationnelle par les sportifs amateurs et professionnels. Selon Borg, le concept de l'évaluation perceptive de l'exercice doit être appréhendé sous deux formes :

une forme active qui renvoie à l'aspect productif. Il fait référence à l'exercice que le sportif réalise de façon volontaire ;

une forme passive qui renvoie à l'aspect réceptif. Il fait référence au stress et à la fatigue durant et après un exercice qui est plutôt subi par le sportif (suivre un rythme imposé par les autres par exemple).

Dans différents sports, les athlètes combinent les deux formes différentes de l'évaluation perceptive de l'exercice. Cependant, la perception de l'exercice et de la fatigue font toutes les deux appel à des mécanismes physiologiques et psychologiques. La perception de l'exercice prend en compte des sensations très variées telles que la douleur musculaire ou la gêne respiratoire.

En cyclisme, les athlètes expérimentés et bien entraînés sont généralement capables de fixer un niveau d'intensité optimal dès le départ d'une compétition. Ils enregistrent perceptivement le rythme imposé par la course en utilisant un feedback à partir de l'évaluation perceptive de l'exercice et de la fatigue. En revanche, les sportifs moins entraînés ont davantage de difficulté pour fixer

le rythme optimal dès le début de l'exercice. Ils ont souvent tendance à partir beaucoup trop vite et ainsi, à puiser dès le début de l'exercice dans les réserves d'énergie. Plusieurs études (voir Borg, 1998) ont montré comment les athlètes sont capables d'estimer une intensité optimale. Les sportifs entraînés ont la capacité de fixer subjectivement et rapidement un niveau d'intensité optimal puis de maintenir constant ce niveau sur une certaine durée. En revanche, les athlètes moins entraînés ont davantage de difficulté pour fixer subjectivement une intensité d'exercice optimale. Cela se retrouve souvent lors du test de Cooper de 12 min où l'on observe que certains sportifs partent beaucoup trop vite et s'épuisent rapidement avant la fin de l'épreuve.

Conséquences pour le cycliste

Le cycliste qui a l'habitude de faire la course devant en prenant des initiatives comme contrôler la course, provoquer des échappées, réguler le rythme d'une échappée fonctionne selon le principe de la « forme active de la perception de l'exercice ». Il produit une action volontaire positive qui permet de développer et d'affiner les sensations durant l'effort. À force de produire de l'action en procédant par essais-erreurs, il améliore la calibration et l'ajustement de la charge de travail et construit sa propre échelle perceptive de l'intensité de l'exercice. En revanche, le coureur qui subit la course ne s'investit pas dans un travail réellement volontaire. Il ajuste l'intensité de l'exercice en fonction du rythme de la course et fait appel à la « forme passive de la perception de l'exercice ». Ainsi, il agit de manière passive en calibrant la charge de travail à partir de l'action d'autres coureurs qui eux sont actifs et prennent part à l'action. Lorsque la forme passive de la perception de l'exercice est due à la fatigue de l'athlète, cela constitue quelque chose de normal mais si elle fait partie du mode de fonctionnement du cycliste, cela pose des problèmes importants à long terme au niveau de l'amélioration de sa capacité de performance. En effet, la passivité en course ne permet pas de développer efficacement la perception de l'exercice, le coureur n'apprend pas à se connaître, ne développe pas sa confiance en course, doute de lui lors des moments difficiles et ne parvient plus à s'exprimer comme il le souhaite. Cette situation est malheureusement le fait de nombreux athlètes qui malgré un gros potentiel physique ne parviennent pas à s'affirmer en compétition car l'incertitude en course s'installe en permanence et induit une sorte de blocage psychologique. C'est également la raison pour laquelle certains coureurs moins talentueux s'expriment davantage à partir de l'exploitation maximale de leur potentiel physique dû à une forme active hyperdéveloppée de la perception de l'exercice. Il convient également de préciser que la manière dont sont vécues les séances d'entraînement constitue un déterminant important de la préparation physique. En effet, rouler trop souvent en groupe en évitant les séances seul constitue un handicap important pour le développement de la perception de l'exercice. Il convient d'apporter dans l'entraînement des séances difficiles où l'athlète est obligé de s'investir volontairement physiquement et mentalement. Cela constitue un passage obligé pour l'accession à la performance. Malheureusement, encore une fois, pas assez nombreux sont les cyclistes qui savent donner de leur personne dans de telles séances.

Perception de l'exercice (RPE de Borg)	Filière énergétique	Exemple	% FCmax	% $\dot{V}O_2$ max
6 Pas d'exercice du tout				
7				
8 Extrêmement léger	Capacité aérobie 1	Décontraction	FC < 75 % FCmax	50-60 %
9 Très léger				
10				
11 Léger	Capacité aérobie 2	Endurance fondamentale	75 % FCmax < FC < 85 % FCmax	60-70 %
12				
13 Quelque peu difficile	Capacité aérobie 3	Rythme (tempo)	85 % FCmax < FC < 92 % FCmax	70-80 %
14				
15 Difficile				
16	Puissance aérobie (seuil anaérobie)	Contre-la-montre	92 % FCmax < FC < 96 % FCmax	80-90 %
17 Très difficile				
18	Puissance maximale aérobie	Poursuite (piste)	96 % FCmax < FC < 100 % FCmax	100 %
19 Extrêmement difficile				
20 Exercice maximal	Puissance anaérobie lactique	Km sur piste	100 % FCmax	110 %

Borg (1998) rapporte que, dans différents sports d'endurance, les athlètes suédois estiment l'intensité de leurs entraînements en fonction d'une échelle de perception d'intensité de l'exercice (RPE) spécialement conçue sur une échelle de 6 à 20 (tableau 4.1). L'échelle a été corrélée à la fréquence cardiaque (FC), l'item 6 correspondant à une FC de 60 puls/min et l'item 20 à une FC de 200 puls/min. Les sportifs sont ainsi capables d'estimer un niveau d'intensité optimal en fonction du type et de la durée de l'activité.

1.2 Graduation de la douleur en fonction des symptômes somatiques subjectifs

D'après Borg, l'estimation de l'intensité de l'exercice repose sur trois critères :

- perceptif (douleurs musculaires et articulaires)
- physiologique ([La], pH, FC, $\dot{V}O_2$)
- mécanique (force, vitesse, moments angulaires)

Borg et coll. (1976) ont étudié chez 32 personnes saines l'évolution de la douleur à partir de certains

symptômes somatiques subjectifs en fonction de la FC et d'une échelle d'évaluation perceptive de l'exercice (CR_{10}) durant un exercice prolongé sur cycloergomètre conduit jusqu'à 170 puls/min. Les sujets évaluaient (figure 4.1a) la perception de l'intensité de l'exercice, la fatigue des membres inférieurs, les douleurs au niveau des membres inférieurs et de la poitrine, l'essoufflement et la difficulté à respirer. La figure 4.1a illustre la variation des différentes variables en fonction de FC et de l'échelle d'évaluation de la perception de l'exercice (CR_{10} de Borg).

On observe sur cette figure que l'évaluation de la perception de l'exercice, la fatigue des membres inférieurs, l'essoufflement et FC ont une évolution similaire en fonction de la charge de travail. En revanche, il y a des différences significatives entre ces variables et les douleurs au niveau des membres inférieurs, et de la poitrine et la difficulté à respirer. Une excellente corrélation a été observée entre la douleur des membres inférieurs et la fatigue de ces membres et l'évaluation de la perception de l'exercice. On remarque que l'essoufflement constitue une variable très perceptible par les sujets et qui mérite d'être prise en considération pour l'évaluation de la perception de l'exercice.

Tableau 4.1

Évaluation de la perception de l'exercice en fonction de l'intensité de l'exercice effectué selon l'échelle RPE de Borg en fonction du pourcentage de fréquence cardiaque maximale (% FCmax) et de $\dot{V}O_2$ max (% $\dot{V}O_2$ max). Tableau adapté de Borg (1988).

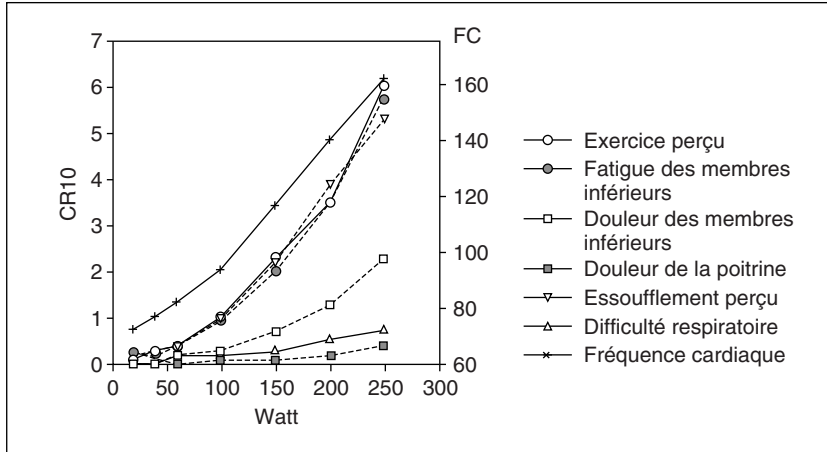


Figure 4.1a

Augmentation de la fréquence cardiaque et des symptômes somatiques subjectifs en fonction de l'échelle CR₁₀ de Borg et de la puissance (W) sur bicyclette (Borg et coll., 1976). (FC : Fréquence cardiaque.)

Il faut retenir que la sensation de douleur demeure très subjective et personnelle. Elle peut en effet être perçue différemment selon les conditions environnementales dans lequel le sportif pratique ou encore, selon son état de forme du moment.

Pour finir, Borg (Borg et coll., 1981 ; Borg, 1982) a conçu une échelle renouvelée de l'échelle CR₁₀ (figure 4.1b) en corrélant la difficulté de l'exercice perçu avec l'augmentation de la lactémie et du pH. Ainsi, l'échelle CR₁₀ présente des items qui n'évoluent pas linéairement en fonction de la difficulté perçue par le sportif et qui peuvent dépasser la valeur de 10.

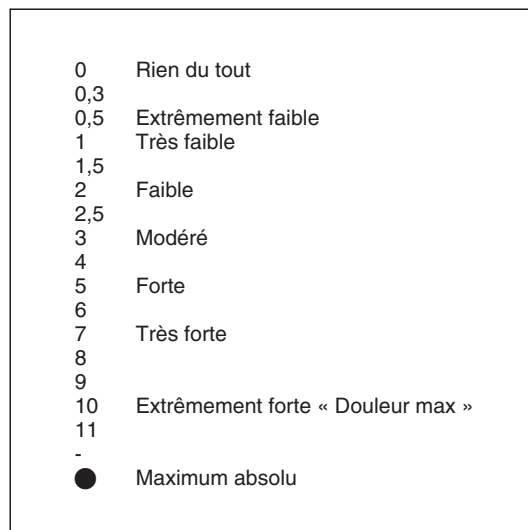
1.3 Variables pouvant altérer la perception de l'exercice

1.3.1 Le niveau d'expertise de l'athlète

Le niveau d'expertise de l'athlète joue un rôle important sur le traitement des informations

Figure 4.1b

Échelle du CR10 de Borg. Le sportif estime la difficulté de l'exercice perçu à partir des différents items de l'échelle. L'intensité maximale perçue est définie comme l'item « Maximum absolu » (Borg et coll., 1981).



Conséquences pour le cycliste

Plus l'intensité de l'exercice augmente et plus l'essoufflement et la douleur dans les membres inférieurs sont ressentis comme difficiles par le cycliste. L'essoufflement correspond à la fréquence respiratoire qui augmente de plus en plus rapidement avec la puissance développée. La douleur perçue dans les membres inférieurs est à mettre en relation avec l'augmentation de la concentration en lactate au niveau des muscles en action. Ainsi, le cycliste peut s'appuyer sur deux variables perceptives distinctes pour estimer l'intensité de l'exercice qu'il réalise, l'une périphérique (la douleur dans les membres inférieurs), l'autre davantage générale (la ventilation). Évidemment, le calibrage et l'ajustement de ces variables perceptives se font dans le temps en prenant particulièrement soin à développer la forme active de la perception de l'exercice.

perceptives qui se régulent à partir de trois niveaux différents. Le premier concerne le développement de la mémoire qui dépend de l'expérience acquise et du nombre de fois qu'une information stockée est rappelée. Le second représente les émotions, qui renvoient à ce qui est perçu comme agréable ou désagréable. Le dernier niveau est la cognition. Il représente la capacité à classer les différentes sensations. Mémoire, émotion et cognition sont les trois niveaux responsables du traitement des signaux perceptifs émanant des différentes intensités d'exercice. La répétition, l'analyse et la sélection des informations perceptives conduisent à une amélioration des qualités perceptives du sportif.

1.3.2 L'environnement

Les variables environnementales incluent l'altitude, la température ambiante, la musique, le bruit, la vitesse du vent, l'humidité et la qualité de l'air ambiant. Le contexte social dans lequel l'exercice est effectué peut avoir une influence spéciale sur l'évaluation de la perception de l'exercice. Lorsqu'un athlète effectue un entraînement sous la chaleur, la relation entre la fréquence cardiaque et l'évaluation de la perception de l'exercice change considérablement (Borg, 1998). Si la température et l'humidité sont très élevées, la relation peut changer dramatiquement. La fréquence cardiaque est donc grandement influencée par la chaleur. Par contre, l'évaluation de la perception de l'exercice est moins influencée par l'augmentation de la température mais elle l'est suffisamment pour que l'on prenne en considération tout excès de température durant l'exercice (Gamberale et Holmer, 1977). Certains athlètes sont capables de percevoir les effets cumulés de la charge de travail imposée à l'organisme et de la chaleur alors que d'autres ont davantage de mal. C'est pourquoi, un athlète peut rencontrer des problèmes au niveau physiologique s'il sous-estime trop ces effets cumulés.

La variation de la fréquence cardiaque en fonction de l'exercice en ambiance froide n'est pas bien connue (Borg, 1998). Un temps légèrement frais peut avoir un effet positif sur l'organisme, mais un environnement trop frais entraîne une dégradation de la performance et peut également détériorer la relation entre la fréquence cardiaque et la perception de l'exercice. Lorsqu'il fait très froid, la respiration devient difficile et entraîne une augmentation de l'évaluation de la perception de l'exercice suivi bien souvent d'une augmentation concomitante de la fréquence cardiaque. Ce phénomène est bien connu des skieurs de fond, des cyclistes et des coureurs à pieds.

Écouter de la musique durant l'exercice entraîne un changement dans la relation entre la fréquence cardiaque et l'évaluation de la perception de l'exercice. Une musique forte et rythmée au cours d'un exercice aérobique diminue la sensibilité à l'exercice. Même remarque avec la présence de supporters. Cela semble être dû à des changements intervenant sur le niveau d'activation *physique* du sujet qui ne focalise plus la totalité de son attention sur l'exercice effectué.

La température et l'humidité de l'air influencent grandement la perception de l'effort du sportif. Quand le temps est chaud mais sec, le corps

Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)																
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
21					21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	28	29
22				22	22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30	31
23				23	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	33
24				24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	33	34	35
25				25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37
26			26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	36	37	38	39
27			27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
28			28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	42	43	44
29		29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	43	44	45	46
30		30	31	32	34	35	36	37	39	40	41	42	43	45	46	47	48
31		31	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	46	47	48	49	50
32		33	34	35	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49	50	51	53
33	33	34	36	37	38	40	41	43	44	46	47	48	50	51	52	54	55
34	34	35	37	39	40	42	43	45	46	47	49	50	52	53	55	56	58
35	35	37	39	40	42	43	45	46	48	49	51	53	54	56	57	58	
36	37	38	40	42	43	45	47	48	50	51	53	55	56	58	59		
37	38	40	42	43	45	47	49	50	52	54	55	57	58				
38	40	42	43	45	47	49	50	52	54	56	57	59					
39	41	43	45	47	49	51	52	54	56	58	59						
40	43	45	47	49	51	52	54	56	58								
41	45	47	48	50	52	54	56	58									
42	46	48	50	52	54	56	58										
43	48	50	52	54	56	58											

Tableau 4.2

Calcul de l'indice « humidex ». Température (°C) perçue par la moyenne des individus en fonction de la température ambiante et de l'humidité relative de l'air. Le degré d'inconfort perçu associé à un indice « humidex » est donné dans le second tableau en fonction des zones de couleurs.

Indice humidex, (°C)	Degré d'inconfort
En dessous de 29°	Confortable. Peu de gens sont incommodés.
30° à 34°	Sensation d'inconfort (malaise) plus ou moins grande.
35° à 39°	Sensation d'inconfort assez grande. Prudence. Ralentir certaines activités en plein air.
40° à 45°	Sensation de malaise généralisée. Danger. Eviter les efforts.
46° à 53°	Danger extrême. Arrêt de travail dans de nombreux domaines. Les activités physiques sont dangereuses
Au-dessus de 54°	Coup de chaleur imminent (danger de mort).

Tableau 4.2 (*suite*)

transpire et l'excédent d'eau peut être absorbé par l'air. Mais un milieu trop sec peut engendrer des gerçures de la peau et des lèvres, des irritations du nez et de la gorge et même des difficultés respiratoires chez certains sportifs vulnérables. Par contre, lorsque l'air est humide, la transpiration ne peut pas s'évaporer aussi facilement : on a l'impression d'avoir chaud et d'être collant. Cela peut entraîner la prolifération de bactéries, de moisissures, des irritations cutanées, des maux de tête, des infections respiratoires et de sévères réactions allergiques (asthme, rhinite allergique). Dans certains cas, l'inhalation de toxines, produites par certains champignons proliférant en milieu humide, peut provoquer des maladies sérieuses.

Pour indiquer la manière avec laquelle la moyenne des gens réagit au temps chaud et humide, les météorologues canadiens ont inventé l'indice « humidex » (ou degré de confort). Cet indice donne la température ressentie, perçue par le sujet en tenant compte de la température et de l'humidité de l'air dans un lieu donné (tableau 4.2). Il sert ainsi à estimer le degré d'inconfort ressenti par le corps humain en fonction du pourcentage d'humidité relative de l'air ambiant. Ce n'est pas une mesure absolue. C'est une valeur indiquant comment le sujet moyen ressent la chaleur sur une échelle donnée. On parle de « l'être humain moyen » car confrontées aux mêmes conditions climatiques, les réactions des individus peuvent être différentes. Ainsi, une personne âgée peut subir un coup de chaleur à un indice humidex élevé alors que dans les mêmes conditions, un homme de 30 ans ne ressentira qu'un léger inconfort. C'est le même phénomène qui s'applique aux cyclistes qui font des compétitions de longue durée sous un temps chaud et humide. L'indice humidex peut être intéressant à utiliser chez les cyclistes.

1.3.3 La motivation

L'évaluation de la perception de l'exercice dépend également des composantes motivationnelles du sujet. Un entraînement effectué en groupe dans un environnement confortable permet

à l'athlète de se motiver davantage et peut induire une altération de la relation entre la charge de travail et l'évaluation de la perception de l'exercice. Cela peut induire un effet de surentraînement pouvant entraîner une fatigue chronique. À ce stade, le sportif ne doit plus écouter les signaux provenant de son propre corps qui sont altérés par l'effet de la dynamique de groupe. Il doit impérativement éviter de continuer à s'entraîner avec ses amis et se donner une période de récupération active pour diminuer le niveau de fatigue accumulé jour après jour. Les cyclistes très motivés ont tendance à sous-estimer l'intensité de l'exercice perçu. En voulant montrer l'étendue de leur talent, ils assimilent la sensation de fatigue à une faiblesse. Cette sous-estimation de l'exercice perçu peut entraîner l'athlète vers un effet de surentraînement et un état d'épuisement général (fractures de fatigue, tendinites, mauvaises sensations générales, fatigue chronique).

La tendance inverse est également observée chez des sujets peu motivés ou qui craignent les effets négatifs de l'exercice sur leur santé. Ces athlètes ont tendance à surestimer les sensations perçues.

1.3.4 Nutrition et drogues

L'utilisation de drogues (stimulants, alcool, antalgiques) modifie la perception de l'exercice. Borg a montré en particulier que l'abus d'alcool modifiait indirectement la perception en augmentant significativement la fréquence cardiaque. Les bêta-bloquants induisent l'effet inverse. Les amphétamines diminuent la perception de l'exercice.

1.3.5 Variables physiologiques

Certaines variables physiologiques sont perçues de façon consciente par le sujet (fréquence cardiaque, sudation, fréquence respiratoire, [La], pH). D'autres échappent à toute perception consciente ($\dot{V}O_2$, pression artérielle, glycémie, température centrale). Les travaux montrent qu'en général la fréquence cardiaque et le pH sanguin sont des variables physiologiques étroitement corrélées à la perception de l'exercice.

1.3.6 Âge

L'âge pourrait expliquer en partie les différences de résultats obtenus entre les individus pour un exercice de même intensité. Cette différence est flagrante en particulier chez les enfants qui éprouvent certaines difficultés à percevoir et mesurer les sensations associées à un exercice musculaire. Cette difficulté pourrait être liée en particulier à des facteurs cognitifs. L'enfant aurait du mal à utiliser correctement l'évaluation de la perception de l'exercice pour quantifier ses sensations.

Conséquences pour le cycliste

La perception de l'intensité de l'effort dépend du traitement des signaux perceptifs qui émanent des différentes régions du corps du cycliste. Ce dernier traite les informations perceptives à partir du développement de la mémoire, des émotions et de la cognition. Plus le niveau de performance du cycliste est élevé et plus le traitement des signaux est performant. La forme active de la perception de l'exercice conduit à une amélioration de la perception de l'intensité. Les conditions environnementales influent directement sur le niveau de perception des informations. C'est pourquoi, lors de conditions extrêmes de froid, de chaleur, d'humidité, d'ambiance extérieure, etc., le cycliste doit normaliser les signaux qu'il perçoit en restant prudent sur l'interprétation qu'il en fait. Dans ces conditions, la relation entre la fréquence cardiaque et la perception de l'exercice est altérée. Une très grande motivation à l'entraînement ou en compétition peut diminuer la difficulté de l'exercice perçue pour une intensité d'exercice donnée. La difficulté de l'effort perçue importante en temps normal peut subitement diminuer en cas de « sur-motivation » et devenir acceptable. Le cycliste pédale alors dans l'euphorie ! Tout cycliste compétiteur a déjà connu ce moment de grâce où il se sent imbattable. Le problème, c'est que la dépense énergétique reste la même et que l'euphorie de l'effort peut venir entraver la gestion des ressources. C'est pourquoi le cycliste doit savoir redoubler de prudence dans ces moments-là en réajustant la perception de l'exercice.

1.4 Exemple du cyclo-cross et du VTT

Il a été montré en compétition chez des coureurs effectuant de la course d'orientation (Borg, 1998) que la FC était relativement stable et variait très peu en considération de la géométrie du terrain qui, elle, variait sensiblement. En revanche, l'évaluation de la perception de l'exercice qui variait significativement durant la compétition était beaucoup plus étroitement corrélée avec la performance comparée à la FC. Il existe un grand délai dans la réponse de la FC qui semble ne pas trop changer entre les parties difficiles et faciles du terrain. Les mêmes effets sont observés en cyclisme en fonction de la géométrie du terrain. Pour une FC similaire, la perception de l'exercice en montée n'est souvent pas la même que sur le plat. La conclusion de ces observations est qu'il est préférable d'enregistrer l'évaluation de la perception de l'exercice que la FC dans les sports à dominante énergétique qui incluent des changements de rythme dus à la géométrie du terrain ou aux aspects tactiques de la course (cyclisme, cross country, ski de fond).

Il est possible de vérifier les constatations de Borg en observant par exemple la gestion de l'exercice au cours du temps en cyclo-cross chez les athlètes de niveau international (figure 4.2a) ou lors d'un test en VTT chez des sujets non entraînés et non-spécialistes de la discipline (figure 4.2b). Le cyclo-cross est un très bon exemple car l'athlète doit gérer au mieux l'intensité de l'exercice à bicyclette et en course à pieds dans des parties de terrain très différentes, à savoir, des portions

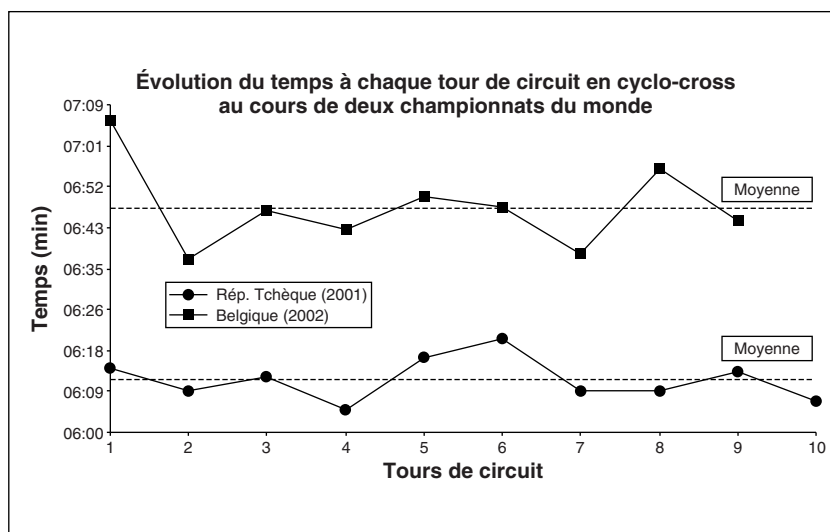


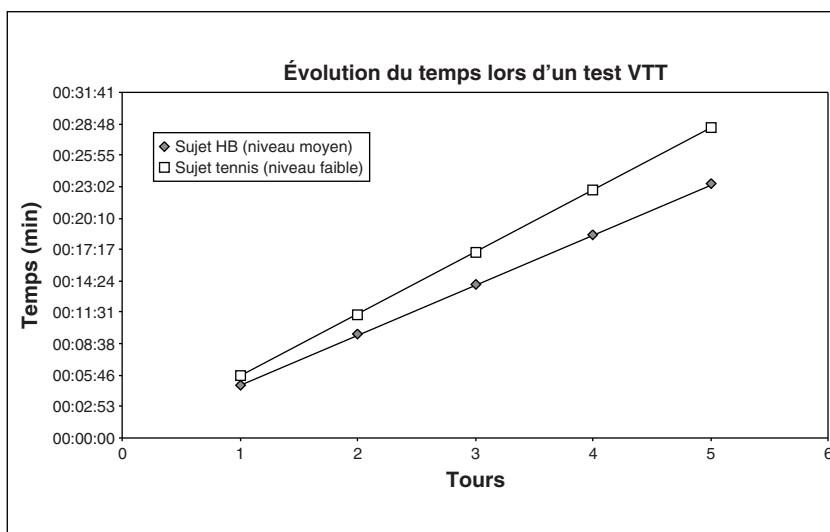
Figure 4.2a

Évolution du temps sur chaque tour lors des championnats du monde de cyclo-cross 2001 et 2002. La variation du temps à chaque tour est de ± 5 sec (coefficient de variation = 1,2 %) et ± 9 sec (CV = 2,2 %) pour les deux championnats, respectivement.

de route, d'herbe, de terre, de cailloux, etc. Il est remarquable de constater que les coureurs entraînés sont en effet capables d'effectuer chaque tour de circuit avec une régularité très surprenante (± 7 sec par tour). De la même manière, on observe sur la figure 4.2b l'importante régularité du rythme de course chez les deux sujets non

Figure 4.2b

Évolution du temps sur chaque tour d'un circuit (temps cumulé) lors d'un test en VTT chez deux étudiants en STAPS non spécialistes de VTT (un handballeur et l'autre tennisman). La variation du temps à chaque tour est de $\pm 7,4$ sec (coefficient de variation = 2,7 %) et $\pm 4,1$ sec (CV = 1,2 %) pour le handballeur et le tennisman, respectivement.



spécialistes passant le test de VTT. Le parcours était pourtant très technique. Les résultats montrent que malgré le faible niveau d'entraînement et la non-spécificité de la discipline, les deux sportifs parviennent à étalonner leur effort remarquablement bien. Cela témoigne d'une haute capacité à estimer et à échelonner l'intensité de l'exercice au cours de l'exercice malgré l'irrégularité du terrain qui entraîne des ruptures de rythme. Une telle adaptation n'est possible qu'à partir du développement optimal de la capacité d'estimation de la perception de l'exercice fourni. À ce stade, l'organisme se conduit comme un véritable système de mesure capable de mesurer de très fines variations d'intensité. Il est certain que les athlètes ne seraient pas aussi efficaces s'il leur était demandé de réguler leur exercice en fonction de la fréquence cardiaque ou de la puissance développée. Cette observation montre combien il est intéressant de développer les aspects liés à l'estimation de la perception de l'exercice afin de mieux gérer la puissance développée.

pour déterminer l'intensité de l'exercice, mais ont comme principal inconvénient de ne pas les guider et les aider à se calibrer sur des zones d'intensité précises utiles à la gestion des ressources énergétiques en compétition et à l'entraînement. Elles autorisent le feed-back du sportif sur la difficulté de l'exercice qu'il effectue mais ne lui permettent pas d'ajuster son effort en rapport avec des filières énergétiques précises. En effet, à quelle zone d'intensité d'exercice correspond un exercice léger et un exercice difficile ? Comment peut-il faire la différence entre les niveaux 8 et 11 sur l'échelle RPE ? Les mêmes questions peuvent être posées pour les autres niveaux de difficulté. Or l'idéal est de donner à l'athlète un outil lui permettant de se calibrer sur différentes zones d'intensité renvoyant à des filières énergétiques précises. Cela facilite la construction des séances d'entraînement en autorisant la gestion rationnelle des différents métabolismes énergétiques intervenant lors des exercices.

Cet outil, nous l'avons construit (Grappe et coll., 1999) à partir d'une nouvelle échelle d'évaluation de la perception de l'exercice : « *L'échelle d'Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice (échelle d'ESIE)* » (figure 4.3) permettant au cycliste de s'étalonner lors de l'effort sur différentes zones d'intensité remarquables. Elle oriente le cycliste sur l'estimation de l'intensité de l'exercice qu'il réalise en tenant compte des observations rapportées par Borg et coll. (1976) concernant l'évolution de la douleur à partir de certains symptômes somatiques subjectifs. L'échelle est construite à partir de la détermination de différents niveaux d'intensités que l'athlète rencontre régulièrement au cours de l'exercice (tableau 4.3). Elle offre des critères objectifs de l'évaluation de la perception

2. Échelle d'Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice (échelle d'ESIE)

2.1 Détermination de différents niveaux d'intensité de l'exercice

Les échelles RPE et CR_{10} élaborées par Borg sont intéressantes car elles prennent en considération les réponses perceptives du sportif

Tableau 4.3

Correspondance entre les différentes zones d'intensité utiles à l'entraînement en cyclisme et les différentes variables utilisées pour l'entraînement en général.

Zones d'intensité	Filières énergétiques	Exemples	% PMA	% VMA ou $\dot{V}O_2$ max	Temps limite (t_{lim})	% FC max
Zone 1	Capacité aérobie 1	Décontraction	30-50 %	50-60 %	Sup. à 6 heures	FC < 75 % FCmax
Zone 2	Capacité aérobie 2	Endurance fondamentale	50-60 %	60-70 %	2 à 6 heures	75 % FCmax < FC < 85 % FCmax
Zone 3	Capacité aérobie 3	Rythme (tempo)	60-75 %	70 -80 %	1 à 2 heures	85 % FCmax < FC < 92 % FCmax
Zone 4	Puissance aérobie (seuil anaérobie)	Contre-la-montre	75-85 %	80-90 %	20 min à 1 heure	92 % FCmax < FC < 96 % FCmax
Zone 5	Puissance maximale aérobie	Poursuite 4 km (prologue)	85-100 %	100 %	5 min à 7 min	96 % FCmax < FC < 100 % FCmax
Zone 6	Capacité/puissance anaérobie lactique	Km piste	100-180 %	110 %	30 sec à 1 min	100 % FCmax
Zone 7	Puissance anaérobie alactique	sprint	180-300 %	110-120 %	Jusqu'à 7 sec	90-95 % FCmax (référentiel non approprié)

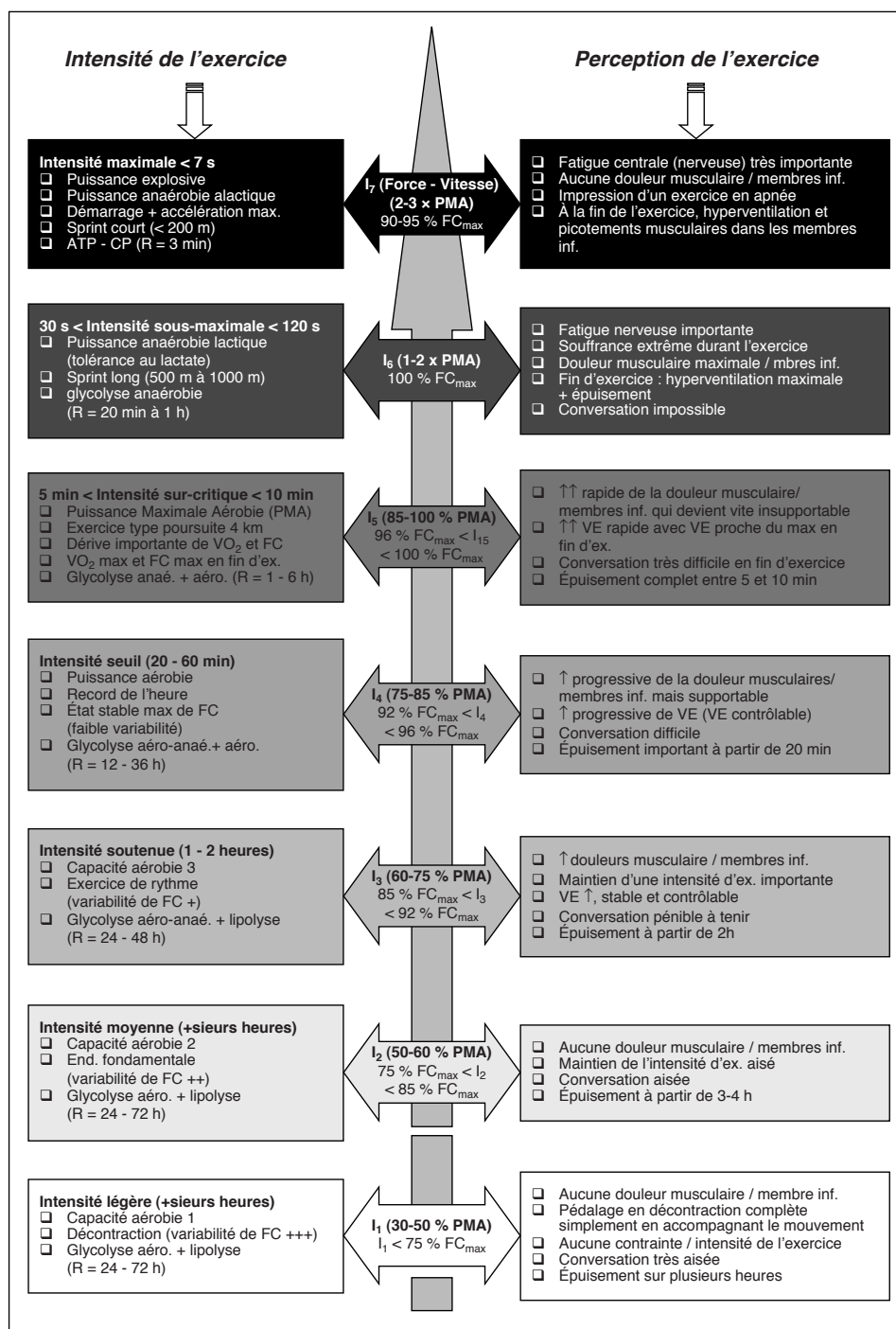


Figure 4.3

Échelle d'Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice (échelle d'ESIE, Grappe et coll., 1999).

de l'exercice en fonction de la zone d'intensité dans laquelle il travaille. Elle est constituée de 7 items fondamentaux qui permettent de définir très précisément 7 zones d'intensité en fonction de certaines variables perceptives. L'échelle est intéressante pour tous les athlètes qui pratiquent des sports individuels à dominante énergétique et qui incluent des variations d'intensité durant la

compétition (cyclisme, ski de fond, coureurs de demi-fond, etc.). Cette échelle est utilisée comme base d'instrument de travail depuis 1997 chez des triathlètes et des cyclistes amateurs et professionnels. Elle n'a toutefois pas encore fait l'objet de publication scientifique internationale (seulement présentée en congrès).

2.2 Différentes zones d'intensité et leurs items

2.2.1 Zone d'intensité légère [$I_1 < 75 \% FC_{max}$; 30-50 % PMA] (figure 4.4)

Le coureur est capable de rouler plusieurs heures sans aucune difficulté. Il effectue un exercice en aérobie complète. Donc, en endurance fondamentale. L'exercice est réalisé entièrement avec l'oxydation des lipides. L'intensité de l'exercice est très faible. La FC (voir schéma ci-dessous) est inférieure à 75 % de FC_{max} et suit l'évolution de la puissance développée (courbe supérieure). Sa variabilité est assez grande pendant l'exercice. La vitesse de déplacement pour le cycliste senior entraîné se situe entre 25 et 30 km/h. Le cycliste est alors en complète décontraction et ne ressent aucune douleur musculaire localisée au niveau des membres inférieurs. Cela est dû à une tension musculaire très faible lors de l'exercice. La conversation est particulièrement aisée dans le groupe. Sur une séance d'entraînement de 1 à 2 h, le cycliste entraîné ne termine absolument pas fatigué. En revanche, si l'entraînement dure plusieurs heures, une fatigue centrale généralisée peut faire son apparition. L'état d'épuisement en I_1 est atteint au bout de plusieurs heures en fonction de l'état d'entraînement du cycliste.

2.2.2 Zone d'intensité moyenne [$75 \% FC_{max} < I_2 < 85 \% FC_{max}$; 50-60 % PMA] (figure 4.5)

Le coureur est capable de rouler plusieurs heures mais avec une certaine difficulté pour

Conséquences pour le cycliste

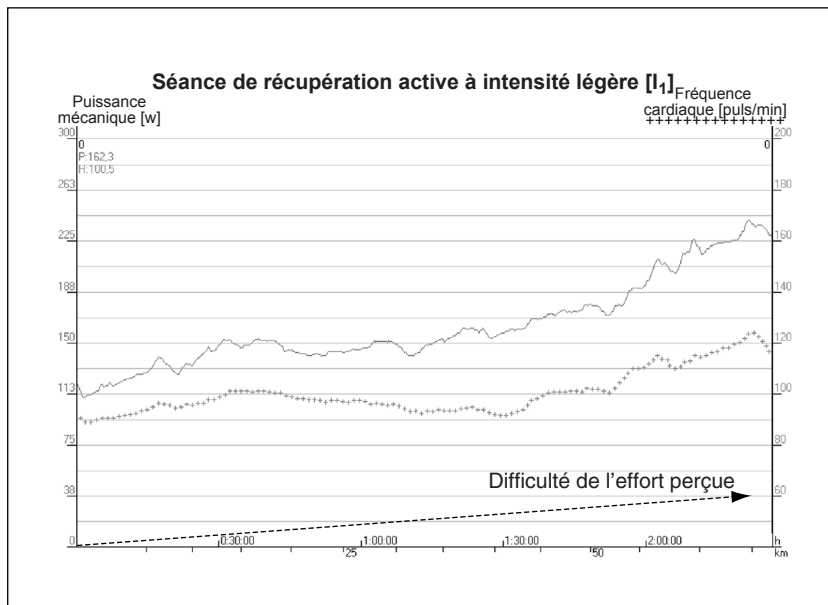
La séance en intensité légère (I_1) est intéressante :

1. en début de saison, lors de la reprise de l'entraînement. Elle permet au cycliste de s'entraîner en douceur sans provoquer de traumatismes aigus sur un organisme pas encore prêt à assimiler de séance difficile ;
2. le lendemain d'une compétition. Elle permet au cycliste de s'entraîner en régénération sans accumuler de fatigue supplémentaire tout en évitant une chute brutale de la capacité de fonctionnement de l'organisme qui a été soumis à rude épreuve (sous pression) en compétition. Elle induit un faible stimuli d'entraînement utile à un retour au calme le lendemain de la compétition.

Attention ! Trop d'entraînement en I_1 ne provoque pas d'amélioration de la capacité de performance du cycliste. Au contraire, cela tend davantage à la faire diminuer. L'intensité légère doit ainsi être utilisée à faible dose que pour des séances précises. Les faibles niveaux de puissance développée en I_1 induisent un travail musculaire réalisé essentiellement à partir des graisses. Les réserves en glycogène sont par conséquent épargnées.

Figure 4.4

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé), de la puissance mécanique (courbe supérieure) et de la fatigue perçue en zone d'intensité légère [I_1]. La fatigue perçue augmente très lentement avec la durée de l'exercice et est quasiment nulle chez le cycliste entraîné sur une sortie de 3 h.



maintenir l'intensité de l'exercice dans la dernière ou dans les deux dernières heures de la séance d'entraînement. L'exercice est effectué en aérobie complète (donc, en endurance fondamentale). Il est réalisé en grande partie à partir de l'oxydation des lipides. FC se situe entre 75 et 85 % de FC_{max} . Son évolution est similaire à celle de la puissance développée. Sa variabilité est toujours relativement importante pendant l'exercice. Le cycliste ne pédale plus en décontraction complète mais est obligé de fournir une force constante sur les pédales. Toutefois, malgré l'augmentation de la tension musculaire, il ne perçoit pas de douleurs musculaires dans les membres inférieurs. La vitesse de déplacement se situe entre 30 et 35 km/h. La conversation dans le groupe est légèrement altérée par le rythme plus soutenu de l'exercice. Une fatigue généralisée importante peut faire son apparition au bout de plusieurs heures d'entraînement et amener à l'état d'épuisement.

2.2.3 Zone d'intensité soutenue [$85 \% FC_{max} < I_3 < 92 \% FC_{max}$; 60-75 % PMA] (figure 4.6)

Le coureur bien entraîné est capable de maintenir cette intensité d'exercice entre 2 et 3 heures. Sur des séquences plus longues, les effets délétères de la fatigue se font sentir. FC se situe entre 85 % et 92 % de FC_{max} . Sa variabilité durant l'exercice devient plus faible car l'effort est soutenu. Son évolution est toujours très proche de celle de la puissance développée (figure 4.6). Le cycliste est obligé d'entretenir une intensité d'exercice assez importante en maintenant un niveau de force constant sur chaque cycle de pédalage.

Conséquences pour le cycliste

L'intensité moyenne (I_2) est l'intensité d'entraînement la plus utilisée par les cyclistes qui s'entraînent de nombreuses heures en endurance fondamentale. C'est dans cette zone d'intensité que la charge de travail est la plus importante. La durée d'entraînement en I_2 détermine cependant l'orientation de la charge de travail. Trois orientations sont possibles :

1. le cycliste termine la séance d'entraînement en I_2 facilement. Il n'y a aucune accumulation de fatigue car le stimulus d'entraînement est sous-critique. La séance a une orientation vers l'entretien de la forme ;
2. le cycliste termine la séance d'entraînement en I_2 fatigué. Il y a accumulation de la fatigue pour le cycliste car le stimulus d'entraînement est critique. La séance a une orientation vers une légère amélioration de la capacité d'endurance ;
3. le cycliste termine la séance d'entraînement en I_2 épuisé. Le niveau de fatigue accumulé est maximum car le stimulus d'entraînement est sur-critique. La séance est orientée vers une désadaptation importante de l'organisme visant une amélioration importante de la capacité d'endurance.

Au total, une séance conduite à un même niveau d'intensité peut avoir des effets différents selon l'état de fatigue du sportif à l'issue de la séance. En fonction de l'orientation donnée à la séance d'entraînement, il est donc très important de contrôler le niveau de fatigue du cycliste durant l'effort et en fin d'entraînement. En I_2 , plus la durée de l'exercice est longue et plus le cycliste puise dans ses réserves de graisses. L'entraînement en I_2 sur longue durée est la séance type qui permet de perdre le plus de poids. Répétée régulièrement, elle permet au cycliste de « s'affûter » et d'atteindre un poids optimal. Les stocks de glycogène sont partiellement entamés mais demeurent encore importants en fin de séance.

La vitesse de déplacement augmente pour se situer entre 35 et 40 km/h. Il commence à ressentir de petites douleurs musculaires au niveau des membres inférieurs qui sont essentiellement dues à l'augmentation de la tension musculaire déterminée par la magnitude de la force appliquée sur les pédales. L'exercice n'est plus effectué en aérobie complète mais fait appel au système anaérobie lactique. Il y a donc une légère augmentation de la concentration en lactate [La]. Toutefois, une grande partie du lactate est oxydé durant l'exercice et [La] reste modeste car sa production reste inférieure à son élimination. La ventilation s'accroît significativement et ne permet plus d'avoir une conversation aisée au sein du groupe. Il demeure toutefois possible de réguler la ventilation afin d'éviter son emballement en diminuant la fréquence respiratoire et en augmentant le volume d'air courant ventilé. On peut également ressentir les battements du cœur qui tambourinent dans la cage thoracique. Au bout de plusieurs heures, le sujet peut terminer son entraînement en état d'épuisement avancé voire, en hypoglycémie, si les stocks de glycogène musculaire et hépatique ont été en partie épuisés.

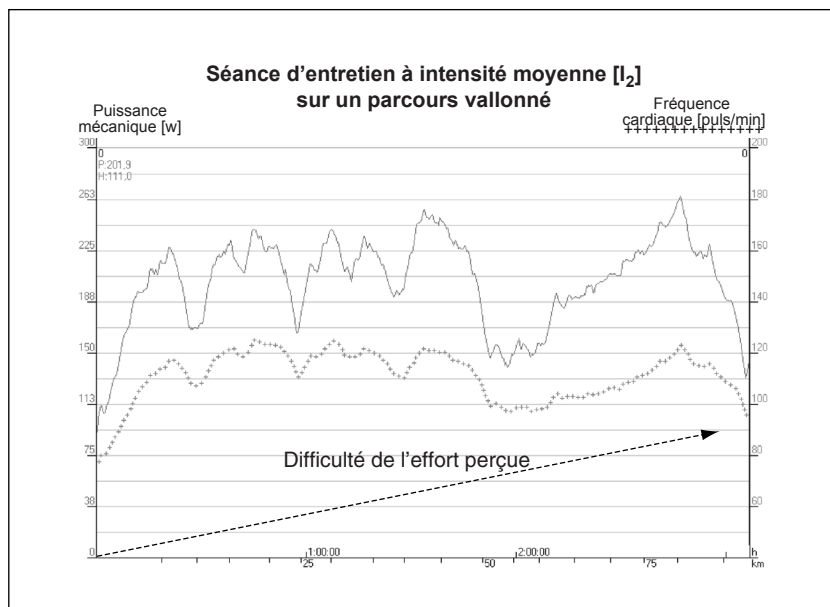
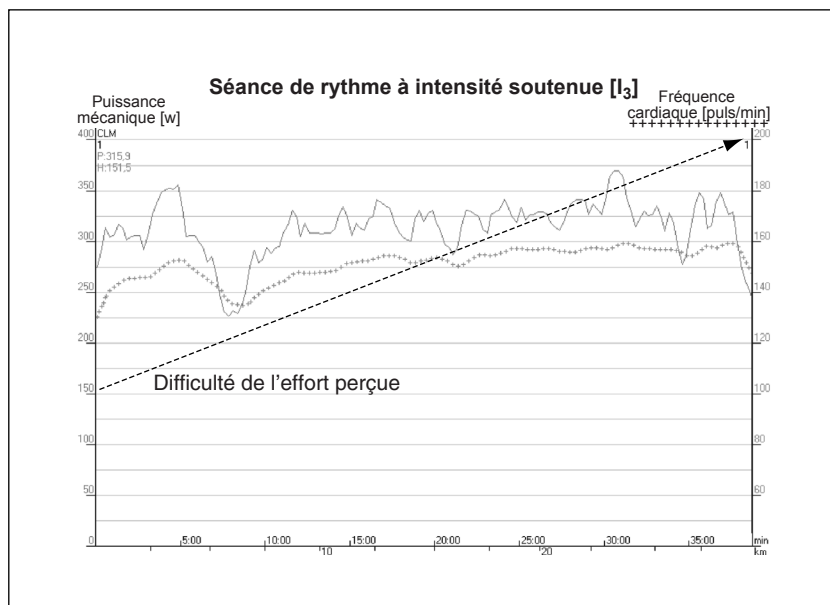


Figure 4.5

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé), de la puissance mécanique (en continu) et de la difficulté de l'effort perçue en zone d'intensité moyenne [I_2]. La difficulté de l'effort perçue augmente progressivement avec la durée de l'exercice. Elle peut devenir importante au bout de 3 à 5 h d'effort en fonction de l'état d'entraînement du cycliste.

Figure 4.6

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé), de la puissance mécanique (en continu) et de la difficulté de l'effort perçue en zone d'intensité soutenue [I_3]. La difficulté de l'effort perçue augmente très rapidement avec la durée de l'exercice et peut devenir assez importante au bout de 2 à 3 h d'effort en fonction de l'état d'entraînement du cycliste.



Conséquences pour le cycliste

La zone d'intensité soutenue (I_3) joue un rôle important lors de la période d'affûtage du cycliste la semaine avant un grand objectif ou la veille d'une compétition. Elle permet à l'organisme de rester sous « pression » à partir d'un stimulus d'entraînement optimal sans accumuler de fatigue. Elle renvoie à des séances d'entraînement très rythmées effectuées seul ou derrière un dervy avec un braquet de compétition. L'objectif est de préserver une certaine stimulation nerveuse de l'organisme à partir d'une intensité de travail (I_3) suffisamment importante. Les filières énergétiques et les niveaux de force requis autorisent cet état de stimulation optimale. L'exercice à I_3 peut être réalisé de manière continue à partir de longues périodes d'exercice (1 h) ou d'intervalles de travail courts (5 min, 10 min etc.).

La zone d'intensité soutenue permet également le développement de la force sous-maximale à partir d'une faible cadence de pédalage (40 à 60 rpm). En effet, les niveaux de force musculaire requis à faible cadence de pédalage à I_3 sont proches de ceux utilisés dans la zone d'intensité seuil (I_4) à des cadences optimales (100 rpm). L'avantage de développer la force sous-maximale à intensité soutenue est de ne pas induire d'augmentation de la lactatémie tout en ayant une intensité d'exercice relativement importante.

Au niveau énergétique, la captation de glucose pendant l'exercice est loin d'être négligeable. Une hypoglycémie peut arriver au bout de quelques heures en fonction du niveau d'entraînement.

Figure 4.7

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé), de la puissance mécanique (en continu) et de la difficulté de l'effort perçue en zone d'intensité seuil [I_4] lors de deux montées de cols. La difficulté de l'effort perçue augmente linéairement et très rapidement pour devenir parfois maximale à la fin de l'effort.

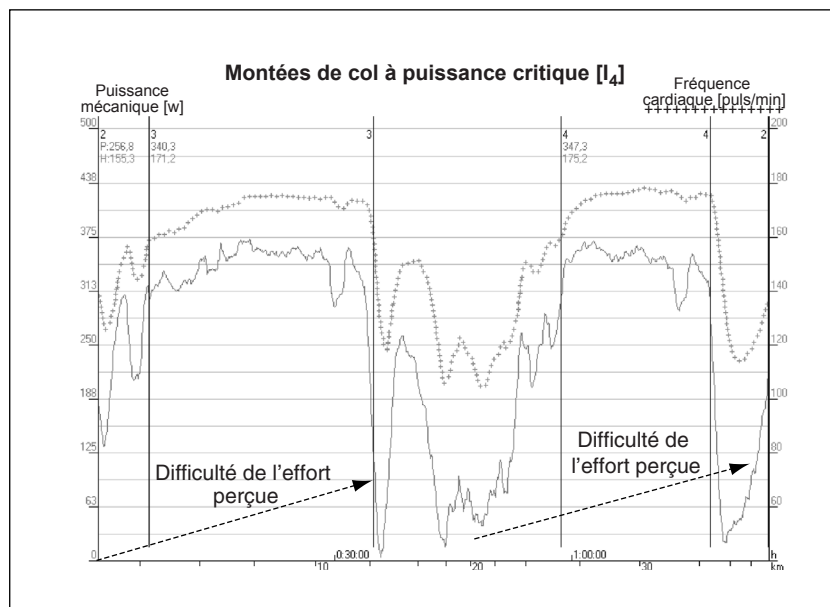
2.2.4 Zone d'intensité seuil [$92 \% FC_{max} < I_4 < 96 \% FC_{max}$; $75-85 \% PMA$] (figures 4.7, 4.8 et 4.9)

Le coureur est capable selon son niveau d'entraînement de maintenir cette intensité d'exercice entre 20 et 60 min. FC se situe entre 92% et 96% de FC_{max} . Sa variabilité durant l'effort est très faible. Elle atteint son niveau le plus stable

aux valeurs les plus élevées (figure 4.7). Toutefois, une légère dérive pulsative de FC peut être observée si l'exercice est effectué en ambiance chaude (figure 4.8). Le cycliste est obligé de maintenir un niveau de force relativement important sur chaque pédale. La vitesse de déplacement augmente nettement pour se situer entre 40 et 45 km/h. L'exercice effectué est similaire à celui réalisé par un coureur lors d'un contre-la-montre sur route ou d'un record de l'heure sur piste. L'état de tension musculaire important au niveau des membres inférieurs entraîne des douleurs qui s'installent progressivement. Elles s'accroissent graduellement avec la durée de l'exercice. Elles peuvent également s'installer à d'autres endroits du corps (nuque, dos, membres supérieurs). Toutefois, elles restent supportables. L'exercice est réalisé avec une utilisation importante du métabolisme anaérobie lactique à partir des réserves de glycogène. La production de lactate s'équilibre avec leur élimination n'entraînant pas de concentration élevée de lactate. L'exercice est réalisé dans un certain état d'acidose au niveau musculaire qui entraîne des douleurs localisées. Un état d'hyperventilation important,

Conséquences pour le cycliste

La zone d'intensité seuil (I_4) représente une zone charnière pour l'entraînement du cycliste routier. En effet, le niveau de capacité de performance à I_4 est un déterminant important de sa réussite en compétition. Il détermine en partie la performance en contre-la-montre (en tenant compte du coefficient de pénétration dans l'air) et lors des ascensions des grands cols (en tenant compte du poids du cycliste). Il permet au coureur de fournir moins d'effort en compétition dans les zones d'intensités inférieures car pour une même perception de l'effort, la puissance moyenne développée dans chaque zone d'intensité est supérieure. Ainsi, plus la puissance développée à I_4 est importante et maintenue sur une longue durée et plus le cycliste sera à l'aise en course. Bien entraîné, il est capable de multiplier par trois voire par quatre le temps de maintien à I_4 . Cela passe obligatoirement par des séances d'entraînement en fractionné. À I_4 le coureur est en équilibre maximum avec sa lactatémie mais consomme une grande quantité de glucose. Le cycliste peut terminer la séance dans un état d'hypoglycémie avancée. Dans tous les cas, une séance ciblée à I_4 se termine toujours dans un niveau de fatigue périphérique assez important. C'est pourquoi, les séances sont relativement courtes car la captation de glucose importante ne permet pas la production d'un effort sur une longue durée. Il est par conséquent très important pour le cycliste de bien connaître cette zone d'intensité car, chaque fois qu'il fait un effort à l'intérieur de cette zone en compétition, il consomme une assez grande quantité de glycogène, réduit par conséquent ses stocks et diminue ses possibilités de fournir des puissances importantes dans la dernière partie de la course. Selon le niveau d'entraînement, on peut considérer qu'entre 20 min et 1 heure d'effort à I_4 épuise une grande partie des stocks de glycogène. Comme le cycliste a besoin de développer des puissances élevées en fin de course pour prétendre faire un bon résultat, son objectif sera de faire le moins d'efforts possible dans les zones d'intensités supérieures à I_3 pour préserver les réserves de sucre.



non maximal et contrôlable est atteint. À ce stade, il devient important de contrôler efficacement la ventilation en essayant de diminuer au maximum la fréquence respiratoire et en augmentant le volume d'air courant ventilé. L'amélioration du rendement ventilatoire peut être obtenue en inspirant profondément l'air ambiant puis en chassant activement, le plus rapidement possible, le volume d'air ventilé. Cela permet d'expulser le gaz carbonique (CO_2) stocké au niveau pulmonaire dans le temps le plus court. La conversation devient très difficile au sein du groupe. Le sujet s'épuise très rapidement car il utilise préférentiellement ses réserves de glycogène. Il termine son entraînement épuisé, voire en hypoglycémie car les stocks de glycogène ont été en partie épuisés.

2.2.5 Zone d'intensité sur-critique (PMA [96 % $\text{FC}_{\text{max}} < I_5 < 100 \% \text{FC}_{\text{max}}$; 85-100 % PMA]) (figures 4.10, 4.11 et 4.12)

Le coureur est capable selon son niveau d'entraînement de maintenir cette intensité d'exercice entre 4 et 7 min (appelé temps limite d'exercice « t_{lim} »). Il n'est plus possible de stabiliser FC. Elle augmente progressivement (dérive pulsative importante) durant toute la durée de l'exercice et atteint sa valeur maximale au temps limite d'exercice lors du décrochage de l'intensité quand le sujet est à épuisement. FC_{max} n'est pas automatiquement atteinte si le décrochage de l'intensité de l'exercice est psychologique car les limites physiologiques n'ont pas été atteintes. FC n'atteignant jamais un état stable, il devient impossible de fixer un pourcentage de FC_{max} dans cette zone d'intensité. Le meilleur témoin biologique reste donc la dérive rapide de FC. Durant l'exercice, FC ne suit jamais les variations de puissance comme c'est le cas dans les zones d'intensité inférieures. Elle n'a pas le temps de s'installer car la puissance est sur-critique. Elle ne représente donc pas un bon témoin de l'intensité de l'exercice. La vitesse de déplacement augmente nettement pour se situer entre 45 et 50 km/h. L'exercice effectué est très proche de celui réalisé par un coureur lors d'une poursuite sur piste de 4 km ou de celui qui consiste à faire la différence avec le peloton pour créer une échappée lors d'une course sur route. Au début de l'exercice, l'intensité à maintenir semble relativement facile. Toutefois, on ressent spontanément qu'il ne sera pas possible de la maintenir sur une durée très longue car les douleurs musculaires au niveau des membres inférieurs s'installent rapidement et s'accroissent graduellement durant la durée de l'exercice. Elles deviennent très vite excessives et permanentes dans les dernières minutes de l'exercice et insupportables juste avant l'arrêt. Elles n'ont pas réellement le temps de s'installer à d'autres endroits du corps. La puissance de l'exercice correspond à celle supportée au dernier palier d'effort d'un test en laboratoire visant à mesurer la puissance maximale aérobie (PMA). L'exercice

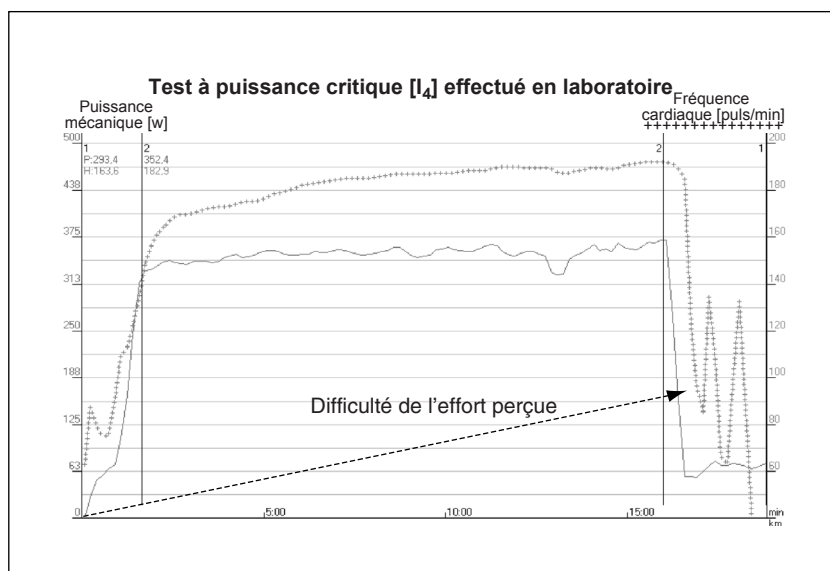


Figure 4.8

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé), de la puissance mécanique (en continu) et de la difficulté de l'effort perçue en zone d'intensité seuil [I_4] lors d'une simulation d'un contre-la-montre en laboratoire. La difficulté de l'effort perçue augmente linéairement et très rapidement pour devenir parfois maximale à la fin de l'effort.

est donc réalisé en utilisant des hautes valeurs de consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$) associées à une importante mise en jeu du métabolisme lactique. En effet, $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ peut être atteinte à la fin

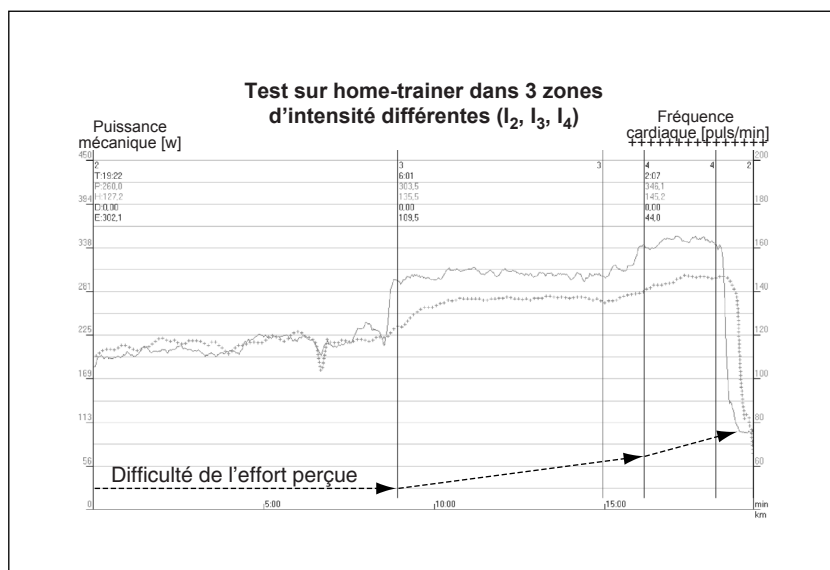


Figure 4.9

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé), de la puissance mécanique (en continu) et de la difficulté de l'effort perçue lors d'un exercice comprenant trois zones d'intensités différentes. Plus l'intensité de l'effort est importante et plus le taux d'augmentation de la difficulté de l'effort perçue par le cycliste est important.

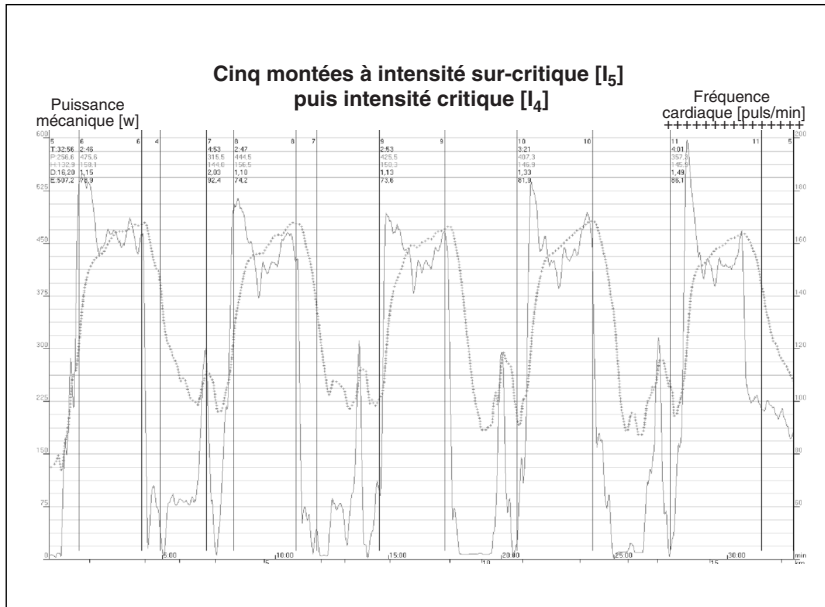


Figure 4.10

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé) et de la puissance mécanique (en continu) en zones d'intensité seuil [I_4] et sur-critique [I_5] lors de cinq montées rapides.

de l'exercice lorsque le cycliste est épuisé. La production de lactate au cours de l'exercice devient supérieure à l'élimination. [La] augmente par conséquent progressivement durant la durée de l'exercice pour atteindre une valeur pouvant se rapprocher de

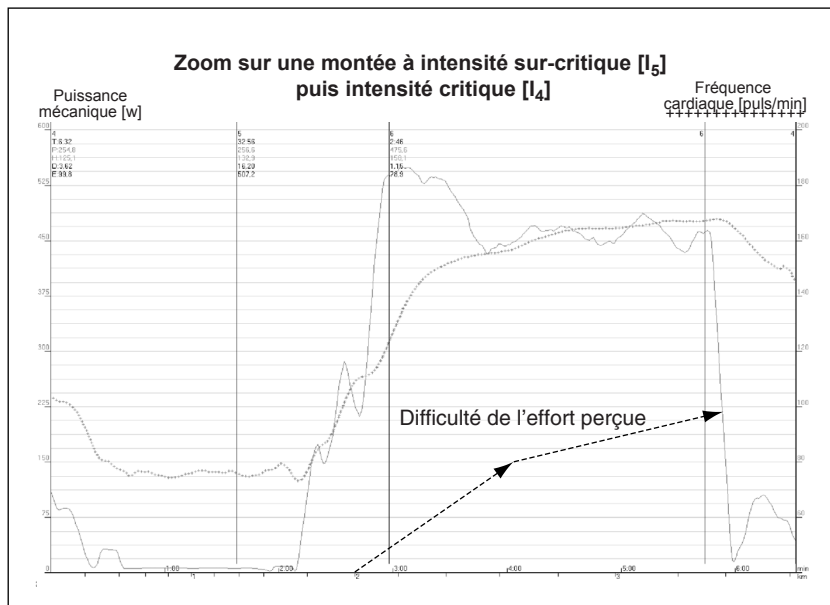


Figure 4.11

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé), de la puissance mécanique (en continu) et de la difficulté de l'effort perçue en zones d'intensité seuil [I_4] et sur-critique [I_5] lors d'une montée rapide.

Conséquences pour le cycliste

La zone d'intensité sur-critique (I_5) représente la zone de tous les dangers pour le cycliste car, autant elle est déterminante pour l'accession à la performance, autant il convient de ne pas trop y « toucher ». En effet, en I_5 , l'accumulation des lactates se fait exponentiellement en fonction d'un niveau de puissance développé. Le cycliste ne peut tenir l'intensité qu'entre 4 et 7 min selon son niveau d'entraînement car toutes les variables physiologiques dérivent rapidement vers le maximum. De plus, la captation de glycogène est très importante. En moyenne, on peut considérer que selon le niveau d'entraînement, 3 à 5 efforts d'une durée de 3 à 4 min à I_5 conduisent à un épuisement des réserves de glycogène. Ainsi, tout va très vite et sans vraiment s'en rendre compte, le cycliste épuise une grande partie de ses stocks de sucre en quelques minutes. Le problème de cette zone d'intensité est que sa reconnaissance perceptive n'est pas évidente lorsque le sportif n'est pas encore calibré et ajusté sur une échelle d'intensité perceptive. En effet, pour une puissance sur-critique donnée, la perception de l'effort augmente exponentiellement en fonction de la durée de l'exercice. Ainsi, sur la première minute d'effort, le cycliste ressent que l'exercice est difficile, il le ressent comme extrêmement difficile dans la seconde partie puis comme maximal lors des dernières 30 secondes. L'objectif est de reconnaître la zone I_5 dès les premières 30 secondes d'exercice en fonction de la dérive perceptive de l'effort importante. À ce stade, il est parfois judicieux en compétition de ne pas continuer l'effort pour ne pas entamer les réserves de glycogène. Au total, on rentre dans l'aspect tactique lié à la gestion des réserves énergétiques (*energy management*).

Un entraînement spécial permet d'améliorer le travail à I_5 en puissance et en durée. Une bonne capacité de performance à I_5 est effectivement importante car, en général, c'est dans cette zone d'intensité que se font la plupart des écarts en compétition. Le problème, il est de taille, c'est que les séances d'entraînement permettant l'amélioration de la capacité de travail à I_5 sont extrêmement difficiles. Elles demandent un engagement physique et mental du sportif très important. Or, nombreux sont les athlètes qui butent sur des entraînements trop difficiles !

la valeur de $[La]_{max}$ obtenue à PMA lors d'un test en laboratoire. L'exercice est réalisé dans un état d'acidose musculaire très important. Il semble qu'en dehors du niveau d'entraînement, le temps limite d'exercice est dépendant de la capacité de l'athlète à pouvoir supporter un haut niveau de douleur musculaire, de la capacité à pouvoir oxyder une quantité importante de lactate et de la gestion de la ventilation. Le faible pH au niveau musculaire atteint en fin d'exercice constitue un facteur important de l'arrêt de l'exercice. L'hyperventilation est maximale en fin d'exercice. La conversation devient naturellement impossible au sein du groupe. L'état d'épuisement du coureur intervient donc au temps limite d'exercice.

2.2.6 Zone d'intensité sous-maximale

$$[I_6] = 100 \% FC_{max} ; 100-200 \% PMA$$

(figure 4.13)

Le coureur se situe dans cette zone d'intensité lorsqu'il effectue un exercice maximal d'une durée comprise entre 30 sec et 1 min environ

Conséquences pour le cycliste

La zone d'intensité sous-maximale (I_6) est particulière pour le cycliste routier dans la mesure où elle renvoie à l'utilisation préférentielle des fibres rapides lors d'efforts qui s'assimilent à des sprints très longs de « tolérance au lactate ». Ainsi, le développement de la capacité de performance dans cette zone d'intensité est dépendant du profil du coureur. Certains ont intérêt à développer le travail musculaire à I_6 (sprinters, cyclistes chargés d'emmener le sprint) alors que d'autres qui n'ont pas les aptitudes physiques requises (faible pourcentage de fibres rapides) n'ont pas d'intérêt particulier à travailler à l'entraînement à I_6 . Pour ces derniers, le travail réalisé en compétition peut largement suffire. En revanche, le sprinter a besoin d'améliorer sa capacité de travail à I_6 car lors d'un sprint massif, le dernier kilomètre est réalisé en moyenne à ce niveau d'intensité avant de terminer les 200 derniers mètres en explosivité à intensité maximale (I_7). Une faible capacité de travail à I_6 pour un sprinter conduit inévitablement vers une diminution dramatique de la puissance développée dans le dernier kilomètre et par conséquent vers un épuisement du sprinter qui devient incapable de fournir l'explosivité à I_7 dont il a besoin sur les 200 derniers mètres du sprint final. L'amélioration de la capacité de travail à I_6 est par conséquent indispensable pour les sprinters. Elle combine le travail de la force maximale à I_7 et le travail de tolérance aux lactates à I_6 .

(effort de résistance) où il fait ce qu'on appelle un effort de « tolérance au lactate ». Cela correspond à un sprint long (km sur piste — cycliste qui emmène son sprinter dans les derniers hectomètres d'une course sur route). FC est proche du maximal à la fin de l'exercice si ce dernier est supérieur à 1 min. La vitesse de déplacement est très importante, entre 50 et 55 km/h. La douleur musculaire s'accroît très rapidement dans les membres inférieurs et devient très vite insupportable. Cela est essentiellement dû à l'augmentation rapide de [La]. La souffrance est maximale à la fin de l'exercice et est proche de celle relevée au dernier palier de puissance (PMA) d'un test en laboratoire. La ventilation augmente très rapidement durant l'exercice et est maximale à l'arrêt de l'exercice où le coureur a tout donné et est complètement épuisé. Une sensation de fatigue nerveuse importante est généralement relevée.

2.2.7 Zone d'intensité maximale (force – vitesse) [I_7 = 90-95 % FC_{max} ; 200-300 % PMA] (figure 4.14)

Le coureur se situe dans cette zone d'intensité lorsqu'il réalise un sprint maximal sur une durée inférieure à 7 sec. L'effort est de type force-vitesse. FC n'est jamais maximale à la fin du sprint car elle n'a pas le temps de monter très haut. La vitesse de déplacement est maximale entre 55 et 60 km/h selon la puissance maximale développée. Le sujet ne ressent absolument aucune douleur au niveau musculaire. Il ne perçoit aucune accumulation de lactate dans les membres inférieurs. Une montée de lactate significative est ressentie signifie que si

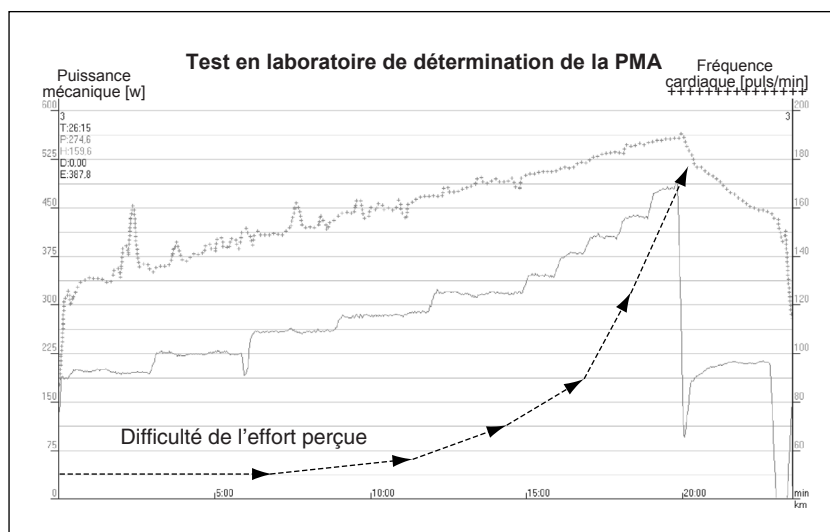


Figure 4.12

Évolution de la fréquence cardiaque (en pointillé), de la puissance mécanique (en continu) et de la difficulté de l'effort perçue lors d'un test d'évaluation de la PMA en laboratoire traversant les zones d'intensité légère [I_1] à sur-critique [I_7]. La difficulté de l'effort perçue augmente exponentiellement en fonction de la puissance développée. C'est pourquoi, lorsque le cycliste dépasse son seuil anaérobie (I_4), la difficulté perçue augmente très rapidement et l'exercice ne dure plus très longtemps. Sur l'échelle CR10 de Borg le seuil anaérobie se situe au alentour des valeurs 5 à 6.

l'exercice a été réalisé sur une durée trop longue. L'intensité dans ce cas ne peut plus être considérée comme maximale. La fatigue ressentie est de type essentiellement nerveuse (mentale). Les symptômes sont la tête qui tourne et la sensation d'un état d'étourdissement général. Une accélération maximale (départ à l'arrêt) sur 20 tours de pédale définit bien cette zone d'intensité. Elle permet

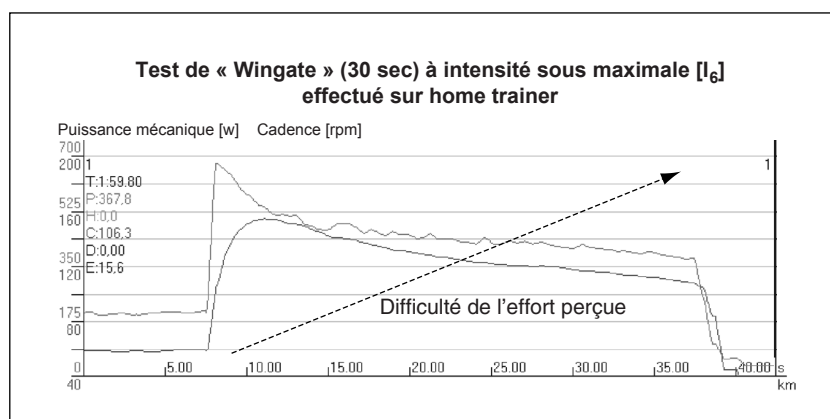


Figure 4.13

Evolution de la cadence (courbe inférieure), de la puissance mécanique (courbe supérieure) et de la difficulté de l'effort perçue lors d'un test de Wingate sur 30 sec réalisé à intensité sous-maximale [I_6]. La difficulté de l'effort perçue augmente dramatiquement pour devenir maximale très rapidement. Cela est essentiellement dû à l'accumulation des lactates et de la baisse du pH intra-musculaire.

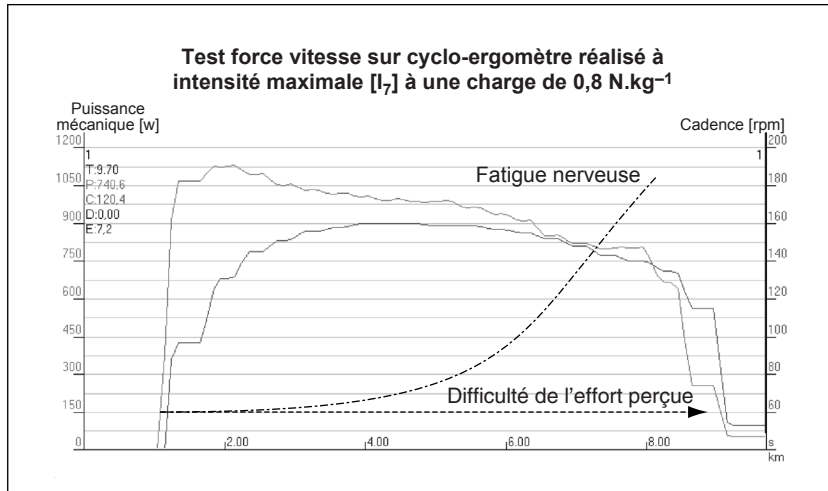


Figure 4.14

Evolution de la fréquence de pédalage (courbe inférieure), de la puissance mécanique (courbe supérieure) et de la difficulté de l'effort perçue lors d'un test force-vitesse réalisé à intensité maximale [I₇]. La difficulté de l'effort perçue par le cycliste est quasi absente car l'exercice de sprint demande une libération d'énergie très rapide avec un arrêt de l'effort avant que les lactates ne s'accumulent. En revanche, c'est davantage la fatigue nerveuse qui augmente avec la succession des sprints. Le pic de puissance est dans cet exemple de 1125 W. Pour un coureur de 70 kg, cela représente une puissance maximale de 16,07 W/kg.

d'atteindre la puissance mécanique maximale ($P_{\text{ext max}}$) vers 2 à 3 sec d'exercice qui correspond au moment où le produit de la force appliquée par le cycliste sur la pédale et de la vitesse de pédalage est maximal. Durant les quelques secondes de l'exercice, la force appliquée sur la pédale diminue linéairement en fonction du temps. Les niveaux de force maximale sont atteints sur les 2 à 3 premières secondes de l'exercice. Ensuite, le coureur qui a terminé d'accélérer son poids, parvient grâce à l'énergie cinétique de translation,

Conséquences pour le cycliste

La zone d'intensité maximale (I₇) est facilement reconnaissable par le cycliste puisqu'elle renvoie à un effort explosif de quelques secondes. Il est important de ne pas dépasser 7 secondes d'exercice car au-delà de ce temps, la lactatémie augmente très rapidement dans les membres inférieurs et l'effort bascule vers un exercice de type tolérance aux lactates sur la zone d'intensité 6. La principale difficulté pour le cycliste est d'être capable de libérer le maximum d'énergie dans un temps très court. C'est pourquoi la motivation doit être grande, l'état d'excitabilité optimal et l'organisme relativement frais. En effet, il n'est pas conseillé de faire des séances à I₇ sur un organisme fatigué car le seuil d'excitabilité du sportif ne le permet pas. L'entraînement à I₇ développe essentiellement la force maximale. Ce sont les fibres rapides qui sont préférentiellement recrutées sur des exercices qui requièrent une force très élevée sur les premiers tours de pédale et ensuite une vitesse gestuelle importante. L'exercice idéal pour le cycliste est celui qui consiste à réaliser une accélération maximale sur 7 secondes à partir d'une vitesse initiale la plus faible possible. En d'autres termes, il accélère son propre poids sur quelques secondes d'exercice. Au début de l'exercice, la vitesse étant très faible, l'accélération du poids demande le développement d'un niveau de force très élevé. En revanche, dès que la vitesse devient importante, le niveau de force diminue dramatiquement et c'est la vitesse gestuelle qui prend le relais. Cette dernière est dépendante des qualités de force mais également de la technique de pédalage du coureur. ATP-CP et les phosphagènes sont les substrats principalement utilisés lors de ce type d'exercice. Ils sont rapidement synthétisés et permettent de répéter plusieurs sprints.

à maintenir une vitesse de déplacement élevée même avec la diminution dramatique de la force. L'intensité maximale de l'exercice demande au cycliste d'être au maximum de sa concentration pour mobiliser un niveau d'activation mentale le plus élevé possible. C'est la répétition des exercices qui entraînent la baisse progressive du niveau d'activation mentale et par voie de conséquence la diminution des ressources énergétiques nécessaires au développement de la puissance maximale. Cinq exercices maximaux suffisent à diminuer significativement le niveau de $P_{\text{ext max}}$, même si la récupération qui suit l'exercice est longue. La principale difficulté réside dans la manière de se concentrer sur la tâche à accomplir qui induit une fatigue centrale, nerveuse et mentale progressive au cours de la série d'exercices sans apparition de douleur au niveau des membres inférieurs. La restauration des réserves énergétiques en phosphagènes (ATP-CP) est relativement rapide comparée au rétablissement du niveau d'activation qui demande un temps supérieur.

2.3 Évolution de la fréquence cardiaque en fonction de l'échelle d'ESIE

La figure 4.15 schématise l'évolution de la fréquence cardiaque en fonction des différentes intensités de travail de l'échelle d'ESIE. Jusqu'à l'intensité seuil (I₄), la fréquence cardiaque se stabilise en état stable sans dérive cardiaque. La dérive cardiaque apparaît toujours à des niveaux d'intensité supérieurs au seuil anaérobie (supérieurs à I₄) où l'état stable de la fréquence cardiaque devient impossible. Plus l'intensité est supérieure au seuil anaérobie et plus la dérive cardiaque est prononcée (dérive à I₆ > dérive à I₅). Il peut y avoir une dérive cardiaque à I₄ si l'exercice est réalisé en ambiance très chaude (montée de col sous une grande chaleur, test en laboratoire). Plus l'intensité de l'exercice est faible et plus la variabilité de la fréquence cardiaque durant l'exercice est importante. Ainsi, la variabilité de FC diminue progressivement jusqu'à I₄ où il est possible d'observer durant l'exercice de CLM une très faible variabilité de FC (voir chapitre sur le CLM).

2.4 Échelle d'ESIE et balance du métabolisme énergétique

La figure 4.16 montre l'évolution approximative de la consommation de glycogène et de lipides en fonction des différentes zones d'intensité de l'échelle d'ESIE. Plus l'intensité de l'exercice augmente et plus les réserves de glycogène diminuent. On observe que la glycolyse augmente exponentiellement avec l'intensité de l'exercice. Inversement,

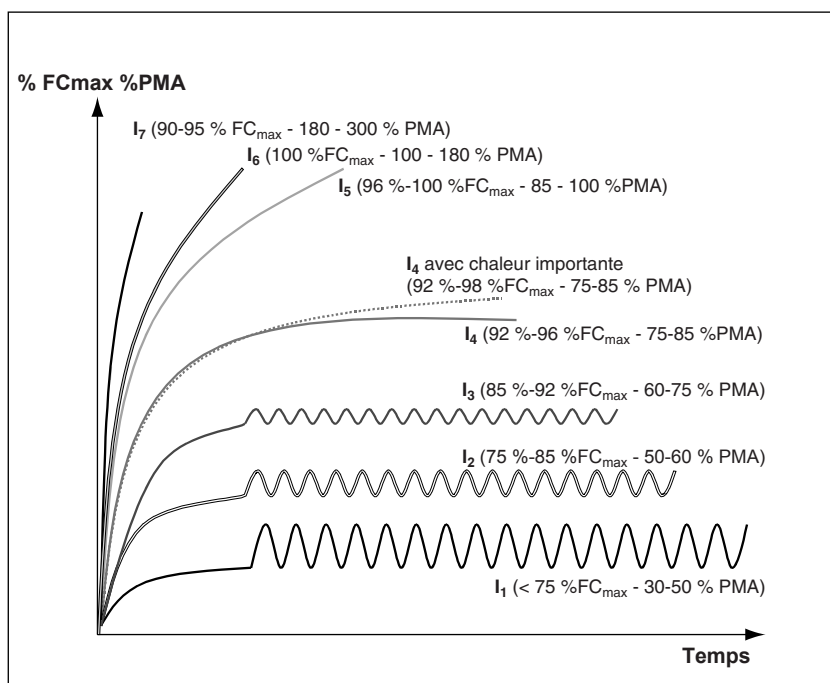
Conséquences pour le cycliste

La notion de dérive cardiaque est très importante pour le cycliste lors de l'entraînement et en compétition. Il est fondamental qu'il connaisse l'évolution de la fréquence cardiaque en fonction du temps en relation avec différentes intensités de travail. En effet, comme nous l'avons préalablement évoqué, la valeur de la FC ne reflète pas toujours l'intensité du travail fourni. Pour des intensités de travail supérieures à I_1 , le cycliste ne doit surtout pas se fier à la FC pour calibrer l'intensité de l'exercice. S'il le fait, il verra sa vitesse de déplacement diminuer pour permettre à la FC de se stabiliser et l'intensité de l'exercice diminuera au lieu de rester stable. Au total, l'objectif de la séance n'aura pas été atteint. C'est pourquoi les meilleurs témoins pour travailler spécifiquement à des niveaux d'intensités supérieurs à I_4 sont la vitesse de déplacement, la cadence de pédalage pour un développement donné, la puissance développée et la perception de l'exercice. À savoir qu'un cycliste se connaissant très bien est capable de calibrer perceptivement une intensité d'exercice à 10 W près. Dans les faibles intensités de travail (I_1 , I_2) la perception de l'exercice est beaucoup plus sensible pour le calibrage de l'intensité que la lecture de la FC sur la montre cardiaque. Des variations de 10 à 15 pulsations sont courantes pour des sensations perceptives relativement proches. Il est par conséquent conseillé de travailler davantage à partir des sensations que l'on ressent.

Au total, ce qu'il convient de faire, c'est davantage analyser la cinétique de la FC en fonction du temps et par conséquent d'interpréter les variations de FC dans leur globalité plutôt que d'analyser les valeurs seules sans prendre en considération la notion de temps. C'est la comparaison des différents relevés de FC à partir des différentes séances d'entraînement et des compétitions combinées aux sensations perceptives du cycliste qui donnera du sens à l'analyse.

plus l'intensité de l'exercice est faible et plus l'exercice est réalisé à partir de l'oxydation des graisses. Il est important que le cycliste garde en mémoire le fonctionnement de la balance du métabolisme énergétique orienté plus ou moins vers la consommation de glucose ou de lipides selon la puissance qu'il développe. Le réservoir lipidique étant inépuisable, il convient de ne pas oublier que les réserves de glycogène sont, elles, relativement faibles. Il faut donc les gérer de façon optimale en faisant le moins possible d'efforts sur-critiques.

Zones d'intensité Échelle d'ESIE	Bien entraîné	Non entraîné
Maximale (I_7)	—	—
Sous-maximale (I_6)	30 sec - 2 min	< 30 sec
Sur-critique (I_5)	4-7 min	< 3 min
Seuil (I_4)	20 min - 1 h	< 20 min
Soutenue (I_3)	2-3 h	< 45 min
Moyenne (I_2)	> 5 h	< 2 h
Légère (I_1)	> 7 h	< 3 h



En fonction de l'état d'entraînement du cycliste, il est possible d'extrapoler le temps maximal que le sportif peut tenir dans chaque zone d'intensité (tableau 4.4). La durée maximale de l'effort est dépendante des stocks de glycogène et de l'intensité de l'exercice. Au total, l'objectif d'un cycliste routier est de préserver au maximum ses réserves en glycogène afin d'utiliser le sucre comme carburant essentiel lors de la fin de la course où l'intensité de l'exercice augmente. Étant bien entraîné, s'il a par exemple déjà passé 3 min en intensité 5, 30 min en intensité 4 et 1h30 en intensité 3 alors il doit savoir que ses réserves de glycogène ont été largement entamées et sont proches de l'épuisement. Même si les sensations sont encore bonnes,

Figure 4.15

Évolution de la fréquence cardiaque (FC) dans les différentes zones d'intensité de l'échelle d'ESIE (I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 , I_6 , I_7) en fonction du pourcentage de la fréquence cardiaque maximale (%FCmax) et du pourcentage de la Puissance Maximale Aérobie (% PMA). À noter que lorsque l'intensité de l'exercice devient supérieure au seuil anaérobie (sup. à I_4) on observe une dérive cardiaque. Plus l'intensité est supérieure à I_4 et plus la dérive cardiaque est importante.

Tableau 4.4

Durée maximale de l'exercice dans chaque zone d'intensité de l'échelle d'ESIE en fonction de l'état d'entraînement du cycliste (bien entraîné, non entraîné). La durée de maintien maximale dans chaque zone est dépendante de la consommation de glycogène et de la quantité des stocks de glycogène. Les temps de maintien concernent des cyclistes adultes.

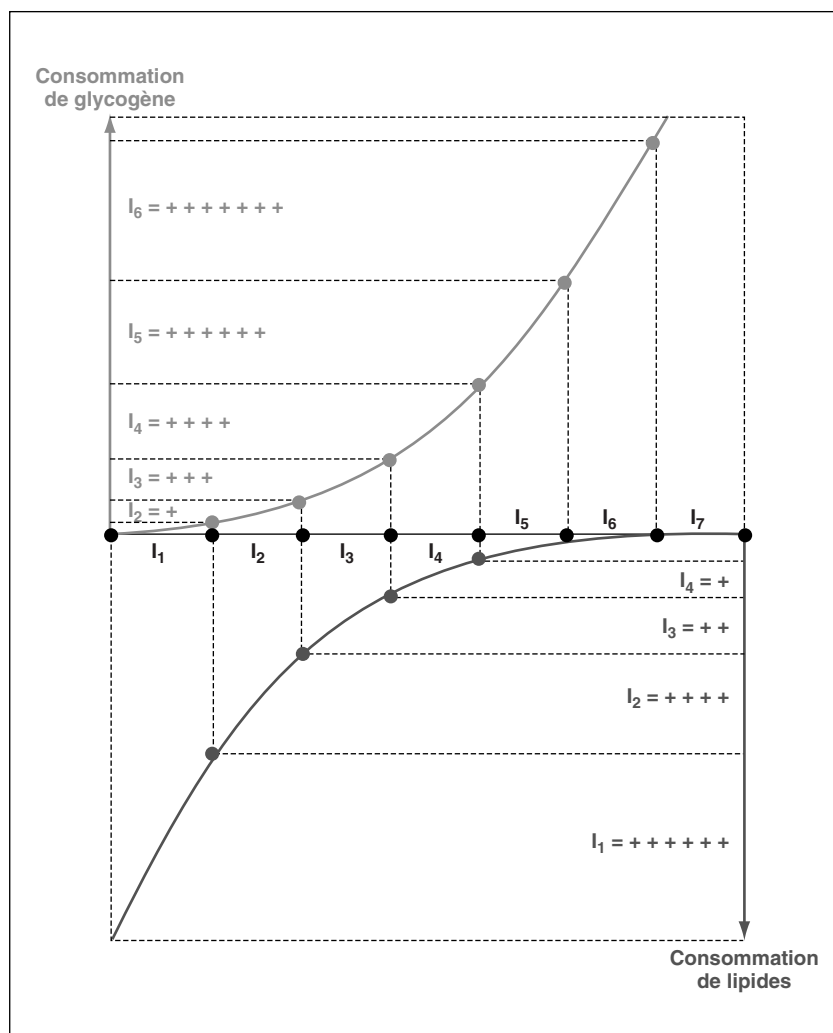


Figure 4.16

Consommation de glycogène et de lipides lorsque l'exercice est réalisé dans les différentes zones d'intensité de l'échelle d'ESIE.

Tableau 4.5

Estimation de la puissance mécanique (P_{ext} , W) et de la vitesse de déplacement (km/h) sur le plat d'un cycliste ayant une PMA de 450 W dans les différentes zones d'intensité de l'échelle d'ESIE. La vitesse a été estimée à partir d'un modèle ayant les caractéristiques suivantes : $SC_x = 0.30 \text{ m}^2$ (SC_x moyen pour un cycliste en position mains en bas du guidon) ; Masse volumique de l'air $\rho = 1,225 \text{ Kg.m}^{-3}$ ($T = 15^\circ\text{C}$; altitude = 0 m) ; Coefficient de roulement $C_r = 0.003$ (C_r moyen) ; Masse du cycliste $M = 80 \text{ kg}$ (sujet + bicyclette). Pour l'explication du modèle, voir chapitre « Modélisation de la performance ».

Zones	Intensité de l'exercice	Puissance (W)	Vitesse (km/h)	Puissance arbitraire
Légère	Intensité 1 (30-50 % PMA)	203	35	2
Moyenne	Intensité 2 (50-60 % PMA)	248	38	2,5
Soutenue	Intensité 3 (60-75 % PMA)	293	40	3
Seuil	Intensité 4 (75-85 % PMA)	349	43	3,5
PMA	Intensité 5 (85-100 % PMA)	450	47	4,5
Sous max	Intensité 6 (100-180 % PMA)	675	55	7
Max	Intensité 7 (180-300 % PMA)	1125	65	11

l'hypoglycémie n'est pas loin et peut intervenir d'un moment à l'autre. Ainsi, le coureur doit intégrer en permanence lors de l'exercice la dynamique de la balance énergétique et estimer au plus près le temps disponible qu'il lui reste pour faire des efforts sur-critiques.

2.5 Correspondance entre échelle d'ESIE et puissance mécanique

Il a été rapporté que la relation qui existe entre l'évaluation de la perception de l'exercice (RPE) et l'intensité de l'exercice exprimée à partir de la concentration en lactate n'est pas linéaire mais exponentielle (Borg et coll., 1976 ; Banister et Hamilton, 1985 ; Borg, 1998). Une relation exponentielle existe également entre la puissance mécanique développée par le cycliste et les différentes zones d'intensité de l'échelle d'ESIE (tableau 4.5, figure 4.17).

3. Utilisation de l'échelle d'ESIE pour l'entraînement

3.1 Modèles de séances d'entraînement types en fonction de l'échelle d'ESIE

Le tableau 4.6 présente 15 modèles de séances d'entraînement types que le cycliste peut utiliser régulièrement au cours de l'année en fonction des aptitudes spécifiques qu'il souhaite développer ou entretenir. Les modèles de séances d'entraînement sont les suivantes :

1. Récupération — régénération
2. Déblocage
3. Endurance de base (End)
4. Endurance critique (End critique)
5. Endurance sur-critique
6. Rythme
7. Puissance seuil (PS)
8. Puissance maximale aérobie (PMA) — Séance courte
9. Puissance maximale aérobie — Séance longue
10. Tolérance aux lactates
11. Force sous-maximale
12. Force maximale
13. Vitesse
14. Technique de pédalage
15. Échauffement avant un contre-la montre.

Chaque modèle de séance d'entraînement renvoie à une aptitude spécifique et à huit critères qui la définissent :

1. Objectif de la séance,
2. Quand réaliser la séance durant l'année,
3. Zone d'intensité de l'exercice (en fonction de l'échelle d'ESIE),
4. Durée de la séance,
5. Spécificité de l'exercice durant la séance,
6. Sensations ressenties durant l'exercice,
7. Évolution des principales variables physiologiques,
8. Durée de la récupération.

La description des exercices est réalisée avec la prise en compte de l'intensité de l'effort à partir de l'échelle d'ESIE. La charge de travail des séances

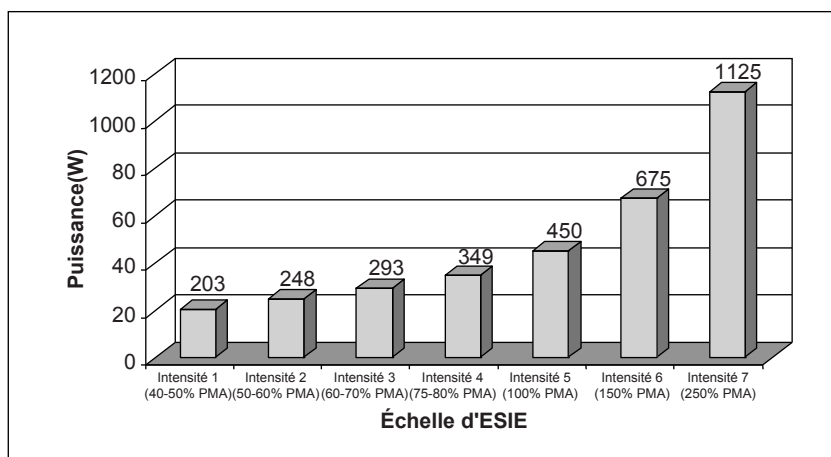


Figure 4.17

Évolution de la puissance mécanique à l'intérieur de chaque zone d'intensité de l'échelle d'ESIE pour un cycliste ayant une PMA de 450 W (adapté du tableau 3.4).

est donc fonction du temps passé à l'intérieur de chaque zone d'intensité. Le nombre de séances présentées dans le tableau 4.6 n'est pas exhaustif. Le but est simplement de présenter différents modèles de séances d'entraînement très spécifiques. Chaque modèle peut être appliqué comme tel mais peut également être dérivé avec des variantes. L'essentiel est de respecter la forme du modèle, le contenu pouvant évidemment évoluer. Il convient aussi d'adapter les modèles de séances en fonction de l'âge et du niveau d'entraînement des cyclistes en sachant que les modèles proposés sont construits pour des cyclistes de haut niveau. Mais chaque catégorie peut construire ses propres modèles de séances d'entraînement à partir des bases essentielles des modèles de départ proposés.

La construction d'un plan d'entraînement rationnel après une période de coupure assez longue (hivernale) permettant au cycliste d'arriver au plus haut niveau de sa capacité de performance peut se bâtir de la manière suivante sur environ **15 semaines** :

- **4 semaines** : bloc d'entraînement en endurance fondamentale pour préparer l'organisme à assimiler les blocs de travail intensifs qui vont suivre.
- **1 semaine** : de décharge (70 % de la charge de travail moyenne).
- **3 semaines** : bloc d'entraînement en endurance fondamentale + endurance critique + force max + force sous-max pour préparer le muscle à assimiler les séances difficiles où le muscle devra supporter des niveaux de force importants.
- **1 semaine** : de décharge.
- **3 semaines** : bloc d'entraînement en endurance fondamentale + endurance sur-critique + puissance seuil + tolérance aux lactates : pour maximiser la capacité de performance et amener le cycliste au plus haut niveau de sa capacité de performance.
- **1 semaine** : de décharge.

Tableau 4.6

Exemples de modèles de séances d'entraînement types

Aptitudes à développer	Objectif	Quand ?	Zone d'intensité	Durée	Spécificité de l'ex.	Sensations	Variables physio	Récupération
1 Récupération – régénération	- Oxygénation active des muscles - Élimination des déchets et toxines - Drainage musculaire	- Le lendemain d'une course - Lors d'une période de fatigue	I_1 à I_2	1h – 2h	Rouler sur un parcours relativement plat	- Ex. réalisé avec une grande aisance et souplesse d'exécution - Aucune fatigue en fin d'ex.	FC stable et basse	Immédiate
2 Déblocage	- Réveil musculaire - Réactivation nerveuse - Rappel des différentes zones d'intensité - Atteinte d'un seuil d'excitabilité musculaire optimal avant la course	- La veille d'une course - Avant un CLM	I_2 à I_7	1h30 20' éch. (I_1 - I_2) + ... 3 × [sprint (I_7) + 10' (I_1) + ... 5' (I_4) + 1' (I_5) + 10' (I_2)]	- Fpéd = 90-100 rpm sur le plat et 80-90 rpm en montagne - Maintien de l'intensité cste à I_3, I_4 et I_5 - Position spécifique de compét. - Exécution des sprints dans les positions assis + danseuse - Développement de la puissance max dans chaque sprint	- Maintien d'un niveau de force important sur la pédale - Concentration maximale sur la technique de pédalage - Fatigue nerveuse à l'issu de chaque sprint - Légère ↑ de [La] en fin d'ex.	- FC stable à I_3 et I_4 - FC n'est jamais max après les sprints - Hyperventilation volontaire pdt 15 sec - immédiatement après le sprint et I_5	1h
3 Endurance de base	Entretien de la capacité de performance en endurance sans augmentation du niveau de fatigue général	- Période d'affûtage - Reprise de l'entraînement après une longue coupure - pour un niveau de fatigue général élevé	I_2	- Jusqu'à l'obtention des premiers signes d'arrivée de la fatigue générale - En groupe : tps entraînement = tps course – 1h - Seul : tps entraînement = tps course – 2h	- Fpéd = 80-90 rpm sur le plat et en montée - Maintenir I_2 sur parcours facile - Arrêt de la séance dès que la fatigue s'installe	Ex. réalisé avec une grande aisance et souplesse d'exécution	FC stable et relativement basse	1h-4h

Aptitudes à développer	Objectif	Quand ?	Zone d'intensité	Durée	Spécificité de l'ex.	Sensations	Variables physio	Récupération
4 Endurance critique	- Être capable de rouler à I_2-I_3 sans problème sur la durée des courses classiques ↑ le niveau d'endurance de base	- En préparation des courses à venir - En période précompétitive et compétitive	$I_2 - I_3 - I_4$	Augmentation progressive de la durée de l'ex. par rapport à la durée de la course objectif : + 20 min puis, + 30 min ; + 45 min ; + 1h.	- Travailler sur des parcours proches de ceux réalisés en course - rouler seul entre I_2 et I_3 en maintenant bien l'intensité de l'ex. ou en groupe avec des relais - Rouler derrière un dery à I_3 durant les 2 dernières heures d'une séance longue de volume. - Travailler entre I_2 et I_4 (50 % I_2 + 40 % I_3 + 10 % I_4) - Réaliser toutes les heures une montée progressive en intensité de I_2 à I_4 de type : I_2 (30') + I_3 (20') + I_4 (10') - La durée de l'entraînement détermine le nombre de montées progressive en intensité.	- La fatigue musculaire locale apparaît progressivement avec la durée de l'ex. - Souplesse du coup de pédale - Fatigue générale importante mais pas d'épuisement en fin de séance - S'arranger pour que la fatigue générale soit importante sur la durée du temps spécifique de course	- FC stable à I_2 et I_3 - Aucun essoufflement, pas d'hyperventilation. ↑ de [La] mais non maximale car oxydation durant l'ex.	24h-48h
5 Endurance sur-critique	- En préparation aux courses non classiques d'une durée supérieure à la moyenne - Être capable de rouler à I_2-I_3 sur une durée > de 30 min à 1h au temps de la course objectif ↑ niveau d'endurance critique	- En préparation des courses longues à venir - En période compétitive exclusivement	$I_2 - I_3 - I_4$	- Idéal : rouler après une course sur une fatigue générale déjà importante (seul, en groupe ou derrière un dery) ↑ progressivement la durée jusqu'à + 1h	- Travailler sur des parcours proches de ceux réalisés en course - L'idéal, est de renfourcher le vélo juste après une course sans observer plus de 15 min de récup. - Rouler seul entre I_2 et I_3 en maintenant bien l'intensité de l'ex. ou en groupe avec des relais - Rouler derrière un dery à I_3 durant les 2 dernières heures d'une séance longue de volume. - Travailler entre I_2 et I_4 (50 % I_2 + 40 % I_3 + 10 % I_4) - Réaliser toutes les heures une montée progressive en intensité de I_2 à I_4 de type : I_2 (30') + I_3 (20') + I_4 (10') - La durée de l'entraînement détermine le nombre de montées progressive en intensité.	- Fatigue musculaire locale importante en fin de séance - Souplesse du coup de pédale - Fatigue générale maximale et épuisement en fin de séance - Les différentes montées progressives en intensité déterminent une montée progressive du niveau de fatigue générale et périphérique	- FC stable à I_2 et I_3 - Aucun essoufflement, pas d'hyperventilation. ↑ de [La] mais non maximale car oxydation durant l'ex.	48h-72h

CYCLISME ET OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE

Conformément à l'esprit de la collection « Sciences et pratiques du sport », l'auteur relie constamment connaissances scientifiques et applications pratiques afin de permettre au lecteur de mieux appréhender les concepts développés et d'enrichir son savoir personnel.

Les apports théoriques renvoient à de nombreuses références bibliographiques à la fin de chaque chapitre. Les connaissances pratiques sont davantage centrées sur la méthode de l'auteur, et de certains de ses collaborateurs, qui, en plus d'être un universitaire (enseignant chercheur), est Directeur de la Performance de l'équipe cycliste professionnelle Groupama-FDJ.

La 4^e édition propose un nouveau chapitre « Séances d'entraînement sur home-trainer » qui s'inscrit pleinement dans le contexte actuel de l'entraînement indoor, où le coureur se connecte sur des plates-formes offrant des espaces d'entraînement virtuels. 20 séances spécifiques sont développées pour améliorer le potentiel physique et mental et ce dans différentes dimensions.

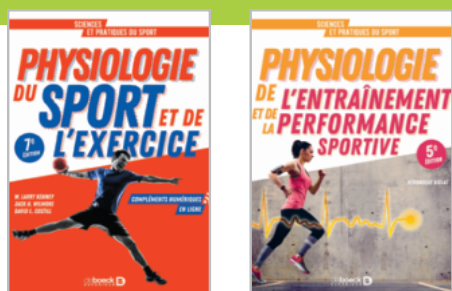
PUBLIC

passionnés de cyclisme
coureurs
entraîneurs en STAPS
médecins du sport

L'AUTEUR

Docteur en Sciences de la Vie et de la Santé (Ph.D.) et Maître de Conférence Universitaire HDR à l'UPFR-Sports de Besançon, Fred Grappe est également titulaire du Brevet d'Etat 2^e degré en cyclisme et du diplôme de Maître-Nageur Sauveteur. Il a été entre 2000 et 2015 entraîneur de l'équipe cycliste professionnelle FDJ. Il a également été pendant 10 ans (entre 1998 et 2008) conseiller scientifique de la Fédération Française de Cyclisme où il a été à l'origine de la création du Département Performance de la FFC. Depuis 2015 il est Directeur de la Performance de l'équipe cycliste Groupama-FDJ. Il est l'auteur de nombreuses publications scientifiques essentiellement portées sur la physiologie et la biomécanique du cyclisme.

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR



ISBN : 978-2-8073-3648-3



9 782807 334939

deboeck
SUPÉRIEUR **B**

www.deboecksuperieur.com