

BOG/5974-19/09

Doc 574-19/09

N° d'ordre

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENNE (U.S.T.H.B. ALGER)

INSTITUT DES SCIENCES DE LA NATURE
(I . S . N .)

Handwritten signature

31/3/82

THESE

D 29

présentée à l'U.S.T.H.B. pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR ES-SCIENCES
PHYSIOLOGIE ANIMALE**

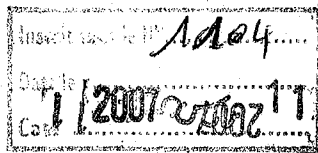
par

Abderrahim BRIKCI

**PROFIL PHYSIOLOGIQUE DES ATHLETES DE HAUT NIVEAU
Description et Outils d'évaluation**

soutenue publiquement le devant le Jury

B. ASSELAH	Professeur	U.S.T.H.B.	Président
J.R. LACOUR	Professeur	Saint-Etienne	Rapporteurs
Y. DAHMANI	Maître de conférence	U.S.T.H.B.	
R. BOUGHERBAL	Docent	C.N.M.S.	Examineurs
N. DEKKAR	Docent	I.N.S.P.	
P. VANUXEM	Professeur	Marseille	



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENNE (U.S.T.H.B. ALGER)

INSTITUT DES SCIENCES DE LA NATURE
(I . S . N .)

B/1383

THESE

présentée à l'U.S.T.H.B. pour l'obtention du grade de

DOCTEUR ES-SCIENCES

PHYSIOLOGIE ANIMALE
(*physiologie de l'exercice musculaire*)

par

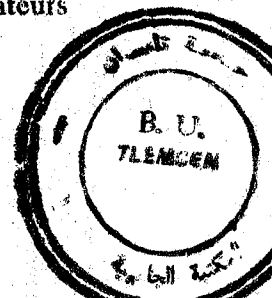
Abderrahim BRIKCI

PROFIL PHYSIOLOGIQUE DES ATHLETES DE HAUT NIVEAU
(*Description et Outils d'évaluation*)

soutenue publiquement .

devant le Jury

B. ASSELAH	Professeur	U.S.T.H.B.	Président
J.R. LACOUR	Professeur	Saint-Etienne	Rapporteurs
Y. DAHMANI	Maître de conférence	U.S.T.H.B.	
R. BOUGHERBAL	Docent	C.N.M.S.	Examineurs
N. DEKKAR	Docent	I.N.S.P.	
P. VANUXEM	Professeur	Marseille	



**A la mémoire de mon père
à mes proches
à mes amis.**

REMERCIEMENTS

Il nous est particulièrement agréable de pouvoir exprimer notre profonde gratitude envers tous ceux qui nous ont aidé à réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au Professeur **J.R. LACOUR**. Nous considérons comme un réel privilège de travailler sous sa direction. Sa riche expérience et sa compétence ont été des exemples stimulants. Nous le remercions très vivement pour ses précieux conseils, pour sa totale disponibilité et pour son accueil chaleureux dans son service.

Nous sommes heureux d'exprimer notre gratitude au Professeur **Y. DAHMANI** qui a bien voulu accepter d'assurer le suivi de ce travail. Par ses conseils et sa compétence, elle a largement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Monsieur le Professeur **B. ASSELAH** nous a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury; nous sommes heureux de l'en remercier et de bénéficier de ses compétences bien établies dans les domaines des sciences du sport.

Nous remercions le Professeur **R. BOUGHERBAL**, chef de service au Centre National de Médecine du Sport, d'avoir bien voulu accepter de participer au Jury et de nous avoir permis de poursuivre nos activités scientifiques dans son service. Les échanges que nous avons eu avec lui nous ont été très utiles et agréables.

Le Professeur **N. DEKKAR** nous a séduit par son savoir, son intelligence et son dynamisme. Il nous a constamment encouragé et éclairé de ses nombreux conseils depuis la rédaction du projet de ce travail, jusqu'à la correction du texte final. A aucun moment, il n'a ménagé son temps, ni ses conseils. Sa sollicitude attentive et patiente nous a été d'un grand secours. De plus, il a mis à notre disposition avec une constante bienveillance les moyens de travail favorables dans un service particulièrement accueillant, nous tenons à l'assurer de notre profond attachement.

Nous avons eu le plaisir de bénéficier de la riche expérience de Monsieur le Professeur **P. Vanuxem**, par ses conférences et ses écrits. Nous sommes heureux qu'il puisse participer à notre Jury.

Nous tenons également à remercier Monsieur **M.-S. MENTOURI**, Président du Comité Olympique Algérien, qui a toujours été très sensible et réceptif à l'égard de l'option scientifique. Nous saisissons cette occasion pour lui exprimer notre gratitude pour l'attention qu'il a bien voulu porter à ce travail, pour ses encouragements et pour son soutien tant moral que matériel.

A une phase critique de ce travail, Monsieur **B. SIMOHAMED** nous a accueilli au Comité Olympique Algérien, alors qu'il assumait la Présidence. Il a mis à notre disposition tous les moyens de sa structure pour nous permettre de mener à bien la rédaction de ce travail. Il nous a accordé sa confiance et son concours et nous a constamment encouragé. Nous souhaitons qu'il puisse trouver ici l'assurance de notre respectueuse gratitude.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude aux entraîneurs et aux athlètes qui se sont prêtés avec une bonne volonté constante aux épreuves expérimentales.

Enfin, qu'il me soit permis de remercier ma femme et mes enfants pour la compréhension dont ils ont fait preuve pendant la préparation et la rédaction de ce mémoire.

SOMMAIRE

I N T R O D U C T I O N	1
CHAPITRE 1.: BASES PHYSIOLOGIQUES	11
1.1. ENERGETIQUE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE	13
1.1.1. GENERALITES	13
1.1.2. MECANISMES DE RECONSTITUTION DE L'ATP	18
1.1.3. CARACTERISTIQUES DES TROIS SOURCES D'ENERGIE	22
1.1.4. UTILISATION DES TROIS SOURCES D'ENERGIE	23
1.1.5. MESURE DE L'ENERGIE DEPENSEE	26
1.2. SYSTEMES DE TRANSPORT ET D'UTILISATION DE L'O ₂	27
1.2.1. LA VENTILATION PULMONAIRE	30
1.2.2. ECHANGES GAZEUX DANS LES POUMONS ET LES TISSUS	34
1.2.3. TRANSPORT CIRCULATOIRE	36
1.2.4. CONSOMMATION D'OXYGENE ET EXERCICE	44
1.2.5. LES REGULATIONS RESPIRATOIRE ET CIRCULATOIRE	53
CHAPITRE 2.: LA CAPACITE AEROBIE	55
2.1. INTRODUCTION	55
2.2. MATERIEL ET METHODES	58
2.3. RESULTATS	72
2.4. DISCUSSION	92
2.4.1. CAPACITE AEROBIE ET SPORTS DE PERFORMANCE	92
2.4.2. VALIDATION D'EPREUVES DE MESURE DE VO ₂ max EN LABORATOIRE	105
2.4.3. VALIDATION DE LA COURSE DE 5 min POUR LA MESURE DE VO ₂ max SUR LE TERRAIN	110
2.5. CONCLUSION	113
CHAPITRE 3.: LE SEUIL ANAEROBIE	115
3.1. INTRODUCTION	115
3.1.1. HISTORIQUE	115
3.1.2. INTERPRETATIONS BIOCHIMIQUES DU SEUIL ANAEROBIE	117
3.1.3. LE SEUIL ANAEROBIE ET LA PERFORMANCE ATHLETIQUE	119
3.1.4. TECHNIQUES D'EVALUATION DU SEUIL ANAEROBIE	120
3.1.5. OBJECTIFS	121
3.2. MATERIEL ET METHODES	122
3.3. RESULTATS	126

S O M M A I R E

3.4.	DISCUSSION	134
3.4.1	ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODOLOGIE	135
3.4.2	CINETIQUE DU LACTATE SANGUIN A L'EFFORT	137
3.4.3	FC ET VO2 AU SEUIL ANAEROBIE	138
3.4.4	ALLURE DE LA COURBE DE FC ET SEUIL ANAEROBIE	140
3.4.5	ALLURE DU DEBIT VENTILATOIRE ET SEUIL ANAEROBIE	142
3.4.6	TAMPONNEMENT DE L'ACIDE LACTIQUE ET VCO2	143
2.4.7	RELATION ENTRE LE SEUIL ANAEROBIE ET LE SEUIL VENTILATOIRE	146
3.5.	ETUDE CRITIQUE DU SEUIL ANAEROBIE	148
CHAPITRE 4.: LA CAPACITE ANAEROBIE		151
4.1.	GENERALITES	151
4.1.1	INTRODUCTION	151
4.1.2	PERTINENCE DE L'EVALUATION DE LA CAPACITE ANAER	152
4.1.3	FACTEURS AFFECTANT LA CAPACITE ANAEROBIE	153
4.1.4	MESURE DE LA CAPACITE ANAEROBIE	153
4.1.5	CHOIX DES ERGOMETRES	160
4.1.6	OBJECTIFS	160
4.2	MATERIEL ET METHODES	161
4.3.	RESULTATS	165
4.4.	DISCUSSION	172
4.4.1	ANALYSE DE L'EPREUVE DE Debruyne-Prévost (1975)	173
4.4.2	CAPACITE ANAEROBIE DETERMINEE SELON LA TECHNIQUE DE MORITANI et al. (1981)	176
4.4.3	CAPACITE ANAEROBIE DETERMINEE A PARTIR DE LA TECHNIQUE DE MOGNONI (1988)	177
4.5.	CONCLUSION	180
C O N C L U S I O N		181
SYMBOLES ET ABREVIATIONS UTILISES		189
INDEX DES TABLEAUX		190
INDEX DES FIGURES		192
B I B L I O G R A P H I E		194
ANNEXE		208

Introduction

Pendant longtemps et souvent avec succès, l'entraîneur a adopté une démarche essentiellement empirique. Aujourd'hui, malgré le perfectionnement des techniques et des infrastructures sportives, l'accession au plus haut niveau de performance ne peut être envisagée sans un réseau de systèmes et modèles de tous ordres qui participent à l'amélioration de la performance.

La détection et la formation du talent, la préparation psychologique du sportif et son insertion socio-professionnelle sont considérées comme les facteurs fondamentaux de la réussite, autour desquels s'organise le contrôle de l'entraînement.

L'amélioration de la performance sportive est actuellement de plus en plus le fruit de la pensée et de l'action de spécialistes des sciences du sport. Ces derniers essaient de mettre au point des techniques pour sélectionner et orienter l'athlète, suivre l'évolution de l'adaptation de ses fonctions, conseiller sur la forme et la densité du travail, apprécier l'efficacité d'un programme d'entraînement.

L'amélioration de la performance dans une discipline sportive donnée, implique l'identification des facteurs qui la sous-tendent, en vue d'une meilleure compréhension et prise en charge de la préparation de l'athlète.

Il est bien admis que, plusieurs facteurs interviennent dans la réalisation de la performance sportive (6, 138, 199), parmi lesquels on peut distinguer :

- l'environnement: comprenant les facteurs socio-culturels, le climat, le niveau d'altitude,
- les facteurs psychologiques : motivation, intelligence,
- les facteurs héréditaires: taille, poids, sexe, composition des fibres musculaires,
- les facteurs physiologiques.

Outre ces différents facteurs, une préparation physique, technique, et tactique appropriée de l'athlète permet de gérer et développer au mieux ses potentialités.

INTRODUCTION

L'influence de ces différents facteurs dans la réalisation de la performance, a suscité progressivement l'intérêt de nombreuses sciences, qui tour à tour, ont élargi leur champ d'investigation aux activités physiques et sportives.

Ce qui n'était il y a une vingtaine d'années à peine, qu'une simple curiosité intellectuelle de scientifiques, a acquis aujourd'hui le statut de spécialités internationalement reconnues, telles que la médecine du sport, la physiologie du sport, la biochimie du sport, la sociologie du sport, la psychologie du sport etc..

Chaque spécialité scientifique couvre un domaine donné de la préparation sportive et offre, par conséquent, des informations précieuses sous des angles différents, dont la conjugaison constitue une base de données, actuellement indispensable au développement sportif de haut niveau.

Les sciences appliquées au sport permettent ainsi de connaître de mieux en mieux l'homme en mouvement, elles contribuent à l'orientation, à la sélection et à l'évaluation sportives, de même qu'elles permettent une préparation planifiée, adaptée et contrôlée.

Les progrès sportifs considérables, réalisés généralement par les pays à potentiel scientifique et technique élevé, sont les meilleurs témoins de la contribution scientifique au développement sportif. Inversement, l'indisponibilité, dans certains pays et notamment dans ceux en voie de développement, d'un potentiel scientifique et technique en qualité et en nombre suffisants, semble constituer un frein à l'accession au plus haut niveau de performance. Les sciences appliquées à l'exercice musculaire ont, en effet, suscité la conception d'objectifs spécifiques, le développement de méthodes et de techniques nouvelles avec l'objectif principal d'améliorer l'efficacité de la préparation sportive.

Si le progrès considérable des sports à travers le monde a été réalisé, en parti, grâce au concours des sciences du sport et notamment de celui de la physiologie de l'exercice, en retour, la physiologie s'est incontestablement enrichie et développée sous l'impulsion du monde sportif. Certaines théories ont pu être clarifiées, diverses techniques mises au point, et des données se sont progressivement accumulées, permettant ainsi de définir des valeurs normatives aussi bien pour les sportifs que pour les sujets sédentaires.

INTRODUCTION

L'élévation du niveau de performance, les limites de l'entraînement empirique et les exigences scientifiques ont entraîné des méthodes d'entraînement fondées sur des principes rigoureux, que nous présentons brièvement ci-après, permettant à l'athlète de gérer et de développer au mieux son potentiel.

Le principal objectif de l'entraînement est d'amener, entre autres, une adaptation biologique telle que la performance soit améliorée. L'entraînement physique soumet l'organisme à une succession de charges d'intensité, de durée et de fréquence suffisantes pour déterminer un effet mesurable, c'est-à-dire une amélioration des possibilités fonctionnelles du sujet.

Ce principe a entraîné durant ces deux dernières décennies, une augmentation considérable de la charge d'entraînement et des facteurs qui la sous-tendent. Les entraînements des athlètes d'élite, ont augmenté de volume d'environ 30 % dans toutes les disciplines sportives; leur fréquence atteint parfois 12 séances par semaine, totalisant un volume horaire annuel de plus de 1000 heures. Actuellement la charge des entraînements a atteint un niveau tel qu'on ne peut plus espérer beaucoup de l'augmentation de volume horaire annuel d'entraînement ni de sa fréquence. C'est plutôt dans l'amélioration de l'efficacité du travail qu'il faut chercher les possibilités d'une nouvelle évolution de la performance. Ceci sous-entend l'application de principes d'entraînement et d'évaluation, adaptés à chacune des catégories de disciplines sportives,

- en sélectionnant le talent sportif à partir de critères pertinents,
- en privilégiant le développement des qualités déterminantes de la spécialité, faisant des autres, des qualités d'appoint,
- en contrôlant périodiquement l'efficacité des programmes d'entraînement utilisés, par la mesure de leur impact sur les qualités visées,
- en affinant sans cesse l'organisation interne des différentes étapes d'entraînement, en fonction des exigences de la discipline, des caractéristiques physiologiques, entre autres, des athlètes, de leur niveau de progression et des objectifs recherchés.

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité de l'entraînement ayant des limites, une préparation qualitative s'impose pour espérer améliorer la performance du sportif. La spécificité de l'entraînement prenant de plus en plus d'importance, l'identification des exigences requises pour la pratique de chaque sport, s'avère nécessaire.

INTRODUCTION

Chaque programme d'entraînement doit consacrer un volume important au développement des qualités sollicitées par la discipline sportive pratiquée. Plus l'entraînement est ciblé sur les groupes musculaires sollicités ("spécifique"), tenant compte des exigences de la compétition, meilleurs seront les résultats (25). Un exercice spécifique suscite, entre autres, des adaptations métaboliques et physiologiques spécifiques et entraîne des améliorations spécifiques (125).

Par ailleurs, pour maintenir l'efficacité de la préparation physique et favoriser une continuelle amélioration chez un athlète, il est nécessaire d'élever le niveau de l'exercice au fur et à mesure de l'amélioration de sa performance, en agissant sur la fréquence, l'intensité et/ou sur la durée des séances d'entraînement (principe de la "surcharge"). Cette nécessité fut mise en évidence dès 1931 par Christensen, à propos de l'influence de l'entraînement sur la fréquence cardiaque. Tel que rapporté par Astrand et Rodahl (6) "l'entraînement à une puissance donnée, détermine un certain niveau d'adaptation, et pour obtenir une nouvelle amélioration, il est nécessaire d'augmenter l'intensité de l'entraînement". Toutefois, pour qu'il soit efficace, ce principe de la "surcharge", doit impliquer les muscles sollicités au cours de l'activité sportive considérée et susciter une stimulation du(s) système(s) concerné(s) par cette qualité (138, 199), c'est à dire que la surcharge doit être spécifique.

La réponse de l'organisme à cette "surcharge" revêt un caractère individuel. Un régime d'entraînement imposé à un collectif d'athlètes peut ne pas s'accompagner des mêmes bénéfices pour tous; c'est le principe de l'individualisation de l'entraînement. Ceci suggère que les bénéfices de l'entraînement seraient optimaux pour un sujet donné lorsque les charges d'entraînement sont prescrites en fonction des exigences de sa spécialité, tenant compte de ses caractéristiques propres.

Les bénéfices de l'entraînement sont cependant réversibles. Les adaptations physiologiques sont rapidement modifiées lorsqu'un athlète interrompt ses entraînements (125). C'est pourquoi, les athlètes entreprennent, généralement, un programme de "retour en forme" au début de chaque saison sportive.

Une mise en application rigoureuse et appropriée de ces principes devrait entraîner des modifications physiologiques immédiates et à long terme telles, que les caractéristiques de l'athlète s'adaptent aux exigences de sa spécialité.

INTRODUCTION

La mise en évidence de la nature des modifications physiologiques à l'effort, l'identification des exigences liées à la pratique sportive, la connaissance des caractéristiques physiologiques de l'athlète, ainsi que leur intégration dans la préparation sportive semblent constituer, de nos jours, un gage d'une meilleure prise en charge méthodologique de l'athlète et par conséquent, une chance supplémentaire de succès.

En outre, en raison de la sévérité des programmes d'entraînement, liée à l'importance de leur intensité et de leur fréquence, et compte tenu des modifications fonctionnelles et structurelles qu'ils sont susceptibles de provoquer chez l'athlète, une surveillance physiologique régulière du sportif, réalisée à des moments opportuns, s'avère importante à la fois pour préserver sa santé, pour évaluer sa progression et pour réajuster, le cas échéant, ses charges d'entraînement en fonction de son potentiel et du niveau de performance qu'il souhaite atteindre.

Lors de la pratique sportive, l'organisme humain est souvent sollicité à l'extrême de ses possibilités. Certaines défaillances organiques, qui semblent anodines et tout à fait compatibles avec une vie sédentaire peuvent constituer un handicap pour la pratique sportive, et représenter, parfois, un danger pour la vie de l'athlète. Ce qui explique l'intérêt précoce de la médecine pour le sport. Celle-ci avait initialement pour mission d'écarter de la pratique des activités physiques et sportives tout individu pour qui l'effort pouvait constituer un facteur de risque, de même qu'elle intervenait dans le soin et le traitement des sportifs malades ou blessés. Plus tard, sous la pression du monde sportif, des méthodes et techniques ont été mises au point pour prévenir les maladies, traiter rapidement et efficacement les athlètes malades ou blessés, et pour réduire la durée de leur convalescence.

Parallèlement, la physiologie qui s'intéressait à l'analyse des réactions de l'organisme, avant, pendant et après l'effort, a progressé et apporté une nouvelle façon d'envisager la préparation du sportif.

La connaissance des réactions physiologiques à l'effort s'est continuellement enrichie grâce, notamment, aux progrès de la physiologie générale et de la bioénergétique, aussi bien sur le plan des méthodes d'investigation que sur celui de l'interprétation des résultats. Ces progrès sont également liés à l'évolution de la technologie, laquelle offre des instruments de mesures de plus en plus précis, permettant l'acquisition d'informations variées, fiables, dans des délais brefs. A titre d'exemple, les ergomètres, les ergospiromètres, les télémètres

INTRODUCTION

et les méthodes de microdosages d'indices biochimiques ont constitué, durant ces deux dernières décennies, les principaux instruments de progrès de la physiologie de l'exercice musculaire.

Avec l'introduction récente, en physiologie de l'exercice musculaire, de la résonance magnétique nucléaire, actuellement à ses premiers essais, l'espoir est fondé sur la possibilité d'une exploration plus fine et surtout non invasive, de mécanismes physiologiques intimes et en particulier de ceux liés à la contraction musculaire.

Si l'on se réfère aux différents principes méthodologiques de l'entraînement, énoncés précédemment, et compte tenu de la diversité des disciplines sportives par leurs formes, leurs intensités et par leurs durées, on admet que chaque spécialité sportive est caractérisée, entre autres, par des exigences physiologiques particulières dont la nature, le niveau et le degré d'influence sur la performance peuvent être appréciés à partir des caractéristiques physiologiques d'athlètes de haut niveau et de leurs relations avec la performance sportive.

A partir de ces considérations, on admet l'hypothèse selon laquelle, l'entraînement sportif, par ses stimulations répétées entraîne chez l'athlète, des adaptations physiologiques spécifiques, dont il convient d'apprécier la nature, de quantifier le niveau et de cerner les limites, en fonction du niveau de performance et du type de pratique sportive.

La mise en évidence, chez un athlète, de ces adaptations, implique l'exploration de ses différentes fonctions lors d'exercices musculaires standardisés, au cours desquels différents indices physiologiques sont enregistrés.

Les indices physiologiques les plus couramment utilisés, pour mettre en évidence ces adaptations, cerner les caractéristiques physiologiques des athlètes, et identifier le profil des exigences de leur spécialité, concernent notamment, la capacité aérobie, le seuil anaérobie et la capacité anaérobie (25, 56, 80, 127, 139).

La capacité aérobie d'un athlète exprime son aptitude à effectuer des efforts intenses et soutenus; elle est définie par la capacité d'adaptation d'un ensemble de processus physiologiques, chargés de capter, de transporter, puis de livrer l'oxygène aux muscles en activité. L'indice intégral de ces processus est représenté par la consommation maximale d'oxygène (VO₂ max).

INTRODUCTION

Si la capacité aérobie ne pose pas de difficulté théorique particulière, comme nous le verrons au chapitre 2, et que sa mesure généralement admise étant VO_2 max, il resterait à préciser son influence sur la performance sportive d'une manière générale, et sur celle des sports de longue durée, en particulier. Il serait également utile de vérifier, si la seule mesure de VO_2 max suffit à apprécier la capacité d'endurance, à distinguer les sports d'endurance de haut niveau, ou à distinguer, au sein d'un même groupe d'athlètes d'endurance, ceux présentant les meilleures chances de succès ?

En ce qui concerne la mesure de VO_2 max, la difficulté provient non des techniques disponibles, mais au contraire de leur multiplicité et de la diversité des protocoles rencontrés, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Le seuil anaérobie (SA), concept défini pour la première fois par Wasserman et Mac Ilroy en 1964 (195), représente l'intensité d'exercice à partir de laquelle le niveau d'acide lactique sanguin s'élève significativement au dessus du niveau normal de repos. Il représente l'intensité à partir de laquelle, les processus énergétiques aérobie ne suffisent pas à couvrir les besoins énergétiques.

Compte tenu de la diversité des disciplines sportives, l'on peut s'attendre à ce que certaines d'entre elles, de part l'importance de leur intensité et de leur durée, requièrent un approvisionnement énergétique régulier, dont l'intensité se situe au niveau de la zone de transition énergétique aéro-anaérobie. L'identification pour ces disciplines, des méthodes de mesures, et la disponibilité de valeurs normatives pour la pratique de haut niveau, offriraient un intérêt particulier.

La mesure de cette zone de transition énergétique se base généralement sur des dosages sanguins, quelque peu contraignants. Peut-on opter pour des techniques indirectes de laboratoire et de terrain contournant ces contraintes ? En outre, qu'elles soient invasives ou non, l'interprétation des résultats pose certains problèmes théoriques, qui seront traités au chapitre 3.

De nombreuses disciplines ou spécialités sportives font appel à des sources d'énergie où n'intervient pas l'oxygène d'une manière importante et, pour lesquelles la mesure de VO_2 max et du SA est de moindre importance. Ces spécialités sportives, de type anaérobie, impliquent des efforts très intenses, de courtes durées. Pour ces sports, la mesure de la capacité anaérobie peut s'avérer utile.

INTRODUCTION

Cependant, autant il est aisé d'évaluer la capacité aérobie, autant, comme nous le verrons au chapitre 4, il est difficile d'avoir une idée précise du niveau de développement de la capacité anaérobie (43, 189). Serait-il possible, à partir des données théoriques existantes, d'identifier des techniques de mesure accessibles, de précision satisfaisante ?

Ne pouvant avoir recours aux mesures directes, la validité de ces épreuves pourrait être testée par rapport aux performances sportives, avec les limites inhérentes à de telles pratiques.

Compte tenu de leur importance relative dans la réalisation de la performance, la mesure de la capacité aérobie, du seuil anaérobie et de la capacité anaérobie constitue l'une des préoccupations du physiologiste de l'exercice.

Cependant, l'élaboration de critères de leur appréciation, précis et spécifiques à chaque sport, de même que leur hiérarchisation au sein d'une spécialité sportive, se heurtent à certaines difficultés, liées notamment à la mesure précise de la performance dans certaines disciplines sportives telles que les sports collectifs et les sports de combat.

Faute d'une cible précise qu'est habituellement la performance individuelle, les caractéristiques physiologiques des athlètes, sont appréciées à partir de l'analyse des réponses physiologiques liées à des exercices standardisés, recueillies chez les meilleurs performants. On admet en effet que, si au sein d'une spécialité sportive, les athlètes de haut niveau présentent, sans exception, une qualité donnée élevée, c'est qu'elle constitue certainement une qualité déterminante pour cette spécialité.

Les informations issues de cette approche, bien qu'utiles à une évaluation de l'aptitude à la pratique sportive générale, ne peuvent être admises comme critères irréfutables de l'aptitude à la performance de haut niveau. Aussi, est-il utile de compléter cette approche par une étude analytique, orientée vers un sport dont la performance est mesurable tel que la course à pied.

Différentes disciplines sportives ont été décrites sous l'angle bioénergétique (25, 80, 108, 139). La physiologie appliquée à la course à pied semble particulièrement intéressante à étudier, à la fois par ses aspects théoriques et pratiques. Compte tenu de la multiplicité et de la diversité de ses épreuves, la course à pied permet de mettre en évidence les

INTRODUCTION

contraintes aussi bien extrêmes que diverses (42). Etant donné que, dans les courses, la performance est mesurable, il est possible d'estimer le degré de participation des différents facteurs physiologiques qui la sous-tendent et de les hiérarchiser en fonction de leur importance (10, 20, 108, 162, 166, 179). De plus, l'intérêt supplémentaire de cette discipline réside dans le fait qu'elle constitue un élément essentiel de l'entraînement complémentaire des athlètes de la quasi-totalité des disciplines sportives.

Que l'on souhaite enregistrer les réactions cardio-circulatoires et respiratoires à l'effort, observer les métabolites sanguins, ou que l'on doive mesurer la capacité aérobie ou anaérobie, les exigences des méthodes et des techniques impliquées sont telles que, quelle que soit l'approche choisie, celle-ci implique des répercussions financières pour l'équipement et les fournitures et pose un problème de qualification du personnel chargé de leur mise en application. De telles explorations sont inaccessibles à un grand nombre de laboratoires et particulièrement ceux disposant de faibles ressources. Aussi, des techniques de validité et fiabilité satisfaisantes, moins coûteuses, moins contraignantes pour l'athlète et ne nécessitant pas une importante qualification de la part des examinateurs, mériteraient d'être mises au point.

En outre, les connaissances physiologiques devant servir également aux "hommes de terrain", des techniques simples, accessibles, d'interprétation facile et à intérêt pratique immédiat, devraient être mises à leur portée.

Le but poursuivi par cette étude, est de cerner le profil physiologique des athlètes de haut niveau et de proposer des techniques et des critères permettant d'améliorer le contrôle de leur entraînement, en appréciant leur niveau d'aptitude et en suivant leur progression.

Ce but est traduit en termes d'objectifs généraux suivants:

- identifier les mécanismes physiologiques mis en jeu lors de différents types d'exercices musculaires, effectués par des athlètes de différentes spécialités,
- étudier et comparer les principales qualités physiologiques, liées à la pratique sportive de haut niveau, et leurs modifications, chez des athlètes de différentes spécialités,
- identifier les techniques d'évaluation de ces qualités,
- élaborer et valider de nouvelles techniques de laboratoire et de terrain permettant leur évaluation.

Ces objectifs généraux sont transcrits en objectifs opérationnels dans les chapitres 2, 3 et 4.

INTRODUCTION

Pour atteindre les objectifs visés, nous nous proposons d'analyser les réactions physiologiques d'athlètes de haut niveau et de différentes spécialités, lorsqu'ils accomplissent différentes tâches précises, dans des conditions expérimentales définies.

L'étude comprend une introduction générale, suivie de quatre chapitres, d'une conclusion générale et d'une annexe.

Le chapitre premier introduit l'étude par rappel physiologique. Les réactions physiologiques y sont décrites chez l'homme sédentaire sain et chez l'athlète, aussi bien à l'état de repos qu'à l'exercice. Sont également présentés dans ce premier chapitre l'origine, la nature et l'importance relative des substrats énergétiques et de l'oxygène en fonction du type de pratique sportive, et leur cheminement depuis le milieu extérieur jusqu'aux muscles en activité. De même que sont décrits les différents systèmes et fonctions chargés de leur transport et de leur utilisation.

Les chapitres 2, 3 et 4 sont consacrés à l'étude et à l'évaluation des qualités physiologiques de base des athlètes de haut niveau. Il s'agit respectivement de la capacité aérobie, du seuil anaérobie et de la capacité anaérobie. Dans chacun des trois chapitres, une revue des données de la littérature précédera et orientera les recherches personnelles.

L'évolution de différents paramètres physiologiques au cours de l'exercice, et leur comportement à l'effort maximal seront présentés aussi bien d'un point de vue descriptif qu'analytique. Les possibilités et les limites des adaptations physiologiques de l'athlète, sont décrites en fonction du type d'effort accompli et de sa spécialité.

La participation de chacune de ces qualités, à la réalisation de la performance, sera appréciée et la pertinence de leur évaluation évoquée, selon le sport pratiqué. De même que sera envisagée l'intégration des connaissances de ces qualités dans le cadre de la préparation sportive, du contrôle de l'entraînement et dans le cadre de la surveillance physiologique de l'athlète.

Les techniques d'évaluation, les plus répandues, de chacune des trois qualités seront étudiées et leurs limites définies. De nouvelles propositions sont apportées en vue de les adapter à des conditions expérimentales particulières et/ou à des ressources plus modestes.

Chapitre 1

Bases physiologiques

1. BASES PHYSIOLOGIQUES

1.1. ENERGETIQUE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE

1.1.1. GENERALITES

1.1.2. MECANISMES DE RECONSTITUTION DE L'ATP

1.1.3. CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

1.1.4. UTILISATION DES TROIS SOURCES D'ENERGIE

1.1.5. MESURE DE L'ENERGIE DEPENSEE

1.2. SYSTEMES DE TRANSPORT ET D'UTILISATION DE L'OXYGENE

1.2.1. LA VENTILATION PULMONAIRE

1.2.1.1 Variations de la ventilation pulmonaire

1.2.1.2 Influence de l'entraînement sur la fonction pulmonaire

1.2.2. ECHANGES GAZEUX DANS LES POUMONS ET LES TISSUS

1.2.2.1 Echanges gazeux dans les poumons

1.2.2.2 Echanges gazeux dans les tissus

1.2.3. TRANSPORT CIRCULATOIRE

1.2.3.1 Capacité du sang à transporter l'oxygène

1.2.3.2 Capacité de sang à transporter du gaz carbonique

1.2.3.3 Capacité cardiaque

1.2.4. CONSOMMATION D'OXYGENE ET EXERCICE

1.2.4.1 Définition de la consommation d'oxygène

1.2.4.2 Définition de la consommation maximale d'oxygène

1.2.4.3 Mécanismes de l'augmentation de VO₂

1.2.4.4 Facteurs de variation de VO₂ max

1.2.4.5 Facteurs limitants de VO₂ max

1.2.4.6 Consommation d'oxygène post-exercice

1.2.5. LES REGULATIONS RESPIRATOIRE ET CIRCULATOIRE A L'EXERCICE

1.2.5.1 Régulation circulatoire

1.2.5.2 Ajustement de la ventilation

Chapitre 1

Bases physiologiques

Au repos, l'activité métabolique de l'homme représente une dépense énergétique de l'ordre de 1500 kcal par 24 heures, soit l'équivalent d'une course de 10.000 mètres. Lors d'une activité physique, le métabolisme oxydatif peut atteindre jusqu'à 50 fois son niveau initial, grâce essentiellement, à l'activité musculaire (5).

Pour fonctionner, les muscles ont besoin d'un carburant spécifique : l'adénosine triphosphate (ATP), d'un comburant : l'oxygène, et d'un système de régulations nerveuses et hormonales. Au cours de l'exercice, les muscles augmentent l'intensité de leur métabolisme, modifient l'équilibre du milieu intérieur et provoquent une perturbation de l'ensemble de ces éléments qui augmentent d'une manière accrue, ce qui implique l'adaptation de l'ensemble des systèmes assurant leur transport et leur utilisation.

Pour l'oxygène, les cellules n'étant pas en contact direct avec l'environnement, ventilation et circulation assurent son transport du milieu extérieur jusqu'aux territoires actifs.

La synthèse de nouvelles molécules d'ATP est assurée, quant à elle, par l'énergie libérée au cours du catabolisme des glucides, des lipides et quelquefois des protides, initialement puisés dans l'environnement. Pour sa contraction, comme pour son relâchement, le muscle doit transformer de l'énergie potentielle chimique en énergie mécanique qui donne naissance au mouvement.

D'une conception où les systèmes cardio-vasculaire et ventilatoire constituaient les éléments centraux de l'évaluation physiologique, les progrès réalisés surtout durant les vingt dernières années, recentrent le problème sur le fonctionnement de la fibre musculaire et sur les adaptations requises par le maintien de son activité au cours de l'exercice. Dans cette perspective, ventilation et circulation ne constituent que les premières étapes d'un cycle dans lequel l'énergie est puisée dans le milieu extérieur, transformée et mise en réserve dans l'organisme, ou bien transportée jusqu'aux tissus actifs et notamment aux muscles et, par l'intermédiaire du système ostéo-articulaire, au milieu extérieur sous forme de mouvements simples, d'actions ou de conduites motrices.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Le corps humain peut s'adapter à tous les types de stimuli, une adaptation efficace ne peut cependant être atteinte que si le coeur, la circulation, les muscles, le squelette et le système nerveux sont régulièrement soumis à la surcharge que constitue l'entraînement.

L'entraînement physique, par ses stimulations répétées, permet une adaptation chronique des appareils et systèmes impliqués (6, 25, 125). L'adaptation n'affecte que les appareils et systèmes suffisamment sollicités (principe de spécificité de la surcharge). Cette adaptation se manifeste de deux sortes :

- adaptation fonctionnelle, caractérisée par des modifications de l'efficacité des tissus, systèmes ou appareils. C'est le cas de la diminution de la fréquence cardiaque pour une intensité de travail donnée;

- adaptation structurale, caractérisée par des modifications du nombre ou de la grosseur des unités organiques. Il en est ainsi, par exemple de l'augmentation du nombre et de la grosseur des mitochondries dans le muscle.

La mise en évidence de ces adaptations, pour un système ou organe donné, implique souvent son exploration durant des exercices standardisés. La complexité des modifications physiologiques intervenant avant, pendant et après l'effort, ainsi que les adaptations qui s'en suivent invitent à la prudence lors de l'interprétation des résultats, et ce quels que soient le nombre, la diversité et le degré de sophistication de cette exploration.

Compte tenu de l'étendue et de la complexité des mécanismes impliqués aussi bien dans les adaptations fonctionnelles que structurelles, nous nous limiterons à quelques aspects cardiorespiratoires et métaboliques dont nous livrerons, dans ce chapitre, les notions de base. Ces aspects seront décrits d'abord à l'état de repos puis au cours de différents types d'exercices, ces derniers constituant les principaux facteurs de variation des paramètres retenus, seront développés plus en détail dans les trois chapitres qui suivent.

1.1. ENERGETIQUE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE

1.1.1. GENERALITES

Toute l'énergie existant dans la biosphère provient du soleil. Une partie de cette énergie parvient à la terre sous forme de lumière. Les plantes vertes transforment, par le biais de la photosynthèse, une partie de l'énergie lumineuse en énergie chimique, pour construire des molécules organiques (glucides, lipides et protides) à partir du dioxyde de carbone (CO_2), de l'eau (H_2O) et de l'azote (N_2).

En présence d'oxygène, le métabolisme des aliments produit de l'eau et du dioxyde de carbone et libère de l'énergie chimique par le processus de la respiration cellulaire. Cette oxydation des aliments fournit l'énergie nécessaire :

- aux réactions de synthèses biochimiques (croissance de l'organisme, renouvellement des cellules etc.),
- au travail mécanique (contraction musculaire),
- à l'activité électrique de certains tissus (conduction de l'influx le long d'une fibre nerveuse),
- au transport actif.

Pour se procurer cette énergie, les réactions chimiques doivent être couplées aux systèmes responsables de ces fonctions physiologiques. Cet accouplement s'effectue grâce à des enzymes cellulaires spécifiques et des systèmes de transfert d'énergie. La quantité d'énergie libérée par l'oxydation d'un aliment est exprimée en générale en calories par mole de substance.

Chez l'homme comme chez les animaux, l'énergie utilisée sous ses différentes formes par les cellules, provient de l'énergie stockée dans les liaisons covalentes des molécules organiques ingérées.

Les cellules contiennent quatre familles de molécules organiques, les glucides simples, les acides gras, les acides aminés et les nucléotides.

Le glucose, principal composé alimentaire de nombreuses cellules, est transformé par une série de réactions oxydatives en divers glucides dérivés et finalement en anhydride carbonique et eau :



Au cours de la dégradation du glucose, l'énergie et le pouvoir réducteur, tous deux essentiels aux réactions de biosynthèse, sont stockés sous forme d'ATP et de NADH.

BASES PHYSIOLOGIQUES

L'oxydation complète d'une molécule de glucose ($C_6H_{12}O_6$) dans les mitochondries (fig. 1.1) permet la formation de 38 molécules d'adénosine triphosphate (ATP) :



Pi phosphate inorganique, ADP adénosine diphosphate

Le glycogène sert à stocker l'énergie pour un usage ultérieur.

La fonction la plus importante des acides gras est la construction des membranes cellulaires, mais ils jouent un rôle important dans le stockage intracellulaire de l'énergie. Leur dégradation peut produire pour le même poids, deux fois plus d'ATP que le glucose. Les acides gras sont stockés dans le cytoplasme sous forme de triglycérides, formés chacun de trois chaînes d'acides gras liées à une molécule de glycérol. En cas de besoin, les chaînes d'acides gras sont libérées des triglycérides et dégradées en unités à deux carbones, représentant le groupement acétyle (CH_3-CO) de l'acétyl CoA.

Les acides aminés sont les sous-unités de protéines pouvant également contribuer à la néoglycogénèse hépatique.

Les nucléotides sont les sous-unités de l'ADN et de l'ARN, ils sont constitués d'une base cyclique azotée, d'un glucide à 5 atomes de carbone et d'un ou de plusieurs groupements phosphate. Outre leur rôle de conservation de l'information biologique, ils agissent aussi comme transporteurs d'énergie chimique. L'ester triphosphate de l'adénine ou ATP, sert au transfert d'énergie entre des centaines de réactions cellulaires individuelles.

La dégradation des molécules organiques a lieu au cours de séquences de réactions catalysées par des enzymes. Les enzymes sont des catalyseurs protéiques hautement spécifiques qui, en se combinant avec les molécules biologiques diminuent l'énergie d'activation des réactions particulières que peuvent subir les molécules.

L'énergie nécessaire au fonctionnement de la cellule est libérée, par des réactions aérobies et/ou anaérobie, sous forme d'énergie chimique. Cette énergie potentielle est contenue dans l'adénosine triphosphate (ATP), molécule découverte par Lohman en 1929. L'ATP, dont la composition chimique est illustrée par la figure 1.2, comporte deux liaisons phosphate à haut potentiel énergétique combinées à l'adénosine ribose. Elle constitue le précurseur immédiat de la contraction musculaire.

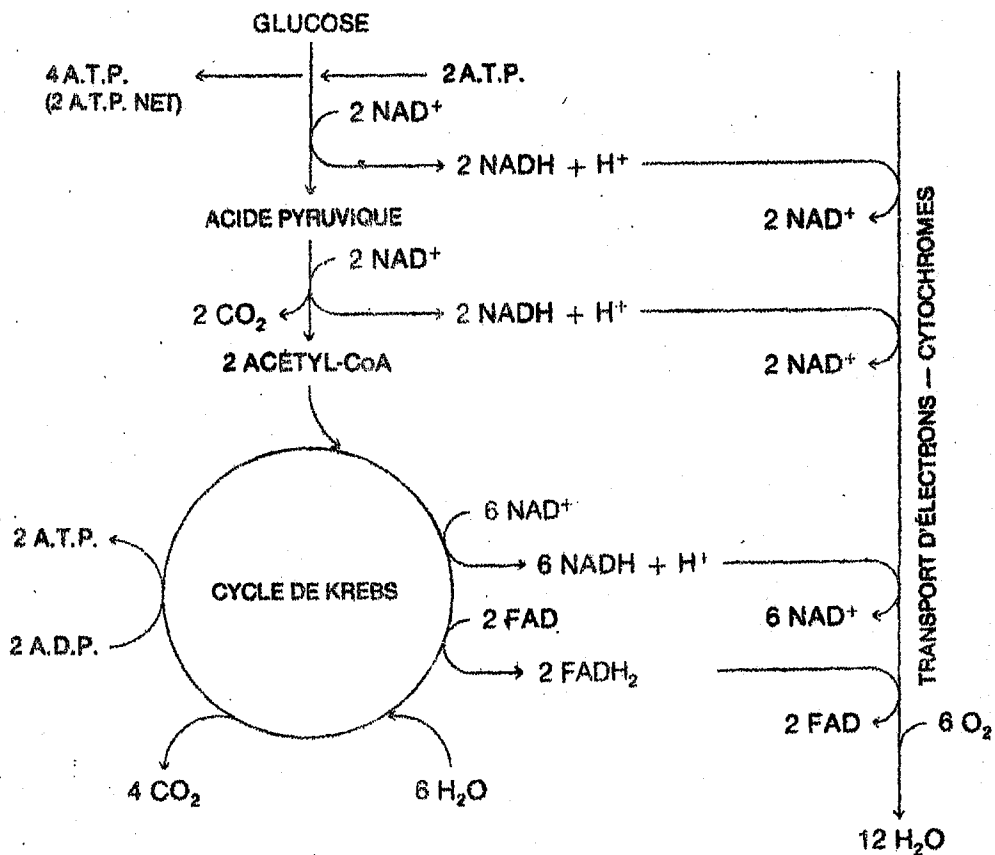


Figure 1.1: Production de l'adénosine triphosphate par le transfert d'énergie au cours de l'oxydation complète du glucose (Mac Ardle et al., 1987)

En anaérobie, la production d'énergie est faible. Les premières réactions consomment 2 ATP et il se synthétise 4 ATP. Le bilan est donc de 2 ATP.

Lorsque le pyruvate est oxydé, le bilan est modifié, il se forme deux acides pyruviques qui dans le cycle de Krebs permettent la synthèse de 2 X 15 ATP. Les 2 NADH₂ formés se réoxydent en synthétisant au maximum 2 X 3 ATP. Les 36 ATP s'ajoutent aux 2 ATP synthétisés lors de la phase anaérobie.

BASES PHYSIOLOGIQUES

L'énergie est libérée suite à l'activité ATPasique de la myosine, selon la réaction :



L'ATP doit son rôle de transporteur d'énergie chimique à sa relative instabilité. La dégradation de l'ATP par hydrolyse intra-cytoplasmique libère un phosphate inorganique (Pi), elle a lieu très facilement et dégage une grande quantité d'énergie utilisable. En conséquence, les liaisons rompues dans cette réaction d'hydrolyse sont souvent qualifiées de liaisons riches en énergie.

Environ un quart de cette énergie peut être transformée en énergie mécanique nécessaire au mouvement. La fibre musculaire striée, cellule spécialisée dans cette transformation, ne peut utiliser à cette fin que l'énergie libérée par l'ATP; l'ATP constitue, en effet, la source immédiate d'énergie.

La concentration d'ATP ne varie pas ou peu si l'exercice est bien supporté; une diminution sensible est cependant observée après un effort épuisant, sans toutefois entraîner une déplétion totale. Les travaux récents (Legros et al., 1988), utilisant la résonance magnétique nucléaire (RMN), confirment la constance du taux d'ATP musculaire lors de l'exercice. La quantité d'énergie libérée par hydrolyse de l'ATP est égale à environ 8 kcal/mole. La concentration musculaire d'ATP représente seulement 5 à 6 mmol/kg de muscle frais (5,5 mmol/kg par RMN), ce qui représente pour un homme dont la masse musculaire est de 30 kg, une énergie totale de 1,3 kcal. Sachant qu'une simple marche à 4 km/h entraîne une dépense énergétique de 3 kcal/min, l'exercice musculaire serait très vite interrompu sans l'intervention rapide et intense des voies métaboliques génératrices d'ATP.

Puisque l'ATP ne diminue que faiblement lors d'une activité musculaire, même très intense, un mécanisme étroitement contrôlé doit exister pour régénérer l'ATP lorsque l'exercice se prolonge. La resynthèse de l'ATP nécessite de l'énergie, laquelle est fournie aux myofibrilles par trois systèmes métaboliques :

- le système ATP-CP ou système des phosphagènes,
- la glycolyse anaérobie,
- le système aérobie ou système oxydatif.

Les deux premiers systèmes sont anaérobies.

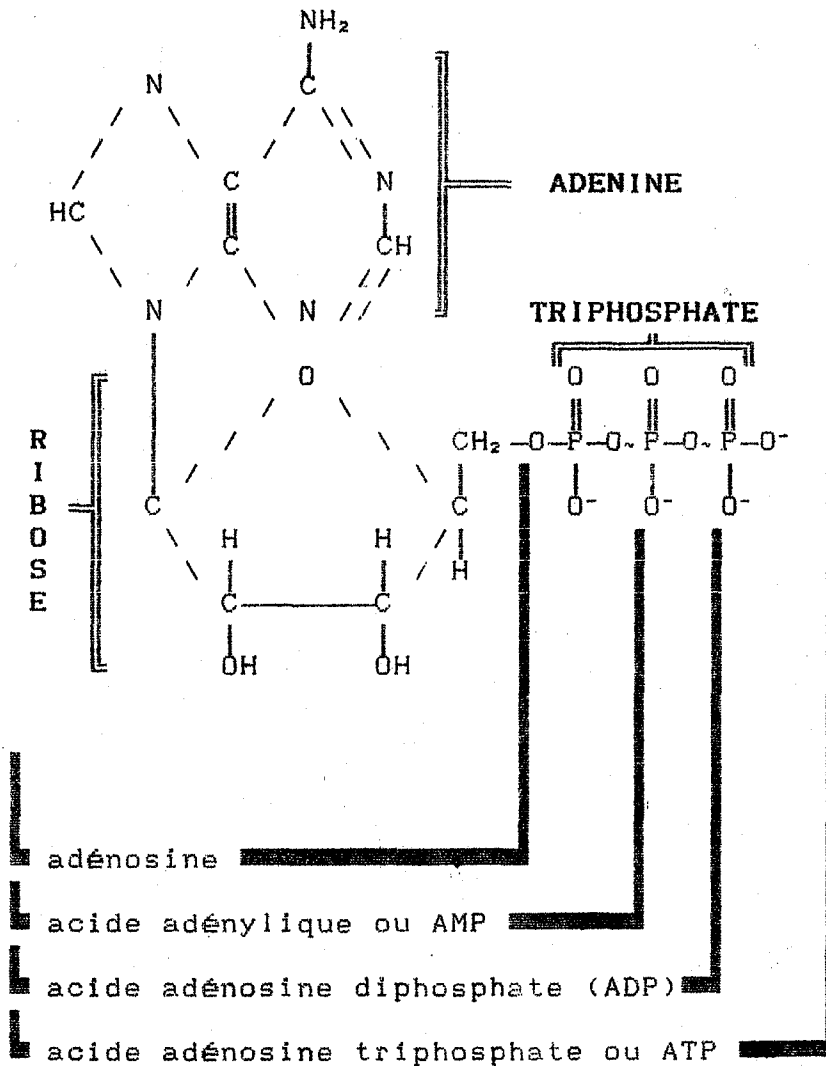
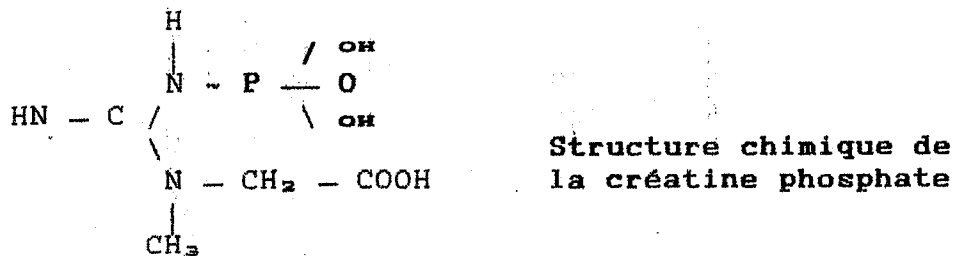


Figure 1.2: Composition chimique de l'adésosine triphosphate

Cette formule montre que l'ATP résulte de la combinaison de l'adénine-ribose avec trois radicaux phosphate. Les deux derniers radicaux phosphate sont rattachés au reste de la molécule par des liaisons riches en énergie, représentées par le symbole \sim . La quantité d'énergie libre emmagasinée dans chacune des liaisons riches en énergie par mole d'ATP est d'environ 8 kcal dans les conditions de température et de concentrations des réactifs propres à l'organisme. Après la perte d'un radical phosphate, l'ATP devient l'adénosine diphosphate (ADP); après la perte du second radical phosphate, on obtient l'adénosine monophosphate (AMP).

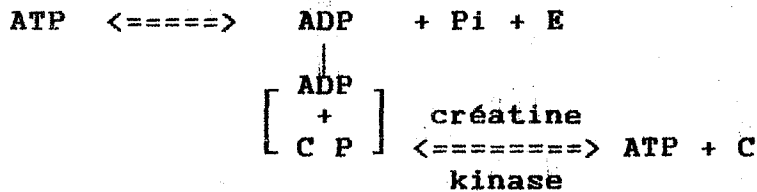
1.1.2. MECANISMES DE RECONSTITUTION DE L'ATP

Le premier mécanisme immédiatement disponible consiste en la dégradation de la créatine-phosphate qui se trouve en réserve dans le muscle. La créatine-phosphate (CP), dont la composition chimique est présentée ci-dessous, est un phosphagène possédant, comme l'ATP, une liaison phosphate riche en énergie.



D'après les méthodes chimiques d'analyses, ce composé est emmagasiné dans les cellules musculaires à un taux de 15 à 17 mmol/kg de muscle. Il semble cependant que ces méthodes classiques sousestiment les réserves de CP lesquelles, mesurées par RMN, représentent un taux de 23,6 mmol/kg (123), soit plus de quatre fois supérieur aux réserves d'ATP.

L'ATP dégradé au cours de la contraction musculaire est continuellement resynthétisé grâce à l'énergie libérée par la dégradation de la créatine-phosphate (CP) qui cède sa liaison phosphate à l'ADP issu de la dégradation d'ATP :



La liaison énergétique de la créatine phosphate contient environ 9,5 kcal/mol dans les conditions de l'organisme contre 8,0 pour l'ATP. Cette forte énergie, par rapport à celle libérée par l'ATP, permet un transfert d'énergie si rapide vers l'ATP que la quasi-totalité de la CP doit être hydrolysée avant que la concentration de l'ATP ne diminue de façon significative. On peut donc considérer la CP comme un composé ayant une action d'épargne ou "tampon" sur l'ATP.

La créatine phosphate ne se comporte pas de la même façon que l'ATP; il ne sert pas d'agent de transfert d'énergie entre les nutriments et les systèmes cellulaires fonctionnels. Il ne peut se synthétiser qu'à partir d'ATP, et ne peut céder son phosphoryle qu'à l'ATP selon la réaction réversible ci-dessus, catalysée par la créatine kinase.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Au cours de l'effort, dès que le stock d'ATP diminue, la créatine phosphate est immédiatement hydrolysée pour reconstituer l'ATP. Si l'exercice est trop intense, la dégradation de la créatine phosphate se poursuit jusqu'à sa disparition complète, l'épuisement et donc l'interruption de l'épreuve, surviennent immédiatement après. Lors d'un exercice à intensité modérée, ce processus se prolonge jusqu'à ce que l'intervention d'autres sources permette une reconstitution permanente et complète de l'ATP consommé.

Lorsque l'utilisation de l'ATP diminue d'intensité, soit à l'arrêt de l'exercice, soit lorsque la puissance de l'exercice est abaissée, la créatine-phosphate est reconstituée par simple inversion du sens de la réaction.

La quantité totale d'énergie fournie par le système ATP-CP (phosphagènes) est très faible ($\approx 0,2$ kcal/kg) et est épuisée en une dizaine de secondes par un sprint. Les phosphagènes sont sollicités particulièrement par les mouvements rapides et puissants (départ d'un sprint, sauts, lancers etc..).

La faible diminution de la concentration de l'ATP et l'élévation de ses produits de dégradation, de même qu'elles déclenchent la dégradation de la CP, stimulent la glycolyse, la concentration de l'ADP constituant le principal facteur de régulation du niveau de libération de l'énergie (77). En effet, lorsque les muscles sont extrêmement actifs, de grandes quantités d'ATP sont transformées en ADP, en proportion directe avec le degré d'activité du muscle. Ce mécanisme augmente automatiquement les vitesses des réactions chimiques dont l'ADP est le facteur de régulation.

La glycolyse anaérobie consiste en la dégradation partielle des glucides (6C) en acide pyruvique (3C); lorsque l'approvisionnement en oxygène des muscles est insuffisant ou nul, l'acide pyruvique se transforme en acide lactique. La formation de deux molécules de lactate à partir d'une molécule de glucose apporte l'énergie nécessaire à la reconstitution de 2 ATP:



La glycolyse anaérobie, limitée par la phosphofructokinase (PFK), a un débit de production d'ATP plus bas que celui des phosphagènes, avec cependant, une capacité plus importante (d'une durée de 40 s environ). Au delà de cette durée, l'accumulation d'ions H^+ bloque les réactions enzymatiques de la PFK, stimulant la resynthèse d'ATP par le métabolisme aérobie, entraînant une diminution de l'intensité de l'effort ou l'arrêt total.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Ce mécanisme peut fournir environ 35 mmol d'ATP par kg de muscle (contre environ 29 pour les phosphagènes), assurant la majeure partie de l'énergie nécessaire à la réalisation d'exercices dont le coût énergétique représente 30 à 70 fois les dépenses de repos. L'approvisionnement de l'ATP, par cette voie énergétique, est rapide et joue un rôle très important dans les épreuves à puissance maximale d'une durée de près d'une minute. Bien que de grandes quantités d'ATP puissent être régénérées à partir de cette voie par unité de temps, il n'est pas possible de continuer l'exercice musculaire pendant une période de temps prolongée. En effet, en devenant trop importante, la modification des conditions physico-chimiques tissulaires liée à l'accumulation d'acide lactique empêche la poursuite de l'exercice. Si l'acide lactique ne peut être utilisé au fur et à mesure qu'il est produit, il s'accumule dans le tissu musculaire dont l'activité peut être perturbée.

Seul un approvisionnement suffisant en oxygène permet la poursuite d'un exercice pendant une période prolongée. Le rendement de la réaction est donc médiocre.

Le processus aérobie est constitué par l'oxydation dans le cycle de Krebs de l'acide pyruvique produit par la dégradation du glycogène ou d'acides gras. Le système aérobie comprend successivement :

- la glycolyse aérobie, qui se déroule sans accumulation d'acide lactique,
- le cycle de KREBS dans lequel les produits du métabolisme de l'acide pyruvique sont oxydés,
- le système de transport des électrons ou chaîne respiratoire, qui fournit l'énergie nécessaire à la synthèse de trois moles d'ATP par paire d'électrons transportée.

C'est au cours de cette dernière étape qu'est produite la majeure partie de l'ATP. Des molécules de NADH et de FADH₂ transfèrent à l'O₂ moléculaire les électrons qu'elles ont acquis au cours de l'oxydation des molécules alimentaires. La réaction libère une importante quantité d'énergie chimique dont une partie est utilisée pour la synthèse d'ATP. La chaîne de transport d'électrons (fig. 1.1) se trouve sur la membrane interne de la mitochondrie. L'énergie libérée par la chute des électrons à des niveaux d'énergie inférieurs est exploitée pour pomper des protons du compartiment mitochondrial interne vers l'extérieur. Le gradient électrochimique de protons ainsi engendré à travers la membrane mitochondriale interne entraîne à son tour un reflux de protons par l'intermédiaire d'un complexe enzymatique membranaire qui ajoute un groupement phosphate à l'ADP pour former l'ATP à l'intérieur de la mitochondrie. L'ATP nouvellement formé est transféré au reste de la cellule.

BASES PHYSIOLOGIQUES

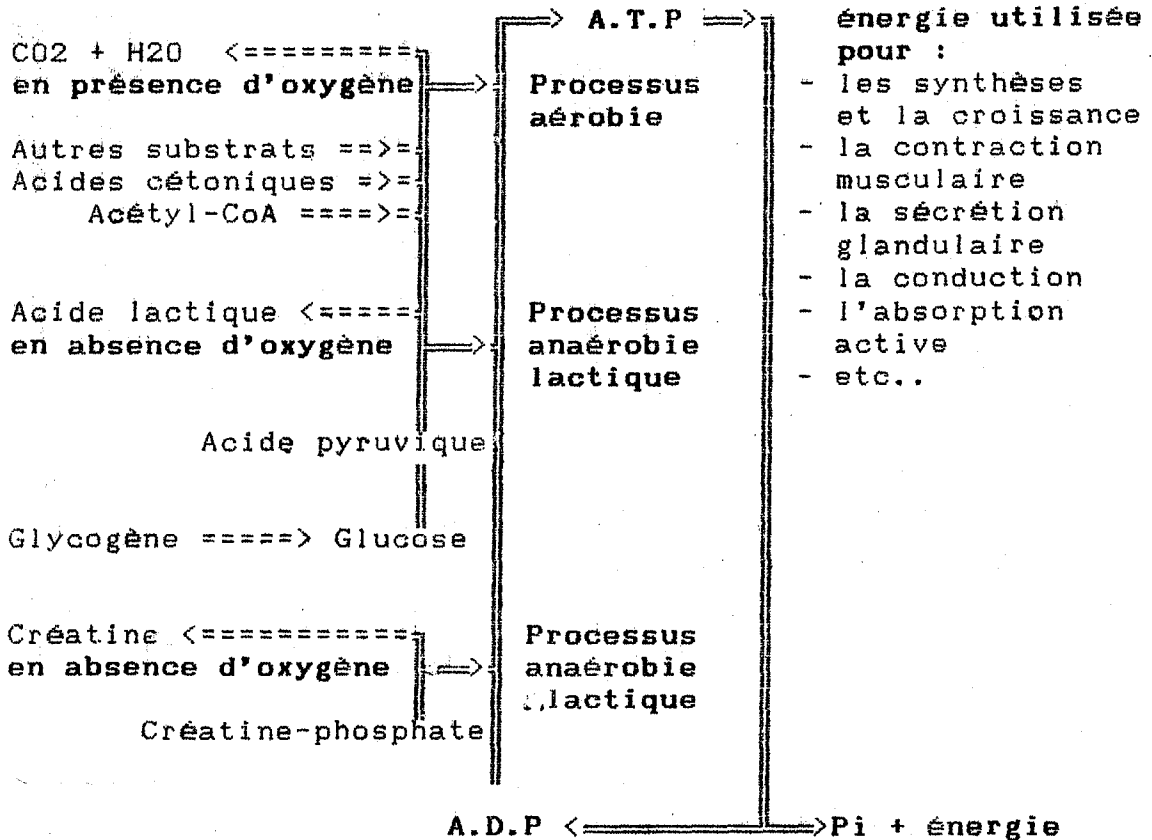


Figure 1.3: Schéma global des mécanismes de reconstitution de l'énergie

La consommation de l'énergie par les cellules est synthétisée par la figure 1.3 ci-dessus.

Cette figure représente l'utilisation anaérobie du glucose et du glycogène dans le but de former l'ATP. Elle présente également l'utilisation aérobie des substrats dérivés des hydrates de carbone, graisses, protéines et autres substances, pour former d'autres molécules d'ATP.

L'ATP est lui-même en équilibre réversible avec la créatine phosphate qui constitue la plus grande réserve d'énergie stockée dans la cellule.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Pour que le métabolisme aérobie contribue efficacement, l'oxygène doit être fourni aux mitochondries des cellules musculaires en quantité suffisante. Puisque l'oxygène provient de l'air ambiant, les processus respiratoire et cardiovasculaire doivent être capables de prélever et de livrer de grands volumes d'oxygène. Les sous-produits du métabolisme aérobie sont l'eau et le dioxyde de carbone. L'eau est partiellement retenue dans l'organisme pour contribuer au maintien de l'homéostasie, tandis que le CO₂ est rejeté dans l'atmosphère.

Avec l'augmentation de la ventilation pulmonaire, de la diffusion d'O₂ et de la circulation sanguine, la quantité d'O₂ transporté et utilisé est accrue; les réactions aérobies réussissent à fournir plus d'énergie à la fibre musculaire. Tant que l'oxygène est disponible pour l'oxydation des glucides et des lipides, dont l'organisme possède des réserves abondantes, ces réactions aérobies peuvent persister. Cependant, s'il y a augmentation soudaine de la dépense énergétique, ou si l'intensité de travail dépasse 50 à 60 % de la puissance maximale aérobie, la glycolyse anaérobie s'installe progressivement, pour participer à la libération de l'énergie chimique entraînant un déséquilibre physico-chimique progressif, lorsque l'état stable du système cardiorespiratoire n'est pas atteint (6, 77, 125).

Les trois mécanismes de reconstitution de l'ATP, décrits précédemment sont illustrés d'une manière synthétique par la figure 1.3.

1.1.3. CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

Les trois processus intervenant lors de l'exercice dans la fourniture d'ATP se caractérisent par :

- leur inertie: délai nécessaire à leur mise en jeu,
- leur puissance : quantité d'énergie qu'elles peuvent fournir par unité de temps,
- leur capacité : quantité totale d'énergie qu'elles sont susceptibles de produire,
- et par les facteurs susceptibles d'interrompre leur mise en jeu.

La connaissance de ces caractéristiques permet de mieux connaître les mécanismes physiologiques mis en jeu lors de différents types de pratiques sportives et de mieux comprendre les processus d'adaptation de l'organisme en fonction du type d'exercice à effectuer.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Les caractéristiques des trois processus de reconstitution de l'ATP, illustrées par la figure 1.4, se présentent succinctement comme suit :

La dégradation de la **créatine phosphate** intervient sans aucun délai, dès que la concentration musculaire en ATP diminue au début de l'exercice. Sa puissance est très élevée, et sa capacité réduite. Elle est sollicitée d'une manière prédominante lors d'exercices très courts et très intenses.

Contrairement au précédent, la vitesse de mise en route du **processus anaérobie lactique** est plus lente. Sa puissance est élevée et sa capacité moyenne. Elle intervient d'une manière prioritaire lors d'exercices courts et intenses.

Le **processus aérobie** présente une grande inertie, une faible puissance et une grande capacité. Elle intervient d'une manière prioritaire lors d'exercices longs et peu intenses.

Les échanges gazeux pulmonaires ne s'adaptent pas immédiatement aux besoins musculaires. Le délai pour atteindre un état d'équilibre est de plusieurs minutes pendant lesquelles l'organisme constitue un déficit d'oxygène. Le phénomène inverse se produit après la fin d'un exercice où la consommation d'oxygène reste un certain temps excédentaire par rapport aux besoins de repos, ce qui correspond, d'après Margaria (134), au paiement de la dette d'oxygène.

Cette adaptation progressive du processus aérobie aux besoins énergétiques s'explique essentiellement par sa dépendance vis à vis des systèmes de prélèvement et de transport de l'oxygène, c'est-à-dire respiratoire et circulatoire, qui, eux-mêmes ont une adaptation progressive.

1.1.4. UTILISATION DES TROIS SYSTEMES D'ENERGIE PENDANT L'EXERCICE

Les trois systèmes d'énergie ne peuvent être envisagés comme des processus isolés intervenant indépendamment l'un de l'autre pendant l'effort. Ils sont plutôt intégrés et interviennent de concert pour fournir l'ATP susceptible d'être altéré, pour satisfaire les besoins d'énergie du muscle. Les trois processus interviennent concurremment; cependant, les proportions d'ATP fourni par chacun des processus varieront en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Dans les conditions de repos, la plupart des molécules d'ATP dans le muscle squelettique est régénérée par les processus aérobie à un taux qui égale son taux d'utilisation. Une augmentation rapide de l'intensité de l'exercice est accompagnée par une accélération du taux de génération alactique d'ATP (essentiellement CP) et de glycolyse anaérobie (génération lactique d'ATP), suivie d'une accélération plus graduelle du métabolisme aérobie. Si le taux d'utilisation d'ATP peut éventuellement être compensé par la régénération aérobie, la contribution des deux autres systèmes sera proportionnellement réduite, aboutissant à des niveaux relativement stables d'acide lactique musculaire et plasmatique. Si l'intensité de l'exercice est extrêmement élevée, les systèmes anaérobies continueront à représenter la source majeure d'ATP. Cela se produit parce que la possibilité maximale du processus aérobie à fournir l'ATP est considérablement inférieure aux demandes en énergie du muscle.

La contribution des divers sources d'énergie en fonction du temps, pendant une activité maximale est illustrée par le tableau 1.1 et par la figure 1.4. Il y a une rapide chute de la performance musculaire et par voie de conséquence de l'utilisation d'énergie par le muscle dans le temps. Lors des périodes d'effort brefs (moins de deux minutes), lorsque l'utilisation d'ATP est élevée, la source d'énergie est d'abord anaérobie. Lorsque l'effort se poursuit, les sources aérobie contribuent dans une proportion accrue. Cela se passe parce que la voie oxydative est accélérée à ses possibilités maximales et parce que l'utilisation d'énergie par le muscle a été grandement réduite.

Tableau 1.1 : Contribution relative des processus aérobie et anaérobies en fonction de la durée d'un travail maximal

durée du travail	anaérobie alactique	anaérobie lactique	aérobie
5 s	85 %	10 %	5 %
10 s	50 %	35 %	15 %
30 s	15 %	65 %	20 %
1 min	8 %	62 %	30 %
2 min	4 %	46 %	50 %
4 min	2 %	28 %	70 %
10 min	1 %	9 %	90 %
30 min	1 %	5 %	95 %
1 h	1 %	2 %	98 %
2 h	1 %	1 %	99 %

(d'après Thoden et al. 1988)

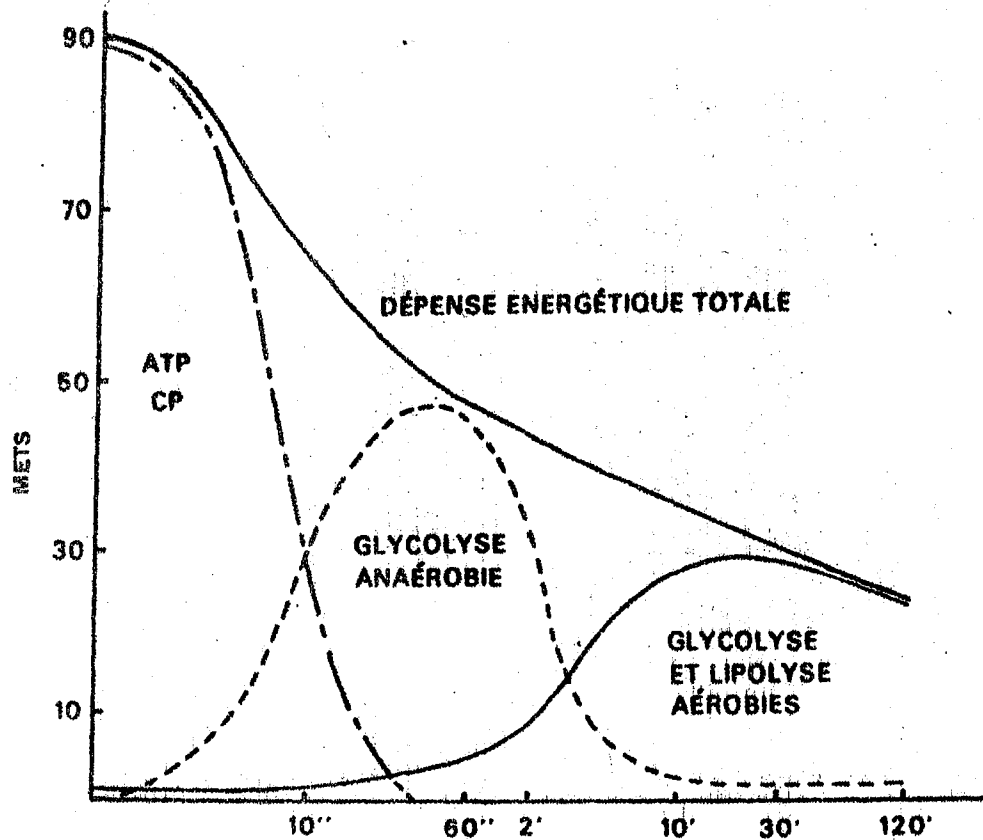


Figure 1.4: Contribution relative des différentes sources d'énergie du muscle squelettique humain à la dépense énergétique totale, selon la durée de l'exercice (Howald et al., 1978)

La durée de l'exercice (secondes) est présentée de façon logarithmique en abscisses. La dépense énergétique est présentée en ordonnées et exprimée en METS (1 MET équivaut à 70 J/kg.min).

D'une façon schématique, les trois processus énergétiques présentent les caractéristiques suivantes :

Source anaérobie alactique (ATP, CP) : inertie nulle, puissance très élevée, capacité réduite. Cette source est sollicitée lors d'exercices très courts et très intenses.

Source anaérobie lactique (glycolyse anaérobie) : faible inertie, puissance élevée, capacité moyenne. Elle est mise en jeu prioritairement lors d'exercices courts et intenses.

Source aérobie (glycolyse et lipolyse aérobie) : grande inertie, faible puissance, grande capacité. Intervient d'une manière préférentielle lors d'exercices de durée moyenne à longues durées.

1.1.5. MESURE DE L'ENERGIE DEPENSEE

La mesure de l'énergie dépensée par l'organisme, au repos comme à l'exercice, peut être effectuée directement, par application du premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie), il y a égalité entre la quantité d'énergie chimique provenant de l'oxydation des substrats et la somme des énergies mécanique et calorifique produites par le sujet. La calorimétrie directe est techniquement difficile à réaliser durant l'exercice chez l'homme et de ce fait, elle n'est pas utilisée.

La dépense énergétique est, en revanche, relativement facile à mesurer par calorimétrie indirecte. Comme plus de 95 % de l'énergie produite dans l'organisme provient d'une réaction de l'oxygène avec des nutriments divers, le métabolisme est calculé avec un degré satisfaisant de précision à partir du taux d'utilisation de l'oxygène. Lorsqu'un litre d'O₂ est métabolisé par le glucose, l'énergie libérée est de 5,01 kcal; lorsqu'il est métabolisé par l'amidon, l'énergie libérée est de 5,06 kcal; elle est de 4,70 kcal pour les lipides, et de 4,60 kcal pour les protéines. La synthèse d'une mole d'ATP nécessite une consommation de 3,45 litres d'oxygène si les glucides sont exclusivement utilisés et 3,96 litres à partir des graisses. Les quantités d'énergie libérées pour chaque litre d'oxygène consommé sont très proches, quel que soit le type d'aliment brûlé; l'équivalent énergétique moyen utilisé habituellement pour 1 litre d'O₂ est de 4,825 kcal.

A partir de l'équivalent énergétique de l'oxygène, on peut calculer approximativement le taux de libération de chaleur dans l'organisme à partir de la quantité d'oxygène utilisée au cours d'une période de temps donnée.

Le bilan d'énergie est plus facile à dresser si l'exercice est de puissance légère ou moyenne, mais même dans ces cas, la consommation d'oxygène ne fournit pas toute l'énergie nécessaire, notamment en début de l'épreuve. Il existe, en effet, toujours un excès de consommation d'oxygène après l'effort qu'il convient de prendre en compte lors du bilan énergétique. L'équivalent en oxygène de l'énergie non couverte par le métabolisme aérobie, pendant un exercice, est appelé déficit d'oxygène qui sera développé plus loin.

Ces différents aspects de la dépense énergétique seront abordés plus en détail tout au long de cette étude.

Compte tenu de l'importance capitale de l'oxygène dans l'apport énergétique, nous nous proposons de suivre, une molécule d'oxygène tout au long de son cheminement, depuis l'air ambiant jusqu'à l'intérieur de la cellule musculaire, pour mieux comprendre les adaptations, aiguës et chroniques liées à l'exercice, des systèmes de transport et d'utilisation de l'oxygène.

1.2. SYSTEMES DE TRANSPORT ET D'UTILISATION DE L'OXYGENE

Les organes qui assurent le transport de l'oxygène depuis l'air ambiant jusqu'aux différents tissus de l'organisme sont : les poumons, le coeur, le sang et le reste de l'appareil circulatoire. Ce cheminement de l'oxygène se trouve ainsi sous la dépendance d'une série de fonctions dont chacune peut constituer un facteur limitant la capacité à transporter une quantité suffisante d'oxygène aux cellules musculaires. Chez l'homme cinq étapes sont parcourues par l'oxygène (fig. 1.5) :

1- Prise d'oxygène : la ventilation pulmonaire assure le prélèvement de l'oxygène dans l'air atmosphérique et son transfert jusqu'aux alvéoles pulmonaires. Il s'agit d'un transport par convection gazeuse, c'est-à-dire que l'oxygène est véhiculé par les gaz ventilés jusqu'aux capillaires sanguins.

2- Diffusion alvéolo-capillaire : le transfert de l'oxygène des alvéoles pulmonaires vers le sang constitue la 2ème étape; l'oxygène se déplace passivement par diffusion d'un milieu vers un autre à concentration plus faible.

3- Transport circulatoire : à partir des poumons, l'oxygène est transporté par convection liquidienne à tous les tissus par la circulation sanguine, en utilisant l'hémoglobine comme transporteur.

4- Diffusion tissulaire : les échanges tissulaires représentent la 4ème étape de l'oxygène. Le transfert des capillaires artériels vers les mitochondries cellulaires se réalise par diffusion.

5- Consommation d'oxygène : l'oxygène est consommé par les réactions biochimiques à l'intérieur des mitochondries.

Les échanges d'O₂ et de CO₂ dépendent de la distance que doivent franchir les molécules et du gradient de pression de ces gaz.

BASES PHYSIOLOGIQUES

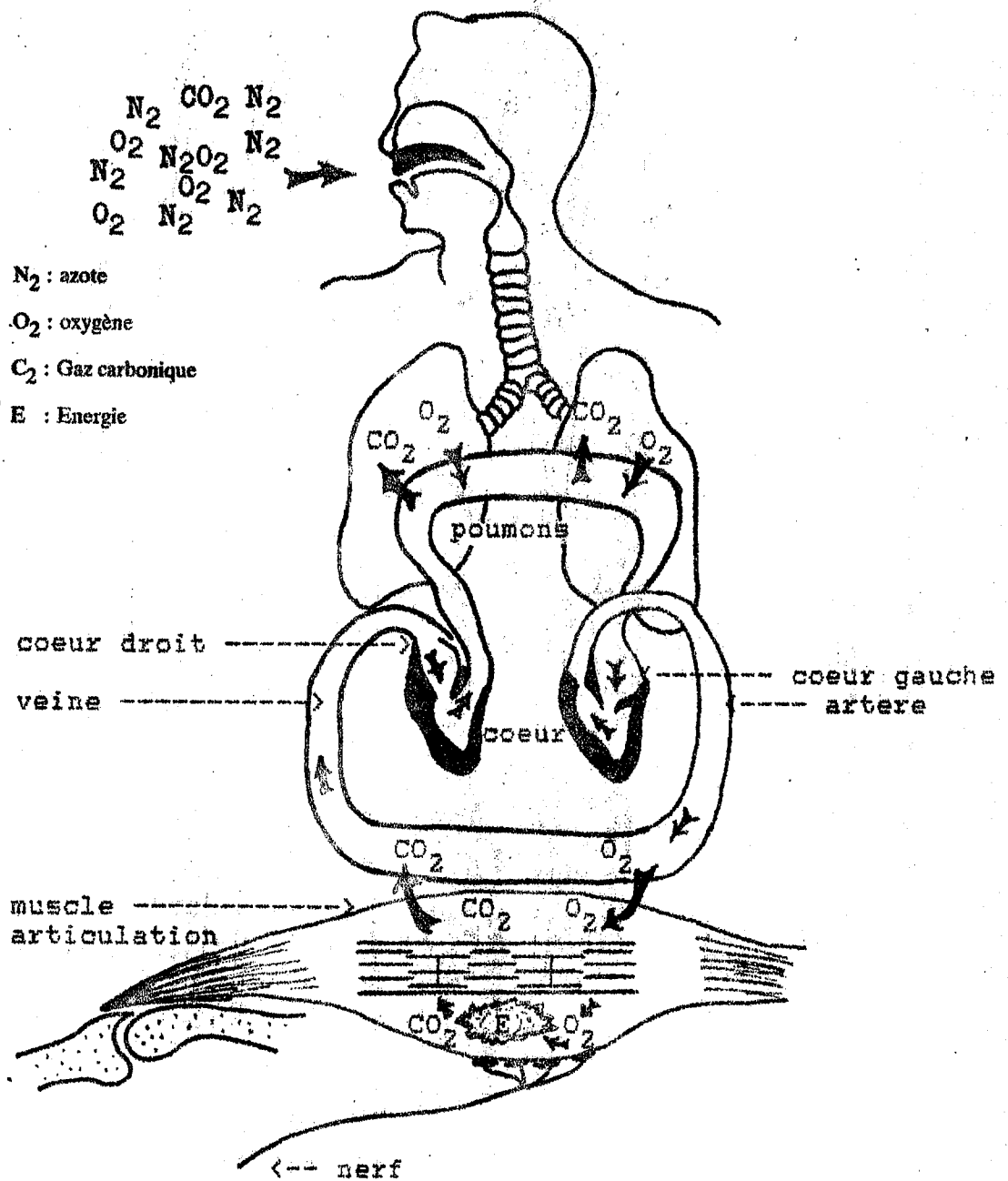


Figure 1.5: Cheminement de l'oxygène depuis l'air ambiant jusqu'aux muscles, et retour du CO_2 au milieu extérieur

BASES PHYSIOLOGIQUES

Au niveau d'un organisme unicellulaire, la surface suffit à assurer ces échanges : l'oxygène peut facilement atteindre par diffusion chaque point de la cellule, et le CO₂ peut être éliminé de la même façon.

Lorsque les surfaces d'échanges des gaz sont situées loin des sites où se déroule le métabolisme, deux systèmes assurent le transport de l'O₂ et du CO₂, entre la surface respiratoire et les cellules où se déroule le métabolisme : un système respiratoire assure le renouvellement de l'air au niveau des poumons et un système circulatoire assure les mouvements du sang. La structure en éponge de la surface d'échanges gazeux constitue une vaste surface de contact entre l'air et le sang. Chez un être humain adulte sain, cette surface de contact est estimée de 70 à 90 m², l'épaisseur du tissu interposé variant entre 0,2 et plusieurs microns (0,7 μ en moyenne).

De l'air et du sang frais doivent continuellement être apportés aux unités assurant les échanges gazeux. Les stocks d'O₂ de l'organisme sont très limités, et ni le système nerveux central ni le muscle squelettique ne peuvent tolérer la moindre interruption dans l'apport d'O₂ à leur niveau.

Le contenu en oxygène et en CO₂ du gaz quittant le poumon ne doit varier qu'entre des limites très étroites et, dans ces conditions, au niveau des multiples unités d'échanges, la distribution des gaz alvéolaires et celle du sang doivent être adaptées l'une à l'autre avec précision. En outre, les échanges gazeux et donc la perfusion des unités d'échanges, doivent être proportionnels à la consommation d'O₂ et à la production de CO₂ des tissus. Ceci suppose l'intervention d'un mécanisme régulateur assurant la coordination entre la ventilation et les besoins des cellules qui se trouvent à distance.

Dans ce chapitre, nous développerons successivement les différentes étapes de transport et d'utilisation de l'oxygène dans l'ordre de son cheminement à travers l'organisme, et décrirons les mécanismes mis jeu aussi bien au repos que durant l'exercice musculaire. Les deuxième et quatrième étapes citées précédemment, seront présentées dans un même paragraphe, car obéissant aux mêmes lois physiques.

1.2.1. LA VENTILATION PULMONAIRE

La ventilation pulmonaire constitue le mouvement global qui assure le déplacement des gaz respiratoires de l'extérieur vers l'intérieur des poumons et inversement. La quantité de gaz transporté dépend essentiellement du débit ventilatoire lequel étant sous l'influence conjointe de la fréquence respiratoire et du volume courant.

Par définition, la ventilation pulmonaire est égale au produit de la fréquence respiratoire par le volume courant.

Au repos, la fréquence respiratoire est d'environ 12 cycles par minute (c/min), et le volume courant de 500 ml en moyenne par cycle. Dans ces conditions, le volume d'air respiré par minute ou débit ventilatoire est de 6 l/min.

Une augmentation de la fréquence respiratoire (FR) ou du volume courant (VC) ou des deux, entraîne une augmentation substantielle du débit respiratoire. Au cours d'une épreuve maximale le débit ventilatoire peut dépasser 200 l/min chez des sportifs bien entraînés, soit près de 30 fois la valeur de repos. Cette augmentation de VE est due à une élévation simultanée de la fréquence respiratoire (qui passe de 8-12 à 50-60 c/min), et à une augmentation de la quantité d'air mobilisé par chaque mouvement (qui passe de 0,5 à 3,5 litres).

Lors d'un exercice à intensité modérée, le volume courant croît plus vite que la fréquence respiratoire, en fonction de la charge. Le volume courant augmente en empiétant sur les volumes de réserve inspiratoire et expiratoire. L'inspiration et l'expiration deviennent comparables par leur durée et leur déroulement. La capacité vitale représente la limite supérieure du volume courant, mais celui-ci dépasse rarement 50 à 60 % de cette capacité.

A partir d'une certaine charge, VC plafonne, l'accroissement de VE s'effectue presque exclusivement au dépens de la fréquence respiratoire; le volume courant trouvant sa limite quand il atteint 50 à 60 % de la capacité vitale des sujets entraînés ou non (69, 125).

1.2.1.1 Variation de la ventilation au cours de l'exercice

Au cours d'un exercice, de grandes quantités d'oxygène alvéolaire diffusent des poumons vers le sang veineux. En retour, une quantité à peu près équivalente de gaz carbonique diffuse du sang veineux vers les alvéoles. En contrepartie, le débit ventilatoire s'élève afin de maintenir constantes les concentrations des gaz alvéolaires et assurer les échanges gazeux.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Au cours d'un exercice à charge progressivement croissante, le débit ventilatoire croît d'une manière exponentielle en fonction de la charge de l'exercice (fig. 1.6) et en fonction de la consommation d'oxygène.

Pour des charges modérées, VE augmente proportionnellement à $\dot{V}O_2$ et à $\dot{V}CO_2$. Pour ces charges, VE augmente principalement par augmentation du volume courant. A charges plus importantes, la fréquence respiratoire joue un rôle plus important, le volume courant ayant atteint sa valeur limite. Grâce à cet ajustement ventilatoire, l'aération du sang est complète car la PO_2 et la PCO_2 alvéolaires conservent pratiquement les mêmes niveaux qu'au repos (74).

Le rapport du débit ventilatoire et de la consommation d'oxygène ($VE/\dot{V}O_2$) correspond à l'équivalent respiratoire. Chez l'adulte sain, $VE/\dot{V}O_2$ est d'environ 25 litres d'air par litre d' O_2 consommé au cours d'un exercice à intensité modérée. A des niveaux d'exercice plus intenses, VE augmente d'une façon disproportionnée par rapport à $\dot{V}O_2$. Par conséquent, $VE/\dot{V}O_2$ augmente et peut atteindre 35 à 40 l d'air par litre d'oxygène consommé.

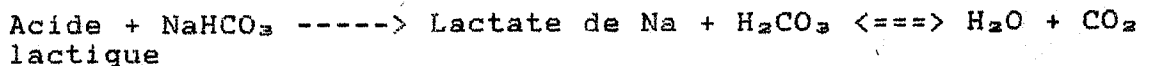
Figure 1.6: Evolution du débit ventilatoire en fonction de la charge de travail

BASES PHYSIOLOGIQUES

Au cours d'un exercice effectué en état d'équilibre, les muscles au travail utilisent et reçoivent suffisamment d'oxygène. La concentration d'acide lactique ne s'élève pas d'une manière significative au dessus de la valeur de repos.

Si le métabolisme aérobie ne suffit plus à couvrir les besoins énergétiques, la production d'acide lactique serait plus importante que son élimination d'où son accumulation dans le sang. L'intensité d'exercice ou la consommation d'O₂ correspondantes à laquelle la concentration d'acide lactique commence à s'élever au-dessus de la valeur de repos représente le seuil anaérobie (195). Ce seuil se situe entre 55 et 65 % de VO₂ max chez les sujets sédentaires, et peut dépasser 80 % chez les athlètes bien entraînés. Cette notion de seuil anaérobie sera développée au chapitre 3 réservé à ce thème.

La presque totalité de l'acide lactique produit par le métabolisme anaérobie est tamponnée par le bicarbonate de soude dans le sang selon la réaction suivante :



Le CO₂ libéré au cours de cette réaction est éliminé par les poumons au fur et à mesure que le sang veineux parvient aux poumons.

Au delà de ce seuil, l'augmentation de VE est plus importante que celle qui serait due à la seule production de CO₂. On assiste à une diminution de la concentration artérielle de gaz carbonique afin d'assurer une compensation respiratoire à l'augmentation de l'acidose au cours d'un exercice anaérobie. L'hyperventilation, en abaissant la pression partielle du CO₂ de l'air alvéolaire, augmente sa diffusion à partir du plasma et favorise la production d'eau et de CO₂.

Une partie de l'acide carbonique formé s'élimine ainsi par le tamponnement de l'acide lactique, ce qui contribue au maintien de l'équilibre acido-basique. Toutefois, l'hyperventilation augmente beaucoup la dépense énergétique des muscles respiratoires et il est possible qu'au delà d'une certaine valeur de la ventilation pulmonaire, l'augmentation de la consommation d'oxygène globale ne servirait plus qu'à couvrir les besoins énergétiques des muscles respiratoires (148).

1.2.1.2 Influence de l'entraînement sur la fonction pulmonaire

Bien que certaines mesures de la fonction pulmonaire constituent de bons indices de l'ampleur d'une obstruction pulmonaire et s'améliorent avec l'entraînement, chez les malades comme chez les individus en bonne santé (168), elles constituent de piètres indices de performance ou d'aptitude physique lorsqu'elles sont situées dans les limites de la normalité. En effet, des sujets non entraînés en bonne santé présentent la même capacité vitale moyenne que des sujets entraînés (169). De même, les volumes et débits ventilatoires des athlètes ne diffèrent pas de ceux d'individus témoins aux caractéristiques anthropométriques comparables (133).

Après normalisation des valeurs de volumes pulmonaires selon les caractéristiques morphologiques, on n'observe aucune relation entre la fonction pulmonaire et les résultats de tests physiques (125).

Bien qu'on relie souvent les sensations de fatigue d'un effort vigoureux aux sensations "d'essoufflement", il semble que la capacité ventilatoire ne soit pas un facteur limitatif de la performance physique. Les volumes et débits pulmonaires plus importants de quelques athlètes pourraient traduire le renforcement des muscles respiratoires par un entraînement spécifique, ils sont aussi attribués à des facteurs génétiques (74).

L'entraînement physique provoque différentes adaptations ventilatoires :

- il réduit la ventilation pour une même charge submaximale entraînant une réduction du coût énergétique de la respiration,
- augmente la ventilation maximale et
- améliore l'endurance des muscles respiratoires par augmentation de la concentration des enzymes oxydatives (145).

Si l'entraînement augmente la ventilation maximale, en revanche, celle-ci n'est pas corrélée à l'aptitude physique. Bien que l'influence de ces adaptations sur la performance physique ne soit pas évidente, il semble que la réduction de la ventilation au cours d'un exercice sous-maximal et l'amélioration de l'endurance des muscles respiratoires, retarderaient l'installation de la fatigue lors de l'effort musculaire (28). En effet, la fatigue respiratoire reliée aux sensations d'essoufflement, semble être attribuée à la concentration locale d'acide lactique particulièrement élevée chez des sujets sédentaires (137).

1.2.2. ECHANGES GAZEUX DANS LES POUMONS ET LES TISSUS

Les échanges gazeux entre les alvéoles pulmonaires et le sang et entre celui-ci et les tissus sont passifs et obéissent aux lois physiques de la diffusion. Le sens et la vitesse du déplacement des gaz sont déterminés par la différence de leur pression partielle. La figure 1.7 illustre les gradients de pression favorables aux échanges gazeux dans l'organisme.

1.2.2.1 Echanges gazeux dans les poumons : Au repos, la pression des molécules d'oxygène (PO_2) des alvéoles est environ 13,3 kPa (100 mmHg), elle est de 5,3 kPa (40 mmHg) dans le sang veineux pulmonaire. Par conséquent, l'oxygène diffuse des alvéoles à travers la barrière alvéolo-capillaire et se dissout dans le sang. D'un autre côté, la pression exercée par le gaz carbonique est légèrement plus grande dans le sang veineux (6,1 kPa) que dans l'air alvéolaire (5,3 kPa) entraînant sa diffusion du sang vers les alvéoles. L'azote qui n'est ni utilisé ni produit au cours des réactions métaboliques conserve la même pression des deux côtés de la barrière alvéolo-capillaire.

Dans les conditions normales, aussi bien au repos qu'au cours de l'exercice, les processus de diffusion sont tellement rapides que, au niveau du sang quittant les capillaires pulmonaires, les gaz sont pratiquement en équilibre avec ceux des alvéoles. En normoxie, on admet généralement que la diffusion des gaz est suffisante pour assurer leur équilibre de pression entre le sang capillaire pulmonaire et l'air alvéolaire.

1.2.2.2 Echanges gazeux dans les tissus : Au niveau des tissus qui consomment de l'oxygène et produisent du gaz carbonique en quantité à peu près égale, les pressions des gaz peuvent différer grandement des pressions dans le sang artériel. Au repos, PO_2 moyenne du liquide adjacent à la fibre musculaire descend rarement sous 5,3 kPa. Au cours d'un exercice intense, la pression de l'oxygène dans le tissu musculaire peut s'abaisser jusqu'à 0,4 kPa et la pression de CO_2 peut s'élever jusqu'à 12 kPa. C'est la différence entre les deux milieux (plasma et cellules) qui constitue le gradient de diffusion. L'oxygène quitte le sang et diffuse vers la cellule tandis que le CO_2 fait le chemin inverse. Le sang retourne au cœur par les veines puis est pompé vers les poumons. Quand le sang pénètre le réseau capillaire, la diffusion s'amorce à nouveau rapidement.

L'organisme ne cherche pas à se débarrasser totalement de son CO_2 . Au contraire, le sang artériel a une PCO_2 de 5,3 kPa et son contenu de CO_2 est de 50 ml par litre de sang. Ce "taux de réserve" de CO_2 fournit le stimulus chimique nécessaire au contrôle de la respiration par son effet sur le centre respiratoire dans le tronc cérébral.

En ajustant la ventilation alvéolaire aux besoins métaboliques, la composition gazeuse alvéolaire demeure relativement constante, même au cours d'un effort intense qui peut multiplier par 25 la consommation d'oxygène et la production de CO_2 .

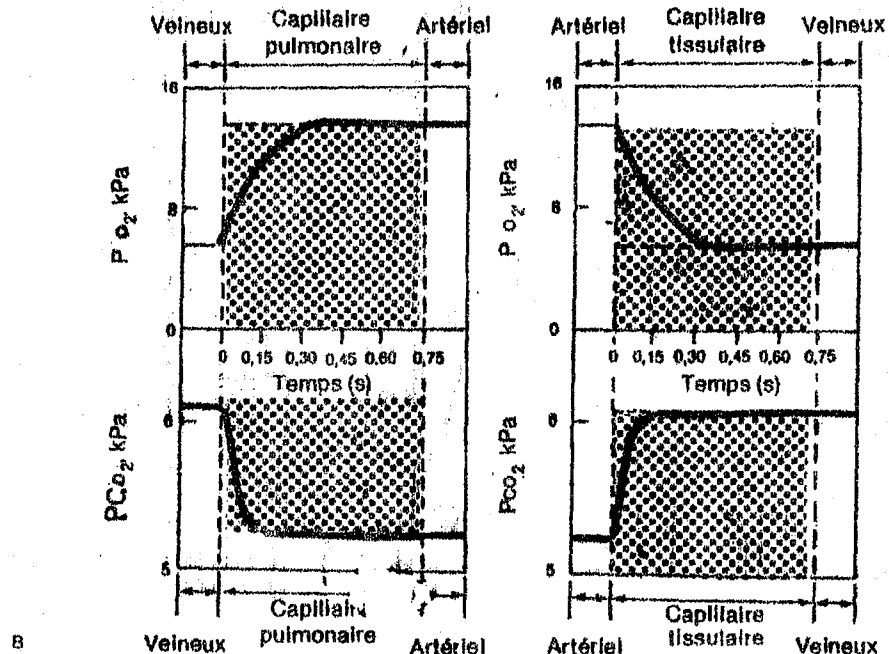
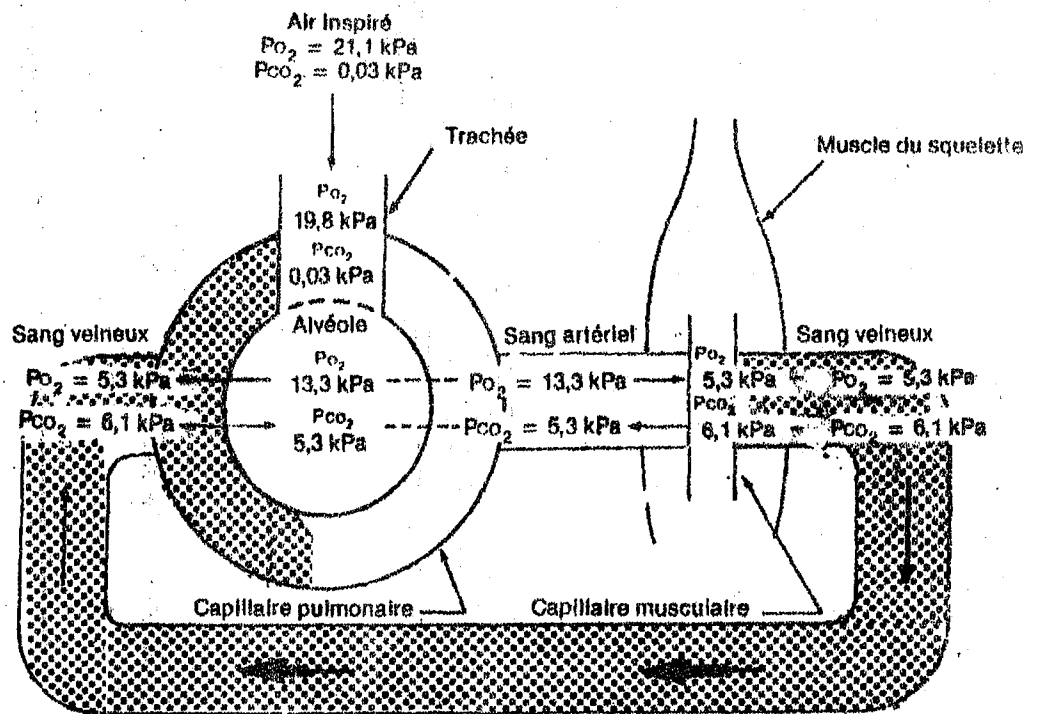


Figure 1.7 : Gradients de pression favorables aux échanges gazeux dans l'organisme au repos.

En A, sont indiquées la PO_2 et PCO_2 de l'air atmosphérique, trachéal et alvéolaire et leurs valeurs dans le sang artériel et veineux et dans les muscles. Les mouvements des gaz au niveau des membranes alvéolo-capillaires et capillo-tissulaires se fait toujours d'une région de haute pression vers une région de basse pression.

En B, est indiquée la durée des échanges. Au repos, le sang demeure durant 0,75 s dans les capillaires pulmonaires et tissulaires. Au cours d'un exercice maximal, le temps de transit est d'environ 0,4 s, ce qui est suffisant pour une complète aération du sang (Fox et Mathews, 1984).

1.2.3. TRANSPORT CIRCULATOIRE

L'oxygène qui diffuse des alvéoles au sang capillaire pulmonaire est transporté jusqu'aux tissus où il est consommé. Inversement, le CO₂ qui diffuse des tissus au sang des capillaires tissulaires est transporté jusqu'aux alvéoles pour y être éliminé lors de l'expiration pulmonaire. Une des principales fonctions du système cardio-vasculaire est d'assurer le transport des gaz. Le sang joue le rôle de véhicule, les vaisseaux sanguins celui de voies de communication, tandis que le coeur par son rôle de pompe assure une circulation ininterrompue à travers les divers tissus de l'organisme.

1.2.3.1 La capacité du sang à transporter l'oxygène

L'oxygène est transporté de deux façons dans le sang: en solution dans la fraction liquide du sang (plasma), et en combinaison avec l'hémoglobine contenue dans les globules rouges.

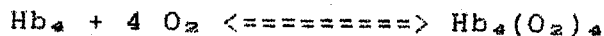
L'oxygène dissous

La quantité d'oxygène dissoute dans le sang représente 3 ml par litre de plasma, soit au total 15 ml pour un volume sanguin de 5 litres. L'oxygène qui diffuse dans le plasma n'est soumis à aucune réaction chimique : il est simplement dissous dans le plasma pour être transporté en solution vers les tissus.

Cet oxygène en solution ne joue qu'un rôle mineur dans l'apport en oxygène des tissus, par contre, son rôle physiologique est important. Sa pression conditionne la régulation de la respiration; elle détermine aussi la quantité d'oxygène associé à l'hémoglobine et dissocié dans les poumons et les tissus.

Oxygène en association à l'hémoglobine

L'hémoglobine sert à augmenter la capacité de transport sanguin de l'oxygène. Il permet au sang de transporter près de 65 fois plus d'oxygène que n'en contient normalement le plasma. Chaque litre de sang retient 197 ml d'O₂ en association temporaire à l'hémoglobine. Chacun des 4 atomes de fer de la molécule d'hémoglobine peut capter, par une réaction réversible, une molécule d'oxygène :



Cette réaction ne nécessite aucune enzyme. La formation d'oxyhémoglobine ne dépend que de la pression partielle de l'oxygène en solution.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Capacité de transport de l'O₂ de l'hémoglobine : Chez l'homme, on retrouve normalement 15 g d'hémoglobine par 100 ml de sang. Les femmes en ont généralement moins (13 g/100 ml), cette différence liée au sexe explique en partie la plus faible capacité aérobie des femmes.

Chaque gramme d'hémoglobine peut retenir temporairement 1,34 ml d'O₂; par conséquent, lorsque l'hémoglobine est totalement saturée d'oxygène, un litre de sang peut fixer 200 ml d'oxygène. La capacité de transport de l'oxygène varie très peu car la concentration de l'hémoglobine dans le sang est peu modifiée par l'entraînement.

PO₂ au niveau des poumons : la saturation moyenne de l'hémoglobine par l'O₂ est d'environ 98 % quand la pression alvéolaire est normale (13,3 kPa ou 100 mmHg). À cette pression le sang artériel pulmonaire transporte 19,7 ml d'O₂ par 100 ml de sang artériel (fig. 1.8); comme 0,3 ml d'O₂ est dissous dans le plasma, 20 ml d'O₂ au total est transporté par 100 ml de sang artériel.

PO₂ dans les tissus : au repos, la PO₂ dans les liquides cellulaires est d'environ 5,3 kPa (40 mmHg). L'oxygène dissous dans le plasma diffuse à travers la membrane du capillaire vers les liquides intracellulaires. La PO₂ plasmatique devient donc inférieure à la PO₂ du globule rouge, ce qui provoque une dissociation de l'oxyhémoglobine. L'oxygène relâché quitte le globule rouge, traverse la paroi capillaire et pénètre dans les cellules voisines.

Au niveau des tissus, à la PO₂ capillaire de repos (5,3kPa), l'hémoglobine est saturée d'oxygène à environ 70% (fig. 1.8). Le sang veineux en provenance des tissus transporte environ 15 ml d'O₂/100 ml de sang; les tissus ont retenu près de 5 ml d'oxygène. Cette différence entre le taux d'O₂ du sang artériel et celui du sang veineux est appelée la différence artério-veineuse d'oxygène, ou différence a-vO₂.

a-vO₂ au repos est normalement de 5 ml d'O₂/100 ml de sang environ. L'énorme quantité d'oxygène encore associée à l'hémoglobine constitue une réserve dans laquelle les cellules peuvent puiser de l'oxygène à tout instant si les besoins métaboliques se manifestent. Avec l'augmentation des besoins cellulaires d'O₂ au cours de l'effort, la PO₂ tissulaire diminue et une plus grande quantité d'oxygène est relâchée. Au cours d'un exercice intense par exemple, seulement 5 ml d'O₂ reste associé à l'hémoglobine quand PO₂ extracellulaire atteint le niveau de 2 kPa (15 mmHg). La différence a-vO₂ augmente donc de 15 ml d'O₂/100 ml de sang. Au cours d'un exercice épuisant, l'hémoglobine cède presque tout son oxygène aux tissus avoisinants.

Effet Bohr : La courbe de la figure 1.8 correspond à la courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine en période de repos à un pH artériel de 7,4 et à une température tissulaire de 37°C. Les courbes réduites de droite de la même figure illustrent d'autres importantes propriétés de l'hémoglobine. Toute augmentation de l'acidité, de la température ou de la concentration de CO₂ déplace la courbe vers la droite. C'est l'effet Bohr, conséquence de la modification de la structure moléculaire de l'hémoglobine. L'effet Bohr décrit la baisse de la capacité de l'hémoglobine à retenir l'oxygène, particulièrement à une PO₂ située entre 2,6 et 5,6 kPa (20 et 50 mmHg). Ce phénomène est particulièrement important au cours de l'exercice intense, car l'oxygène doit être libéré en grande quantité aux tissus actifs produisant de la chaleur, du CO₂ et de l'acide lactique.

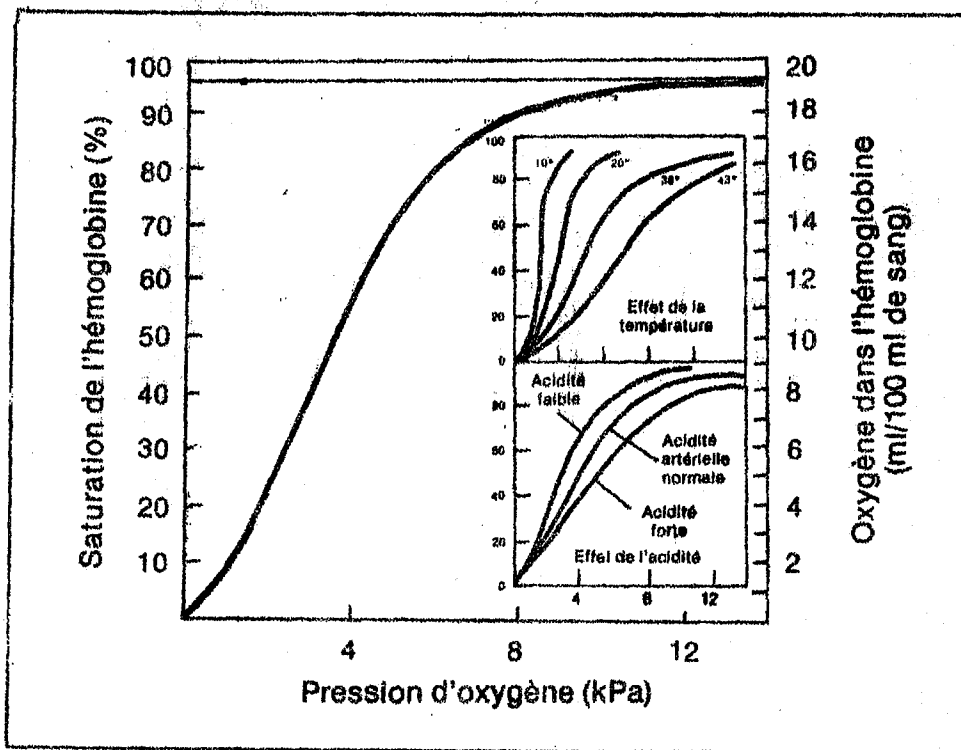


Figure 1.8 : Pourcentage de saturation de l'hémoglobine en fonction de la pression de l'oxygène (Mac Ardle et al. 1987).

La quantité d'oxygène transporté par 100 ml de sang est indiquée sur l'ordonnée de la droite. Les courbes des encarts montrent l'effet de la température et de l'acidité sur l'affinité de l'hémoglobine sur l'oxygène.

1.2.3.2 La capacité du sang à transporter le CO₂

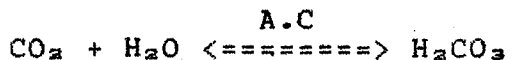
Une fois le gaz carbonique produit dans la cellule, il s'échappe par diffusion et s'achemine par les veines vers les poumons au niveau desquels il est éliminé. Comme pour l'oxygène, une petite fraction de CO₂ est dissoute dans le plasma veineux créant la PCO₂ du sang. Le gaz carbonique s'associe aussi à l'hémoglobine et une quantité relativement importante se combine à l'eau pour former le bicarbonate qui sera transporté jusqu'aux poumons. La figure 1.9 illustre les différents modes de transport du gaz carbonique des tissus aux poumons.

Transport du CO₂ en solution

Environ 5% de CO₂ produit au cours du métabolisme énergétique est transporté en solution dans le plasma. Cette petite quantité de gaz carbonique dissoute crée la PCO₂ du sang.

Transport du CO₂ dans le bicarbonate

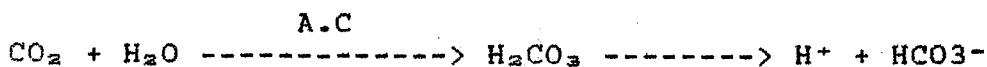
Le gaz carbonique dissous se combine à l'eau par une réaction réversible qui aboutit à la formation d'acide carbonique sous l'action de l'anhydrase carbonique (A.C):



L'anhydrase carbonique, constituant le catalyseur, accélère de 5.000 fois la réaction de l'eau et du CO₂, ce qui fait que la réaction atteint son équilibre avant que la sang ne quitte les capillaires.

Une fois formée, la quasi-totalité de l'acide carbonique se dissocie en ions hydrogène (H⁺) et en ions bicarbonate (HCO₃⁻) :

au niveau des tissus



L'ion H⁺ est tamponné par la portion protéinique de l'hémoglobine afin de conserver le pH à l'intérieur de limites rapprochées. Comme le bicarbonate (HCO₃⁻) se dissout bien dans le sang, il diffuse du globule rouge vers le plasma en échange d'un ion chlore (Cl⁻) qui passe dans le globule rouge pour assurer l'équilibre ionique (fig. 1.9). C'est l'effet "de déplacement du chlore" par lequel les érythrocytes du sang veineux s'enrichissent de chlore, de sorte qu'ils en contiennent plus que le sang artériel, particulièrement au cours d'un exercice.

60 à 80 % du gaz carbonique produit est transporté sous forme de bicarbonate. La formation de bicarbonate suit la loi

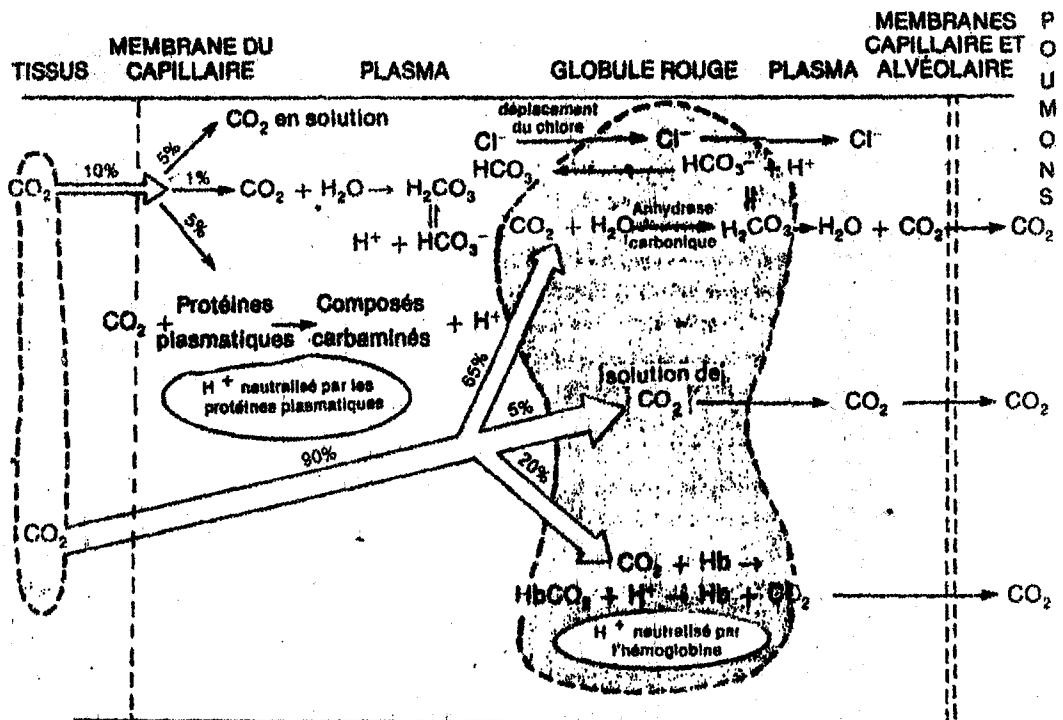


Figure 1.9: Transport du gaz carbonique dans le plasma et dans les globules rouges sous forme de CO₂ en solution, de bicarbonate et de composé carbaminé (Mac Ardle, et al. 1987).

1.2.3.3 La capacité cardiaque

Le débit cardiaque est le premier indicateur de la capacité du système cardio-vasculaire à satisfaire les besoins de l'organisme à l'effort. Le débit cardiaque est déterminé par la fréquence cardiaque (FC) et par la quantité de sang éjecté à chaque battement cardiaque (volume d'éjection systolique "VS"), suivant la relation :

$$Qc = FC \times VS.$$

Au repos, le débit cardiaque (Qc), est d'environ 6 l/min, Il varie cependant beaucoup au repos; il est influencé par l'état émotionnel du sujet, modifiant l'influence corticale sur les nerfs cardio-accélérateurs et vasomoteurs.

Le débit cardiaque augmente proportionnellement à la consommation d'oxygène et donc à l'intensité de l'exercice. Il existe une étroite relation entre les valeurs maximales du débit cardiaque et de la consommation d'oxygène. Plus le débit cardiaque maximal est élevé, plus la consommation maximale d'oxygène est importante. Chez les sportifs de haut niveau, le débit cardiaque peut atteindre 40 l/min environ, au cours de l'exercice maximal contre 20 l/min environ chez le sujet sédentaire, pour une même fréquence cardiaque maximale. Cette différence entre athlètes et sédentaires est liée exclusivement à leur différence de volume d'éjection systolique (VS).

Le volume d'éjection systolique (VS)

La valeur de VS au repos se situe entre 70 et 90 ml par battement cardiaque chez le sujet sédentaire; les valeurs maximales varient d'un individu à l'autre et sont comprises entre 100 et 120 ml. Chez le sujet entraîné, VS au repos est d'environ 100 à 120 ml et peut atteindre 200 ml par battement lors de l'effort maximal.

L'augmentation de VS résulte d'une augmentation de la force de contraction du myocarde laquelle est sous la dépendance de facteurs nerveux et hormonaux.

Au repos 50 % du volume télédiastolique total est éjecté à chaque contraction ventriculaire. Une contraction plus puissante peut augmenter le VS en vidant plus complètement les ventricules, sans augmentation préalable du volume télédiastolique (70).

La fréquence cardiaque (FC)

FC est également sous le contrôle des influences nerveuses et hormonales qui contrôlent le volume d'éjection systolique. Elle augmente de façon linéaire chez les sujets entraînés ou non, au fur et à mesure de l'augmentation de la consommation d'oxygène ou de la charge de travail. Toutefois, dans certains

cas, cette relation peut changer avant que les valeurs maximales soient atteintes. Ceci est lié au fait que le volume d'éjection systolique atteint sa valeur maximale lors d'une charge sous-maximale (40 à 50 % de VO₂ max). A partir de cette charge, la fréquence cardiaque constitue le seul facteur responsable de l'augmentation du débit cardiaque.

La fréquence cardiaque maximale varie de façon importante d'un sujet à l'autre. Elle diminue généralement avec l'âge du sujet (cet aspect sera développé au paragraphe 2.4.1)

L'entraînement en endurance a un effet très prononcé sur la fréquence cardiaque. Il augmente la sensibilité du noeud sinusal à l'acétylcholine, dont l'effet est de ralentir la fréquence cardiaque. Cet effet est probablement doublé d'une réduction de l'activité parasympathique au repos. Cette adaptation par l'entraînement explique en partie la bradycardie de repos chez l'athlète qui est de l'ordre de 40 à 50 bpm. On ne sait pas encore précisément si c'est la bradycardie qui entraîne l'augmentation du volume d'éjection systolique ou si c'est l'inverse. En effet, l'entraînement du type endurance renforce le myocarde, le rendant capable d'une plus forte éjection systolique, de même qu'il augmente le tonus vagal provoquant un ralentissement de la fréquence cardiaque.

Le débit cardiaque au cours de l'exercice

Lors du passage du repos à l'exercice, l'augmentation du débit cardiaque est due à une augmentation simultanée du volume d'éjection systolique et de la fréquence cardiaque. Lors d'un exercice à charge croissante, le volume d'éjection systolique n'augmente plus lorsque la consommation d'oxygène atteint 40 à 50 % de sa valeur maximale, chez tous les sujets normaux qu'ils soient sédentaires ou entraînés. Toute nouvelle augmentation du débit cardiaque est uniquement liée à l'augmentation de la fréquence cardiaque. La fréquence cardiaque évolue alors linéairement avec VO₂, ou avec la charge développée.

L'entraînement augmente le débit cardiaque, la plus grande partie de cette amélioration provient de l'augmentation du volume d'éjection systolique. L'entraînement ralentit la fréquence cardiaque au repos et à l'exercice, de même qu'il réduit la fréquence cardiaque maximale, en particulier dans les sports du type endurance.

1.2.4. CONSOMMATION D'OXYGENE ET EXERCICE

1.2.4.1 Définition de la consommation d'oxygène

La consommation d'oxygène proprement dite comprend les réactions biochimiques qui, au sein des mitochondries, auront pour résultat final de produire de l'énergie avec formation d'eau et de CO₂.

Nous avons vu que la production d'énergie à partir de ce processus aérobie implique la dégradation d'un combustible dans la cellule musculaire en présence d'oxygène et que le combustible peut provenir de l'intérieur du muscle (acides gras libres, glycogène) et de l'extérieur du muscle (acides gras du tissu adipeux, glycogène hépatique). Pour que ce métabolisme contribue d'une manière significative à la production d'énergie, l'oxygène doit être fourni aux mitochondries des fibres musculaires en quantité suffisante.

Au repos l'organisme consomme globalement environ 250 ml d'oxygène par minute, la consommation d'oxygène musculaire en représente 20 à 25 %. Lors d'une épreuve musculaire à charge progressive, la consommation d'oxygène croît d'une manière linéaire avec la charge de travail et atteint des valeurs 8 à 25 fois supérieures à celle du repos. La consommation d'oxygène au niveau musculaire atteint des valeurs 100 fois supérieures à ce qu'elle est au repos. De tels accroissements de VO₂ sont rendus possibles grâce à l'accroissement simultané du débit cardiaque et de la différence artériovoineuse pour l'oxygène et grâce à la redistribution des circulations locales.

L'allure de la pente d'accroissement de VO₂ en fonction de la charge est indépendante de l'âge, du sexe et du niveau de pratique sportive. Pour une même charge constante, la consommation d'oxygène varie peu d'un sujet à un autre; les sujets se distinguent entre eux, par contre, par leur niveau maximum de consommation d'oxygène qui est atteint généralement en fin d'une épreuve maximale.

1.2.4.2 Définition de la consommation maximale d'oxygène

La consommation maximale d'oxygène correspond au taux maximal de libération d'énergie obtenu exclusivement à partir du processus oxydatif. Lors d'une épreuve maximale à charge progressive, VO₂ max correspond à la valeur à partir de laquelle la consommation d'oxygène se stabilise malgré toute nouvelle augmentation de la charge.

La puissance à partir de laquelle la consommation d'oxygène n'augmente plus est appelée puissance maximale aérobie (PMA). C'est pourquoi la capacité aérobie peut s'exprimer de façon équivalente aussi bien par VO₂ max que par PMA.

La consommation maximale d'oxygène d'un individu correspond au volume (V) par minute (point sur le V) d'oxygène (O₂) qu'il consomme lors d'une épreuve maximale et soutenue (max) : VO₂ max.

Les sujets entraînés se distinguent des sédentaires par le fait que leur VO₂ max est significativement plus élevé. Les valeurs importantes de VO₂ max enregistrées chez les athlètes sont attribuées à leur volume d'éjection systolique (et donc leur débit cardiaque) et leur différence artério-veineuse pour l'oxygène nettement plus élevées (tab. 1.2).

1.2.4.3 Mécanismes de l'augmentation de VO₂

L'organisme dispose de deux moyens pour augmenter sa consommation d'oxygène. Le premier est d'accroître la vitesse de la circulation sanguine (le débit cardiaque), le deuxième est de mieux utiliser l'oxygène transporté en assez grande quantité par le sang (différence artério-veineuse pour l'O₂).

Le débit cardiaque (Q_c) et la différence artério-veineuse pour l'oxygène (a-vO₂) s'ajustent, en effet, lors de l'exercice pour assurer un apport d'oxygène suffisant aux muscles actifs. La relation de Fick présentée ci-dessous exprime la relation existant entre la consommation d'oxygène et les différents facteurs de son transport (à l'exception de la ventilation pulmonaire):

$$VO_2 = \underbrace{FC \times VS}_{\text{débit cardiaque}} \times (a-vO_2)$$

VO₂ max d'un sujet et donc sa PMA, dépendent de l'efficacité de son système de transport de l'oxygène, et de la capacité de ses muscles à utiliser l'oxygène qui lui est livré.

Le tableau 1.2 présenté à titre d'exemple, fournit les facteurs définissant la consommation d'oxygène chez des sujets relativement sédentaires et chez des athlètes d'endurance de haut niveau.

Les résultats présentés au tableau 1.2 montrent qu'un programme d'entraînement intense d'une durée de 2 à 4 mois entraîne une amélioration de la consommation maximale d'oxygène de plus de 16 % et que la valeur enregistrée chez des sportifs pratiquant des sports d'endurance est près de deux fois plus élevée que celle du sédentaire (11).

BASES PHYSIOLOGIQUES

D'après les données présentées dans ce tableau, une amélioration de 16% de VO₂ max est accompagnée d'une amélioration du débit cardiaque de 8%, du volume d'éjection systolique de 11% et de la différence artério-veineuse pour l'oxygène (8%). La plus grande amélioration de VO₂ max provient de l'augmentation du volume d'éjection systolique. L'amélioration du débit cardiaque est elle-même liée à l'augmentation du volume d'éjection systolique.

Tableau 1.2: Données expérimentales, relatives aux facteurs de la capacité aérobie, enregistrées chez des sujets sédentaires, entraînés et chez des athlètes d'endurance.

	2-4 mois d'entraînement		athlètes d'élite
	Avant	Après	(endurance)
Consommation maximale d'oxygène (l/min)	3,1	3,6	5,6
Consommation maximale d'oxygène (ml/kg.min)	42	49	75
Différence artério-veineuse pour l'O ₂ (ml d'O ₂ /l)	144	155	156
Débit cardiaque (l/min)	21,5	23,2	36,0
Fréquence cardiaque (bpm)	196	192	190
Volume d'éjection systolique (ml)	110	122	189

Valeurs mesurées

- chez des sujets relativement sédentaires, âgés de 20 à 25 ans, avant et après 2 à 4 mois d'entraînement extrêmement intense.
- chez un groupe de sportifs d'élite, pratiquant des spécialités d'endurance (Bergh, 1978).

La différence artério-veineuse augmente légèrement avec l'entraînement, cette amélioration de la capacité d'extraction de l'oxygène est liée :

- à une amélioration de la microcirculation (172) par augmentation de la densité capillaire, offrant une plus grande surface d'échanges de nutriments et de gaz métaboliques au cours de l'exercice,

- à une amélioration de la capacité métabolique des fibres musculaires impliquées. Les mitochondries augmentent en taille et même en nombre, de même que la quantité d'enzymes oxydatives s'accroît.

Si l'on compare la différence artériovoineuse pour l'O₂ des sujets entraînés par rapport aux athlètes d'endurance ayant de nombreuses années d'entraînement, on constate une absence de différence. La différence de VO₂ max entre ces deux populations est donc essentiellement liée à leur différence de volume d'éjection systolique et donc à leur débit cardiaque.

1.2.4.4 Facteurs de variation de VO₂ max

La consommation maximale d'oxygène est influencée par de nombreux facteurs. Les plus importants sont le type d'épreuve, les caractères héréditaires, le niveau et le type de pratique sportive, l'âge, le sexe et la composition corporelle.

Le type d'exercice : On admet généralement que les variations de VO₂ max observées dépendent de la masse musculaire mise en jeu ainsi que du type de l'épreuve maximale réalisée. VO₂ max peut, en effet, varier chez un même sujet au cours de différents types d'exercice en fonction de la masse musculaire mise en jeu et des modalités de l'épreuve utilisée (tab. 1.3). C'est sur tapis roulant qu'on obtient généralement les valeurs de VO₂ max les plus élevées.

L'hérédité : On s'interroge souvent sur l'importance de l'hérédité dans le fonctionnement de l'organisme et de son influence sur la performance physique. Jusqu'à quel point une capacité aérobie exceptionnellement élevée des athlètes d'endurance est-elle déterminée par l'hérédité ? De toute évidence, un tel niveau de développement de la capacité fonctionnelle n'est pas le seul résultat de l'entraînement.

Des études réalisées sur des vrais et faux jumeaux, élevés dans des conditions sociales et économiques semblables ont permis de mettre en évidence l'importante influence du code génétique aussi bien sur la capacité aérobie qu'anaérobie (113, 114). Ces études ont montré, en effet, que l'hérédité pouvait expliquer une grande part des différences interindividuelles de VO₂ max et que le code génétique pouvait à lui-seul expliquer 86% des variations interindividuelles de la fréquence cardiaque maximale. Ces études indiquent en outre qu'une bonne part de l'amélioration de VO₂ max par l'entraînement est liée au génotype. Ceci est probablement en relation avec la constitution histologique et biochimique des fibres musculaires, elle-même étroitement liée au caractère héréditaire.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Niveau de pratique sportive : La valeur de VO₂ max dépend largement du niveau d'entraînement des sujets au moment de l'évaluation. Les améliorations de VO₂ max avec l'entraînement varient généralement entre 5 et 20%, chez les sujets entraînés, Elles peuvent atteindre exceptionnellement 40 % .

La valeur de VO₂ max dépend également du type de pratique sportive. Habituellement, les athlètes de haut niveau, dans des disciplines sportives qui requièrent un effort soutenu de plus de deux minutes, présentent un VO₂ max plus élevé que ceux qui pratiquent un sport nécessitant un effort plus bref ou plus intermittent.

Le sexe : VO₂ max des hommes est normalement de 15 à 30% plus élevé que celui des femmes. Les différences sont plus grandes si VO₂ max est rapporté en valeur absolue (l/min) plutôt qu'en valeur relative à la masse corporelle (ml/kg.min). Cette différence est généralement attribuée à des différences :

- de constitution corporelle : l'homme peut produire plus d'énergie en aérobiosé parce que, contrairement à la femme, sa masse musculaire est plus importante,
- et du taux d'hémoglobine dans le sang : sans qu'on sache pourquoi, la concentration d'hémoglobine est de 10 à 14 % plus élevée chez les hommes. Cette différence de capacité de transport sanguin d'oxygène avantage légèrement la capacité aérobie de l'homme.

Même si une importante musculature et une plus forte concentration d'hémoglobine avantagent l'homme en terme de puissance aérobie, cela n'explique pas totalement les différences observées entre les deux sexes. Il est probable que ces différences soient liées aux différences entre les activités normales de l'homme et de la femme (125).

Composition corporelle : Wyndham et al. (1969) estiment qu'une part importante des différences interindividuelles de VO₂ max dépend des différences de masse corporelle. C'est pour cette raison, essentiellement que VO₂ max s'exprime généralement en termes relatifs à la masse corporelle.

VO₂ max est également affecté par l'âge. VO₂ max (l/min) s'élève rapidement au cours de la croissance et atteint sa valeur maximale entre 18 et 25 ans. Cette amélioration apparente avec l'âge s'estompe lorsque VO₂ max est rapporté à la masse corporelle. Au delà de 25 ans, VO₂ max diminue régulièrement; cette diminution peut atteindre 27 % à l'âge de 55 ans (6).

1.2.4.5 Facteurs limitants de VO₂ max

Le débit maximum d'énergie qui peut être fourni par les processus oxydatifs est sous la dépendance de deux facteurs (fig. 1.10) :

- la capacité combinée des mécanismes pulmonaire, cardiaque, sanguin, vasculaire et cellulaire de capter, transporter puis de livrer aux muscles actifs l'oxygène nécessaire au travail (composante centrale),
- la possibilité chimique des fibres musculaires actives d'utiliser l'oxygène pour la dégradation des combustibles cellulaires (composante périphérique).

On ne sait pas encore laquelle des deux composantes est la plus limitative ou la plus entraînable. Bien qu'il soit possible d'isoler expérimentalement chacune de ces composantes, les mesures habituelles de la fonction aérobie considèrent le transport et l'utilisation de l'oxygène comme une seule unité. De ce fait, la quantité maximale d'énergie consommée par unité de temps est représentée par la consommation maximale d'oxygène, indice qui prend en compte l'ensemble des facteurs qui agissent sur les deux composantes.

Ce système de transport et d'utilisation de l'oxygène peut être comparé à une chaîne dont le maillon le plus faible limite la résistance totale de la chaîne.

Les physiologistes de l'exercice se penchent depuis de nombreuses années sur cette question de "facteurs limitants" de VO₂ max, mais sans les avoir encore tous identifiés de façon certaine.

Il ne semble pas que ce soit le système respiratoire : celui-ci est apparemment "surdimensionné" (5), et l'entraînement provoque différentes adaptations ventilatoires, mais celles-ci n'influent pas d'une manière significative sur VO₂ max. Il ne semble pas non plus que ce soit le volume du cœur; les athlètes présentent, certes, un cœur légèrement plus gros que la normale, mais la différence observée avec les sédentaires n'explique pas les grandes différences de VO₂ max que l'on constate entre athlètes et sédentaires. Il ne semble pas enfin que ce soit la concentration sanguine de globules rouges; l'entraînement modifie en effet, très peu la concentration sanguine de globules rouges et d'hémoglobine.

Il se pourrait donc que les facteurs limitant VO₂ max se situent plutôt au niveau de la distribution de l'oxygène aux muscles en activité et surtout de son utilisation par les muscles (148).

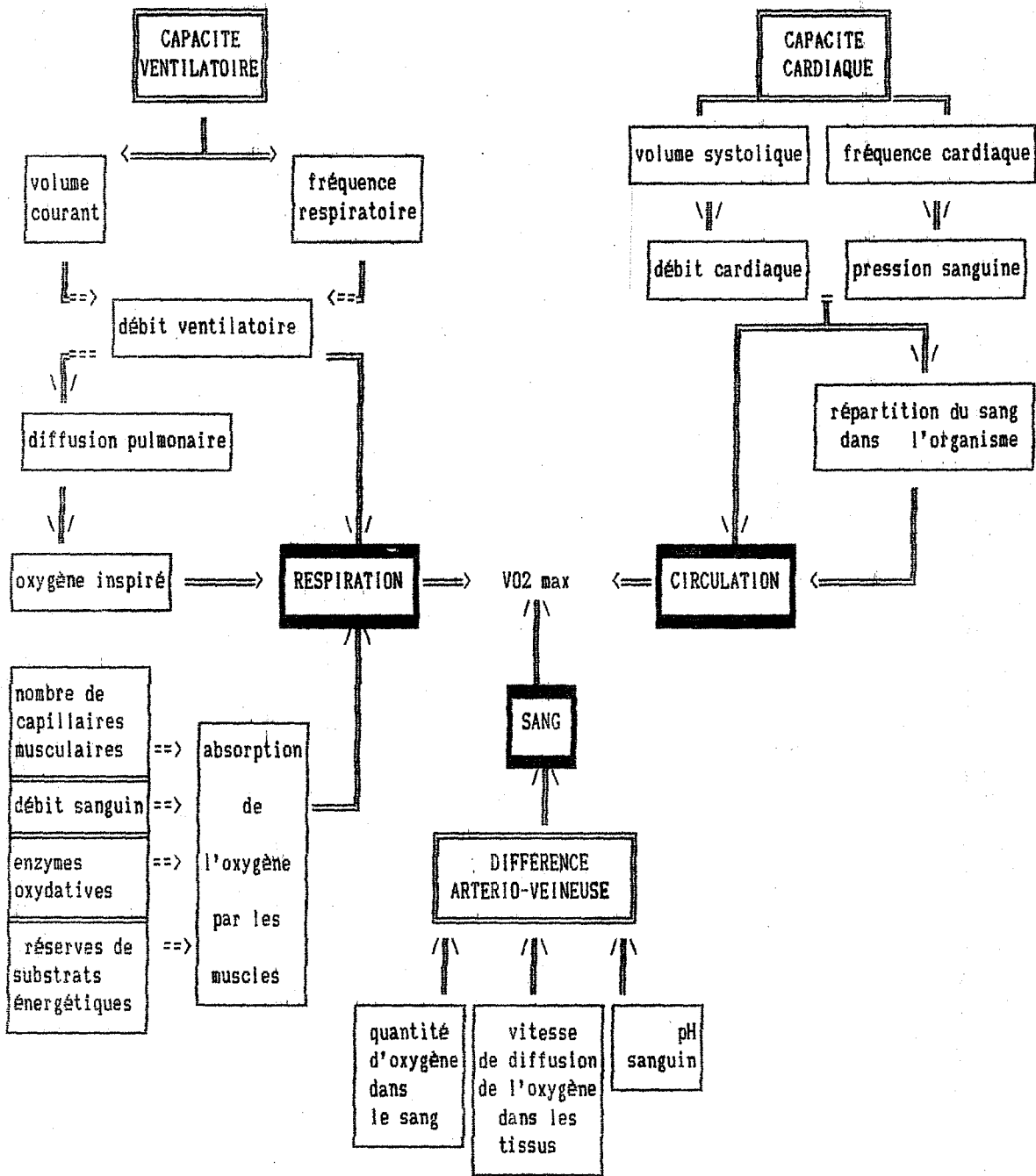


Figure 1.10: Principaux facteurs intervenant sur la consommation maximale d'oxygène

1.2.4.6 Consommation d'oxygène post-exercice

La notion de "dette d'oxygène" est issue en 1924 des travaux de Hill (88). Elle a été ensuite développée en 1933 par Margaria (134) qui soutient :

- qu'au début de l'exercice, les processus aérobies ne suffisent pas à satisfaire les besoins énergétiques de l'organisme, et sont suppléés par les réserves anaérobies en contractant un "déficit en oxygène".

- qu'après l'exercice, la consommation d'oxygène demeure, un certains temps, au-dessus des valeurs de repos. Cette consommation d'oxygène en excès sert à payer le crédit en oxygène contracté au début de l'exercice (d'où l'appellation de dette d'oxygène).

La principale contribution de Margaria (134) a été de suggérer que ce paiement s'effectue en deux étapes :

- la première alactacide, remboursée immédiatement pour la reconstitution des réserves de phosphagènes et de celles de l'O₂ se trouvant principalement dans l'hémoglobine et la myoglobine,

- la seconde, lactacide est remboursée plus lentement, elle correspond à l'élimination de l'acide lactique accumulé pendant l'exercice.

Selon la théorie classique de la dette d'oxygène, 10 à 25 % de l'acide lactique est oxydé afin de fournir l'énergie nécessaire à la resynthèse du glucose à partir des 75 à 90 % de l'acide lactique restant. Cette théorie admet qu'une partie de l'oxygène post-exercice est utilisée pour fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du système de transport de l'oxygène lui-même (cœur, muscles respiratoires), et qu'une autre partie pourrait être attribuée à l'élévation thermique au niveau musculaire, à l'activité de la pompe à sodium et à l'action de certaines hormones, comme les catécholamines dont les concentrations peuvent être plus élevées après l'exercice.

La théorie de la dette d'oxygène, qui a été admise en physiologie de l'exercice pendant près de 50 ans, n'apparaît plus soutenable aujourd'hui. Brooks et Fahey (25) ont suggéré une nouvelle interprétation de l'excès de consommation d'oxygène au cours de la récupération, qu'ils désignent sous le sigle de "EPOC" (Excess Post-Exercise Oxygen Consumption).

Les critiques formulées aujourd'hui à l'égard de la théorie classique de la dette d'oxygène résident essentiellement au niveau de l'interprétation de la composante lactacide de la dette. Les autres interprétations sont toujours maintenues, en attribuant une large part de l'excès d'oxygène à l'élévation thermique qui favorise la consommation d'oxygène au niveau des mitochondries. Par ailleurs, l'effort entraîne un déséquilibre entre les ions Na⁺ et K⁺ et des modifications hormonales qui

élèvent l'activité de la pompe à sodium ce qui nécessite de l'énergie et accroît la consommation d'oxygène.

On pense, en revanche, que l'accumulation d'acide lactique dans l'organisme ne peut pas provoquer par elle-même une élévation de la consommation d'oxygène et que par conséquent l'EPOC n'est pas lié à l'accumulation de l'acide lactique mais aux autres facteurs évoqués par la théorie classique.

Contrairement à ce qui a été admis depuis 1930, l'acide lactique accumulé au cours d'un exercice n'est pas converti en glucose dans une proportion de 75 à 90 % grâce à l'énergie libérée par l'oxydation des 25 à 10 % restant. En fait, il semble que la majeure partie de l'acide lactique accumulée pendant l'exercice (60 à 80%) soit oxydé pendant la récupération. L'acide lactique est, en effet, un triose qui constitue un excellent carburant pour la plupart des tissus de l'organisme : cerveau, coeur, foie, muscle. Après un exercice pendant lequel il a été accumulé, il est disponible en grande quantité pour ces tissus qui l'utilisent pour leurs besoins énergétiques.

Dans la théorie classique, l'augmentation des besoins énergétiques au cours de la récupération est expliquée par la conversion de l'acide lactique en glucose qui nécessite l'oxydation d'une molécule d'acide lactique pour la conversion de 3 ou 4 autres en glucose. Or les travaux récents montrent que l'acide lactique n'est pas reconverti en glucose pendant la récupération.

Dans la théorie actuelle, la partie de l'EPOC qui n'est pas expliquée par la reconstitution des réserves d'oxygène et de phosphagènes ni par l'augmentation de l'activité du système de transport de l'oxygène, est attribuée :

- à une réduction de l'efficacité des mécanismes par lesquels la cellule tire de l'énergie des réactions d'oxydation,
- et à une augmentation des besoins en énergie de la cellule pour maintenir des concentrations adéquates de sodium et de potassium de part et d'autre de sa membrane. L'élévation des catécholamines, des hormones thyroïdiennes et des glucocorticoïdes au cours de l'exercice rend la membrane cellulaire plus perméable aux ions sodium et potassium, une partie de l'EPOC permet d'accroître les pompes à sodium/potassium pour maintenir des concentrations adéquates des ces ions de part et d'autre de la membrane cellulaire.

1.2.5. REGULATIONS RESPIRATOIRES ET CIRCULATOIRES A L'EXERCICE

De nombreux ajustements respiratoires et circulatoires sont nécessaires au cours de l'exercice. Ces ajustements doivent être commandés et coordonnés. Cette fonction revient aux centres respiratoire et cardio-vasculaire du tronc cérébral.

En dépit de la multiplicité des travaux relatifs à cette question, on n'est pas encore parvenu à une vision d'ensemble satisfaisante des commandes ventilatoires et circulatoires (141). Nous nous limiterons ici à une description simplifiée et orientée vers la commande des ajustements imposés par l'exercice.

1.2.5.1 Régulation circulatoire à l'exercice

Il est admis qu'il existe une commande centrale localisée au niveau des centres circulatoires du tronc cérébral, et que ces centres reçoivent des informations provenant d'une part du cortex cérébral et du cervelet, d'autre part des muscles squelettiques, du coeur et de l'artère pulmonaire, et des baro-récepteurs. L'ensemble tronc cérébral-périphérie est organisé en boucle de rétro-régulation, dont le fonctionnement est modulé par le cortex cérébral et le cervelet. Les connaissances sur ces mécanismes sont encore très incomplètes.

Les afférences musculaires squelettiques intéressant la fréquence cardiaque et la pression artérielle empruntent des fibres des groupes III et IV. Certaines de ces fibres sont activées par une stimulation des racines ventrales provoquant une contraction musculaire statique ou des contractions rythmées par la fréquence de stimulation.

Les stimuli naturels des récepteurs musculaires impliqués pourraient être l'étirement, la contraction ou une modification biochimique locale. L'ion potassium pourrait jouer un rôle. Les stimuli qui activent les fibres III et IV expérimentalement sont du même ordre de grandeur que les stimuli naturels, et les modifications induites de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque constituent vraisemblablement une partie de la réponse à l'exercice.

Les fibres afférentes provenant de la région cardio-pulmonaire (les quatre cavités cardiaques et l'artère pulmonaire) empruntent le vague et des nerfs sympathiques et entrent dans la moelle. Les unes et les autres sont activées par des étirements. Leur rôle exact lors de l'exercice n'est pas déterminé. Elles ne semblent pas jouer un rôle important dans la réponse globale de l'appareil cardio-vasculaire à l'exercice, sauf peut-être en ce qui concerne le débit de la perfusion du myocarde.

BASES PHYSIOLOGIQUES

Les voies médullaires empruntées par les fibres afférentes musculaires et cardio-pulmonaires cheminant vers le tronc cérébral ont été identifiées, mais d'autres voies peuvent être empruntées sans que leur importance puisse être précisée.

Le cervelet, qui joue un rôle de première importance dans la coordination des mouvements, est impliqué également dans le contrôle du système cardio-vasculaire à l'exercice.

1.2.5.2 Ajustement de la ventilation à l'exercice

À l'exercice, l'ensemble des stimuli ventilatoires, humoraux et neurogéniques intervient, sans qu'il soit possible de préciser la part de chacun d'entre eux, et ce d'autant plus que la part revenant à un mécanisme peut varier avec le type d'exercice pratiqué.

Les stimuli neurogéniques sont d'origine proprioceptive et cérébrale, provenant respectivement de la stimulation de mécanorécepteurs des membres au cours des mouvements et d'une irradiation probable des zones motrices sur le centre respiratoire. Ces stimuli interviennent immédiatement au début et à l'arrêt de l'exercice dynamique (accrochage et décrochage ventilatoires).

Les stimuli humoraux PCO_2 , H^+ et PO_2 , auxquels il faut ajouter les catécholamines aux puissances élevées d'exercice, se développent plus lentement et prennent progressivement le pas sur les stimuli nerveux qui persistent toutefois aussi longtemps que dure l'exercice. Au décours de l'exercice, le phénomène de décrochage ventilatoire intervient immédiatement et est relayé par les stimuli humoraux qui persistent seuls après quelques secondes et conditionnent entièrement l'hyperventilation progressivement décroissante qui succède au décrochage initial.

Chapitre 2

Capacité aérobie

- 2.1. INTRODUCTION
- 2.2. MATERIEL ET METHODES
 - 2.2.1. POPULATION
 - 2.2.2. MATERIEL
 - 2.2.3. CLASSIFICATION DES PROTOCOLES
 - 2.2.3.1 Tests à charge constante
 - 2.2.3.2 Tests à charge progressive
 - 2.2.3.3 Tests d'évaluation indirecte
 - 2.2.4. EPREUVES UTILISEES
 - 2.2.4.1 Epreuve de Petit et al. (1968)
 - 2.2.4.2 Epreuve expérimentale de mesure directe de VO₂ max
 - 2.2.4.3 Physical work capacity (PWC 170)
 - 2.2.4.4 Epreuve exp. de mesure indirecte de VO₂ max
 - 2.2.4.5 Epreuve de terrain
 - 2.2.5. LE CHOIX DE L'ERGOMETRE
 - 2.2.6. LES UNITES DE MESURE DE VO₂ max
 - 2.2.7. ANALYSES STATISTIQUES
- 2.3. RESULTATS
 - 2.3.1. CAPACITE AEROBIE ET SPORTS DE PERFORMANCE
 - 2.3.2. ELABORATION ET VALIDATION D'EPREUVES DE MESURE DE VO₂ max EN LABORATOIRE
 - 2.3.2.1 Epreuve de mesure directe de VO₂ max
 - 2.3.2.2 Technique de mesure indirecte de VO₂ max
 - 2.3.3. RELATION VO₂ max VITESSE DE COURSE
- 2.4. DISCUSSION
 - 2.4.1. CAPACITE AEROBIE ET SPORTS DE PERFORMANCE
 - 2.4.1.1 VO₂ max et types de pratiques sportives
 - 2.4.1.2 Possibilités d'amélioration de VO₂ max
 - 2.4.1.3 Réactions physiologiques au cours de l'exercice
 - 2.4.1.4 Influence de l'âge
 - 2.4.2. VALIDATION D'EPREUVES DE MESURE DE VO₂ max EN LABORATOIRE
 - 2.4.2.1 Validité d'une épreuve de mesure directe de VO₂max
 - 2.4.2.2 Validité d'une technique de mesure indirecte de VO₂ max
 - 2.4.3. VALIDATION D'UNE EPREUVE DE MESURE DE VO₂ max SUR LE TERRAIN
- 2.5. CONCLUSION

Capacité aérobie

2.1. INTRODUCTION

La capacité aérobie est définie par l'aptitude à réaliser des efforts intenses et soutenus en utilisant des masses musculaires importantes. Certains auteurs (5, 6) parlent de l'efficacité du système de transport de l'oxygène et des processus énergétiques aérobie, d'autres (118, 195) font aussi la distinction entre puissance aérobie maximale ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) et endurance aérobie (capacité de maintenir le plus longtemps possible un certain pourcentage de $\dot{V}O_2 \text{ max}$). En fait, le vocable de capacité aérobie englobe ces deux concepts distincts mais souvent confondus.

La capacité aérobie constitue un excellent indicateur de l'aptitude physique et des possibilités compétitives des sportifs, particulièrement pour les sports exigeant un effort intense et soutenu (125, 187). Ceci est lié, comme nous l'avons vu précédemment, au fait que pour ces activités sportives, le processus énergétique aérobie fournit la plus grande partie de l'énergie.

Le processus énergétique aérobie est conditionné par la capacité d'adaptation d'un ensemble de processus physiologiques, chargé de capter, de transporter puis de livrer l'oxygène aux muscles actifs. L'indice représentatif de ce processus est la consommation maximale d'oxygène ou $\dot{V}O_2 \text{ max}$. Cet indice constitue une excellente source d'information sur la puissance du système de production d'énergie d'origine aérobie du fait que chaque litre d' O_2 consommé représente la libération d'environ 20 kJ (entre 19,7 et 21,2 kJ selon la valeur du quotient respiratoire).

Pour ces raisons essentielles, de nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude de la consommation maximale d'oxygène et des facteurs qui la sous-tendent et à son évaluation pour différents types de pratique sportive.

La mesure de la consommation d'oxygène, chez un sujet pratiquant une activité sportive donnée, fournit des informations utiles sur le degré de sollicitation du métabolisme aérobie lors de la pratique de ce sport et permet, par conséquent, de cerner les exigences énergétiques aérobie requises par ce sport.

Sur le terrain, la consommation d'oxygène n'est, cependant, pas facile à mesurer en raison des contraintes occasionnées à

CAPACITE AEROBIE

l'athlète par le port du dispositif de recueil des gaz respiratoires, qui peut, dans la plupart des activités sportives, limiter ses mouvements et empêcher l'exécution naturelle de son activité sportive. Aussi la mesure de la consommation d'oxygène est presque exclusivement réalisée en laboratoire.

Par ailleurs, la connaissance de la relation VO_2 max performance, pour une discipline sportive donnée, permet de préciser le degré de participation des processus aérobie dans la réalisation de cette performance. Sur cette base, les techniciens du sport parviennent à une élaboration de programmes d'entraînement adaptés aux exigences énergétiques de la discipline sportive.

La détermination de l'importance relative de la capacité aérobie se heurte, cependant, à certaines difficultés, notamment celles de quantifier d'une manière rigoureuse la performance dans certaines disciplines sportives, telles que les sports collectifs et les sports de combat. Pour ces sports, les auteurs tentent d'apprécier les exigences énergétiques aérobie à partir de la consommation maximale d'oxygène (VO_2 max) mesurée chez les athlètes de haut niveau. En effet, VO_2 max atteint par les meilleurs athlètes, dans une discipline donnée, fournit de bonnes indications sur le degré de sollicitation du système de transport et d'utilisation de l'oxygène.

Pour les disciplines sportives qui permettent une appréciation quantitative de la performance, telles que l'athlétisme, la natation et l'aviron entre autres, il est en revanche possible de préciser le degré de participation des processus aérobie, à partir des relations qui existent entre la performance et la consommation maximale d'oxygène (10, 162, 166, 179).

VO_2 max est généralement mesuré lors d'une épreuve maximale à charge progressivement croissante réalisée jusqu'à épuisement du sujet. L'inconvénient majeur des techniques classiques d'évaluation directe de la consommation maximale d' O_2 , réside dans leur durée globale relativement importante, supérieure à 20 minutes, qui restreint son champ d'application.

Malgré leurs nombreux avantages, les techniques de mesure directe de VO_2 max font appel à un appareillage coûteux, exigeant d'être manipulé par un personnel hautement qualifié. De plus, la nature de l'effort qu'elles demandent est peu compatible avec un état de santé fragile.

Dans le cas d'un programme d'évaluation d'adultes âgés de plus de 35 ans ou d'enfants de moins de 12 ans, et dans le cas de l'évaluation continue des athlètes, les mesures indirectes sous-maximales sont plus indiquées et généralement plus utilisées (56, 127).

Les interrelations observées entre différentes variables physiologiques, que nous développerons plus loin, ont conduit de nombreux auteurs (7, 9, 121, 135) à développer des techniques de laboratoire et de terrain, permettant d'évaluer d'une manière indirecte la dépense énergétique ou la capacité aérobie du sujet. Ces différents auteurs ont élaboré des équations ou abaques permettant d'estimer la capacité aérobie du sujet, à partir :

- de la fréquence cardiaque pour une puissance de travail donnée : principe de l'épreuve d'Astrand et Ryhming (7),
- de la puissance correspondant à une fréquence cardiaque donnée (principe de l'épreuve de PWC 170 de Karpman),
- ou à partir de la puissance maximale développée lors d'une épreuve maximale à intensité progressivement croissante : épreuve de Balke (9).

Sur le terrain, les épreuves d'estimation de VO_2 max reposent généralement sur les mêmes principes que celles réalisées en laboratoire. Elles comportent des épreuves en paliers, à vitesse progressivement croissante (121, 122, 142), ou non progressives, c'est-à-dire constituées d'un seul palier à vitesse maximale dont la durée et/ou la distance varient selon les auteurs (34, 37).

Par rapport aux techniques directes dont les mesures sont plus précises mais qui nécessitent un matériel plus lourd et une qualification plus importante de la part de l'expérimentateur, les épreuves indirectes sont deux à cinq fois plus courtes, présentent une reproductibilité voisine des tests maximaux (86) et une influence moindre de la collaboration et de la motivation du sujet. Quoiqu'accessibles et faciles à réaliser, les tests indirects sont sujets à erreurs. L'écart entre VO_2 max mesuré et VO_2 max prédit peut atteindre 25 % pour certains sujets (14, 48). Le type de sujets pour lesquels ces tests sont de prédiction insuffisante sont dans les catégories de VO_2 max très basses ou très élevées.

Pour ces raisons, nous nous sommes fixés comme objectifs :

- d'étudier les adaptations immédiates et à long terme du système cardio-respiratoire chez des athlètes de différentes spécialités sportives (2.4.1),
- d'élaborer et de valider des techniques de laboratoire (2.4.2) et de terrain (2.4.3), permettant d'évaluer la capacité aérobie.

Ces objectifs généraux seront transcrits de façon plus opérationnelle dans les différentes sections correspondantes du chapitre.

2.2. MATERIEL ET METHODES

Seuls le matériel et les méthodes communs à plusieurs expérimentations ainsi que leurs caractéristiques générales sont présentés à ce niveau. Le matériel et les méthodes particuliers seront présentés dans les sections correspondantes.

Les caractéristiques techniques du matériel utilisé sont présentées en annexe.

L'étude réalisée est de type longitudinale avec une exploitation de type descriptif pour certains paramètres et analytique pour d'autres. Elle a débuté en partie en 1975 pour certains athlètes, et les premiers résultats publiés dans le cadre du mémoire de D.E.S, et pour la majorité des cas, en 1984 et s'est poursuivie jusqu'en 1988 au CNMS.

2.2.1. POPULATION

421 athlètes de sexe masculin de l'élite sportive algérienne, âgés en moyenne de $22,5 \pm 3,9$ ans, ont participé à cette étude. Les caractéristiques morphologiques et la répartition des athlètes par discipline sportive sont présentées au tableau 2.1a. Ces athlètes ont un minimum de dix années de pratique sportive.

Compte tenu de la diversité et de la multiplicité des épreuves prévues dans cette étude, étendue sur plusieurs années, les mêmes sujets n'ont pu réaliser l'ensemble des épreuves programmées. Les effectifs des athlètes ainsi que les disciplines sportives étudiées, variables d'une expérimentation à une autre en fonction des objectifs visés et de la disponibilité des sujets, sont présentés avec les résultats (section 2.3).

Pour l'étude réalisée sur le terrain, nous avons obtenu la collaboration de 38 coureurs de sexe masculin de l'élite sportive algérienne. Les effectifs, ainsi que les caractéristiques morphologiques et les performances moyennes des coureurs par spécialité, figurent au tableau 2.1b.

2.2.2. LE MATERIEL utilisé dans l'étude comprend:

- une bicyclette ergométrique à freinage électromagnétique (Elema, Siemens),
- un dispositif de recueil et d'analyse automatiques des gaz respiratoires (Siregnost FD88, Siemens), avec dispositif d'enregistrement continu de la fréquence cardiaque, de la consommation d'oxygène, et de la charge de travail,

CAPACITE AEROBIE

Tableau 2.1a : effectifs et valeurs moyennes de l'âge, du poids et de la taille des athlètes étudiés, par discipline

Disciplines sportives	n	AGE (ans)	POIDS (kg)	TAILLE (cm)
courses \geq 1 500 m	25	23,9 \pm 5,1	59,9 \pm 3,9	172 \pm 5
cyclisme	06	20,5 \pm 4,1	64,0 \pm 5,0	172 \pm 4
natation	12	17,0 \pm 1,2	58,3 \pm 7,6	169 \pm 6
aviron	39	22,6 \pm 2,8	78,8 \pm 8,0	182 \pm 6
courses 400-800 m	09	20,5 \pm 3,2	63,4 \pm 6,1	176 \pm 4
boxe	06	21,8 \pm 1,6	65,4 \pm 8,5	174 \pm 4
judo	39	22,2 \pm 3,4	74,9 \pm 9,9	172 \pm 6
foot-ball	110	23,3 \pm 4,1	68,7 \pm 6,2	173 \pm 6
basket-ball	57	23,4 \pm 3,7	75,0 \pm 8,2	185 \pm 8
hand-ball	49	22,3 \pm 3,2	74,5 \pm 6,1	179 \pm 6
volley-ball	30	23,7 \pm 3,4	74,5 \pm 8,3	182 \pm 6
courses \leq 400 m	23	20,6 \pm 3,2	66,7 \pm 5,6	173 \pm 5
sauts	16	20,7 \pm 3,0	68,4 \pm 8,0	178 \pm 6

Tableau 2.1b : Valeurs moyennes de l'âge, du poids, de la taille et des performances, des coureurs par spécialité.

spécialités	âge ans	poids kg	taille cm	performances (*) temps (scores)	
5 000-10 000 m (n = 6)	29,4 \pm 2,0	58,9 4,6	171 5	14'27" (890) 0'41" (55)	31'07" (852) 1'26" (73)
800 - 1 500 m (n = 9)	21,3 \pm 3,8	60,4 3,6	172 5	1'55,5" (830) 6,2" (90)	3'56,4" (852) 9,0" (63)
400 - 800 m (n = 6)	20,5 \pm 3,2	63,4 6,1	175 4	49,50" (837) 0,94" (37)	1'52,3" (873) 3,8" (63)
200 - 400 m (n = 6)	21,4 \pm 3,1	64,4 5,1	173 6	22,20" (820) 1,04" (95)	49,26" (846) 1,44" (54)
100 - 200 m (n = 11)	20,0 \pm 3,2	68,4 5,5	173 3	10,77" (845) 0,27" (55)	22,20" (830) 0,81" (70)

(*) Dans ces colonnes sont présentées d'abord les moyennes des performances évaluées en temps, puis entre parenthèses les moyennes des scores obtenus selon la table de pointage de Gardner et Purdy (72), exprimant les performances en une unité commune à toutes les courses à pied. En-dessous, figurent les écarts-types respectifs de ces moyennes.

Les performances correspondent aux meilleurs temps réalisés par les sujets dans leur spécialité respective, au cours des quatre semaines qui ont précédé ou suivi l'expérimentation.

2.2.3. PROTOCOLES DE MESURE DE VO₂ max

Plusieurs profils d'épreuves musculaires peuvent conduire à la mesure de VO₂ max. Ils appartiennent généralement à l'une des 3 catégories suivantes (fig. 2.1) :

- charge progressivement croissante discontinue c'est-à-dire avec périodes de récupération intermédiaire, la durée de chaque palier est de 3 à 6 minutes.

- charge progressivement croissante continue avec des paliers d'une durée de une à trois minutes, sans interruption entre les paliers.

- charge constante.

2.2.3.1 Les tests à charge constante impliquent le choix d'une charge qui épuise le sujet après une période supérieure à trois minutes mais inférieure à six minutes. Dans une étude antérieure réalisée chez des rameurs (23), nous avons démontré cependant, qu'une période minimale de 60 s peut être suffisante pour mesurer VO₂ max, sous réserve d'un bon échauffement préalable. Ces épreuves à charge constante s'appuient sur des critères maximaux autres que le plafonnement de VO₂ pour confirmer l'obtention de VO₂ max. Une grande expérience et/ou un prétest à charge progressive sont nécessaires pour déterminer la charge d'un test à palier constant. Bien que ce soit un test court et précis, il n'est pas recommandé pour une utilisation générale. En effet, l'aspect qualitatif des réactions physiologiques c'est-à-dire l'évolution des paramètres physiologiques en fonction de la charge et leurs interrelations, échappent totalement à l'observation.

2.2.3.2 Les épreuves à charge progressive continue ou discontinue diffèrent principalement par la durée des paliers et par la façon d'augmenter la charge de travail. Dans le protocole discontinu, une période de repos d'une durée de deux à cinq minutes, est permise entre les charges. Chaque charge successive est plus élevée que la précédente, plusieurs charges sont utilisées jusqu'à ce que la dernière mène le sujet à son VO₂ max. La durée de ce protocole est longue, mais permet la communication avec le sujet entre deux paliers et donne le temps d'effectuer les calculs de VO₂ et d'autres paramètres lorsque l'on ne dispose pas d'un système d'analyse automatique.

Les tests progressifs continus ne sont pas interrompus par des périodes de récupération entre les paliers. Ils utilisent une augmentation plus légère de la puissance de l'exercice d'un palier à l'autre. La durée des paliers est plus réduite, d'une à trois minutes et parfois moins d'une minute.

Différentes propositions de standardisation des épreuves ergométriques ont été définies par des instances internationales telles que l'Organisation Mondiale de la Santé (120) et le Working Group for Ergometry de l'UNESCO (97). L'épreuve la plus

CAPACITE AEROBIE

répandue est celle de Petit et al. (157), adaptée d'épreuves plus anciennes (81, 185).

Les principaux inconvénients de ces techniques résident d'une part, dans leur durée globale relativement importante, supérieure à vingt minutes, ce qui restreint leur champ d'application. Par ailleurs, compte tenu de l'accroissement important de la charge, en moyenne 50 watts, d'un palier au suivant, la puissance maximale aérobie exprimée en terme de puissance est imprécise car fournie à $\pm 15\%$ près, particulièrement chez les sujets qui ne réussissent pas à réaliser entièrement le dernier palier.

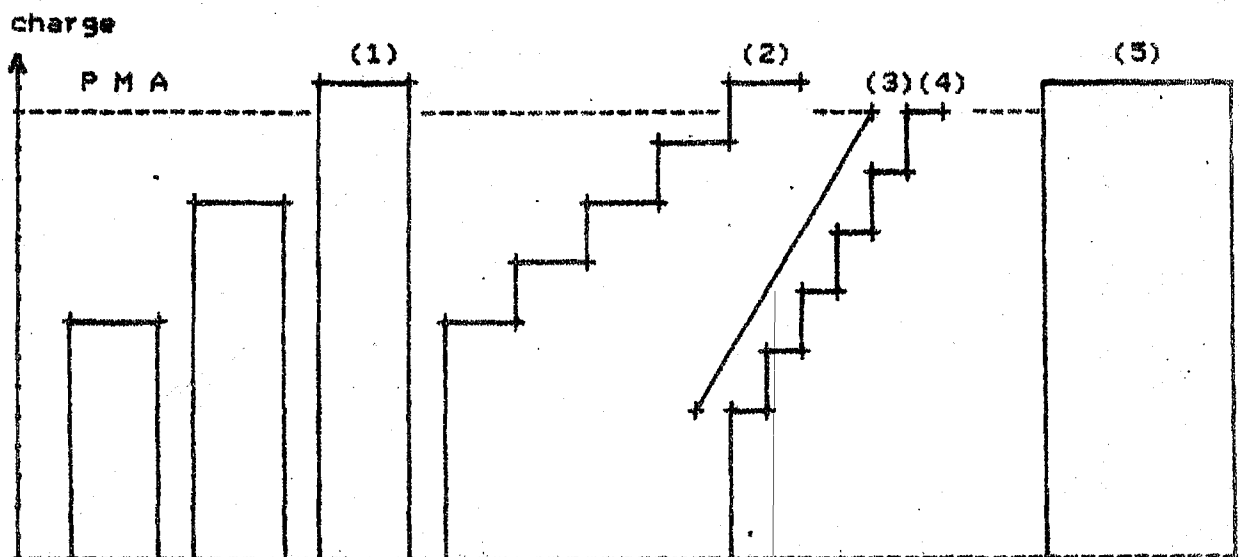


Figure 2.1 : Catégories de charges utilisées dans les épreuves d'effort

- (1) épreuve à charge croissante discontinue, c'est-à-dire avec un temps de repos intermédiaire entre deux charges
- (2, 3, 4) épreuves à charge croissante continue, à paliers de différentes durées :
 - (2) paliers de trois minutes et plus,
 - (3) paliers de quelques secondes,
 - (4) paliers de une minute à deux minutes,
- (5) épreuve à charge constante.

(Schéma adapté de celui de l'Organisation Mondiale de la Santé, rapporté par Lange Andersen et al., 1971).

Les valeurs de VO_2 max déterminées par chacun de ces protocoles sont identiques pour un même individu (23, 187). L'obtention de VO_2 max est assurée lorsqu'un plateau ou une légère baisse de VO_2 survient malgré l'augmentation de la charge.

2.2.3.3 Tests d'évaluation indirecte de VO₂ max

Compte tenu des différents inconvénients liés à la mesure directe, de nombreux auteurs dont Astrand et Ryhming (7); Balke (9) et Léger et Boucher (121) ont développé des techniques permettant de mesurer d'une manière indirecte la capacité aérobie du sujet. Ces techniques présentent les principaux avantages suivants :

- la durée du test est généralement plus courte que celle des tests de mesure directe,
- les tests sont relativement peu coûteux,
- l'équipement est simple,
- certains tests s'adaptent à des évaluations de groupe.

Les prédictions de VO₂ max à partir d'épreuves indirectes sont généralement basées sur les interrelations existantes entre VO₂ max, et d'autres variables plus aisément mesurables telles que la fréquence cardiaque et la puissance de l'exercice. Les limites de ces techniques sont présentées au niveau de la discussion.

Ces épreuves peuvent être maximales et présenter les limites et les risques d'administration, tels que ceux des épreuves directes. Dans ce cas, l'estimation de VO₂ max se base essentiellement sur la relation établie entre VO₂ max et la puissance maximale supportée par le sujet.

Elles peuvent être sous-maximales et utilisent la relation qui existe entre VO₂ max et FC pour une charge donnée, ou entre VO₂ max et puissance pour une fréquence cardiaque donnée, ou utilisent l'extrapolation linéaire de VO₂ max à partir de la relation VO₂-FC, jusqu'à la fréquence cardiaque maximale théorique. Chaque type d'épreuve est accompagné de l'équation établissant la liaison entre VO₂ max et FC ou charge de travail, à défaut de l'existence d'un nomogramme de prédiction de VO₂max.

La capacité aérobie peut être également appréciée à partir de la puissance correspondant à une fréquence cardiaque de 170 bpm (191). En effet, l'adaptation d'un sujet à un effort sous-maximal est souvent évaluée par la recherche de la puissance de travail que peut effectuer un sujet lorsque sa fréquence cardiaque est égale à 170 bpm. Cette puissance est appelée Physical Work Capacity (PWC 170). La puissance, développée pour une fréquence cardiaque égale à 170 bpm, peut être un témoin de la capacité aérobie d'un sujet (159), elle correspond à un pourcentage élevé de PMA, lequel varie selon l'âge, le sexe et le niveau et type de pratique sportive (6).

2.2.4. EPREUVES DE MESURE DE VO₂ max UTILISEES

Lors de cette étude, deux profils d'épreuves maximales à charge progressivement croissante, sont utilisés pour évaluer la consommation maximale d'oxygène en laboratoire. Il s'agit de l'épreuve classique de Petit et al. (157), à paliers de deux minutes, et d'une épreuve expérimentale à paliers très courts (12 s), mise au point à l'occasion de cette étude; la première servant à tester la validité de la seconde. Le déroulement de chacune de ces deux épreuves est présenté ci-après.

2.2.4.1 Epreuve de Petit et al. (1962)

C'est une épreuve maximale à intensité progressivement croissante réalisée sur une bicyclette ergométrique. Elle consiste à réaliser le plus grand nombre possible de paliers. VO₂ max est généralement enregistré lors du dernier palier.

Caractéristiques

- accroissement de la charge : 30 watts toutes les 2 min,
- charge initiale : 60 watts,
- fréquence de pédalage : 60 rpm,
- durée des paliers : six minutes pour le premier
2 minutes pour les suivants.

Etapas détaillées du protocole

Les objectifs et les modalités de déroulement du test sont expliqués au sujet.

Après la pose des électrodes pour la mesure de la fréquence cardiaque, le sujet est assis sur la bicyclette ergométrique et respire au travers d'un masque facial relié au dispositif de recueil et d'analyse des gaz respiratoires, pendant une durée de 5 minutes. Cette période permet au sujet de s'adapter au port du masque respiratoire.

Après ajustement de la selle et du guidon à sa convenance, le sujet est invité à s'échauffer pendant une durée de 6 minutes à une intensité de 60 watts et une fréquence de pédalage de 60 rpm. Ce premier palier, considéré comme une phase d'échauffement permet au sujet de se familiariser avec le pédalage sur la bicyclette, il permet également la mise en jeu des processus métaboliques aérobie de l'organisme. Immédiatement après la période d'échauffement, le rythme de pédalage restant le même, la charge est augmentée de 30 watts toutes les deux minutes. L'exercice est poursuivi jusqu'à ce que le sujet ne soit plus capable de supporter une charge supplémentaire. L'épreuve est interrompue lorsque le sujet cesse de pédaler ou lorsque la fréquence de pédalage atteint une valeur inférieure à 50 rpm.

CAPACITE AEROBIE

2.2.4.2 Epreuve expérimentale de détermination de VO₂ max

Le protocole, mis au point à l'occasion de cette étude, consiste à réaliser sur bicyclette ergométrique, un travail progressivement croissant, à paliers très courts (fig. 2.2, tab. 2.2).

Caractéristiques de l'épreuve expérimentale

- accroissement de la charge : 5 watts toutes les 12 s
- charge initiale : 50 watts,
- fréquence de pédalage : 70 ± 10 rpm.

L'épreuve débute par une charge de 50 watts qui est augmentée de 5 watts toutes les 12 secondes, soit un accroissement moyen de la charge de 25 watts par minute. Le rythme de pédalage augmente en fonction de l'accroissement de la charge. L'épreuve est poursuivie comme indiqué sur le tableau 2.2 et la figure 2.2, jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus supporter un accroissement supplémentaire de la charge.

Après la fin de l'épreuve, le sujet récupère en pédalant modérément à une charge de 50 watts, ou à vide, pendant environ deux minutes. Pour s'assurer que le plateau de VO₂ max est atteint, l'épreuve est reprise 15 minutes après, à une intensité égale ou légèrement supérieure à celle atteinte à la fin du test progressif, à une fréquence de pédalage maximale (entre 80 et 100 rpm). La consommation maximale d'oxygène considérée est la valeur la plus élevée, atteinte lors des deux tests.

Au cours des deux épreuves ergométriques décrites précédemment, les mesures de la consommation d'oxygène et de la fréquence cardiaque sont effectuées en continu. Les valeurs maximales de la consommation d'oxygène, de la fréquence cardiaque et de la charge de travail, atteintes généralement en fin de l'épreuve, sont également prises en considération.

2.2.4.3 La Physical Work Capacity (PWC 170) est déterminée à partir de la relation linéaire observée au cours de l'épreuve à charge progressive à paliers très courts, entre la fréquence cardiaque (FC) et la charge de travail (P). Elle est calculée de la façon suivante :

1- On porte sur le diagramme (figure 2.3) les couples de valeurs (FC-P) enregistrées lors de l'épreuve progressive, puis les points constitués par ces couples de valeurs sont joints;

2- l'intersection de la droite ainsi obtenue, avec l'échelle de fréquence cardiaque jusqu'à la valeur de 170 bpm fournit PWC 170 (point encerclé sur la figure 2.3), exprimée en watts, puis convertie en kgm/kg.min.

Sont également enregistrées pour chaque sujet, dans les mêmes conditions les charges correspondant aux fréquences cardiaques 160 et 180 bpm, et les fréquences cardiaques correspondant aux puissances 150, 200 et 250 watts.

2.2.3. PROTOCOLES DE MESURE DE VO₂ max

Plusieurs profils d'épreuves musculaires peuvent conduire à la mesure de VO₂ max. Ils appartiennent généralement à l'une des 3 catégories suivantes (fig. 2.1) :

- charge progressivement croissante discontinue c'est-à-dire avec périodes de récupération intermédiaire, la durée de chaque palier est de 3 à 6 minutes.
- charge progressivement croissante continue avec des paliers d'une durée de une à trois minutes, sans interruption entre les paliers.
- charge constante.

2.2.3.1 Les tests à charge constante impliquent le choix d'une charge qui épuise le sujet après une période supérieure à trois minutes mais inférieure à six minutes. Dans une étude antérieure réalisée chez des rameurs (23), nous avons démontré cependant, qu'une période minimale de 60 s peut être suffisante pour mesurer VO₂ max, sous réserve d'un bon échauffement préalable. Ces épreuves à charge constante s'appuient sur des critères maximaux autres que le plafonnement de VO₂ pour confirmer l'obtention de VO₂ max. Une grande expérience et/ou un prétest à charge progressive sont nécessaires pour déterminer la charge d'un test à palier constant. Bien que ce soit un test court et précis, il n'est pas recommandé pour une utilisation générale. En effet, l'aspect qualitatif des réactions physiologiques c'est-à-dire l'évolution des paramètres physiologiques en fonction de la charge et leurs interrelations, échappent totalement à l'observation.

2.2.3.2 Les épreuves à charge progressive continue ou discontinue diffèrent principalement par la durée des paliers et par la façon d'augmenter la charge de travail. Dans le protocole discontinu, une période de repos d'une durée de deux à cinq minutes, est permise entre les charges. Chaque charge successive est plus élevée que la précédente, plusieurs charges sont utilisées jusqu'à ce que la dernière mène le sujet à son VO₂ max. La durée de ce protocole est longue, mais permet la communication avec le sujet entre deux paliers et donne le temps d'effectuer les calculs de VO₂ et d'autres paramètres lorsque l'on ne dispose pas d'un système d'analyse automatique.

Les tests progressifs continus ne sont pas interrompus par des périodes de récupération entre les paliers. Ils utilisent une augmentation plus légère de la puissance de l'exercice d'un palier à l'autre. La durée des paliers est plus réduite, d'une à trois minutes et parfois moins d'une minute.

Différentes propositions de standardisation des épreuves ergométriques ont été définies par des instances internationales telles que l'Organisation Mondiale de la Santé (120) et le Working Group for Ergometry de l'UNESCO (97). L'épreuve la plus

répandue est celle de Petit et al. (157), adaptée d'épreuves plus anciennes (81, 185).

Les principaux inconvénients de ces techniques résident d'une part, dans leur durée globale relativement importante, supérieure à vingt minutes, ce qui restreint leur champ d'application. Par ailleurs, compte tenu de l'accroissement important de la charge, en moyenne 50 watts, d'un palier au suivant, la puissance maximale aérobie exprimée en terme de puissance est imprécise car fournie à ± 15 % près, particulièrement chez les sujets qui ne réussissent pas à réaliser entièrement le dernier palier.

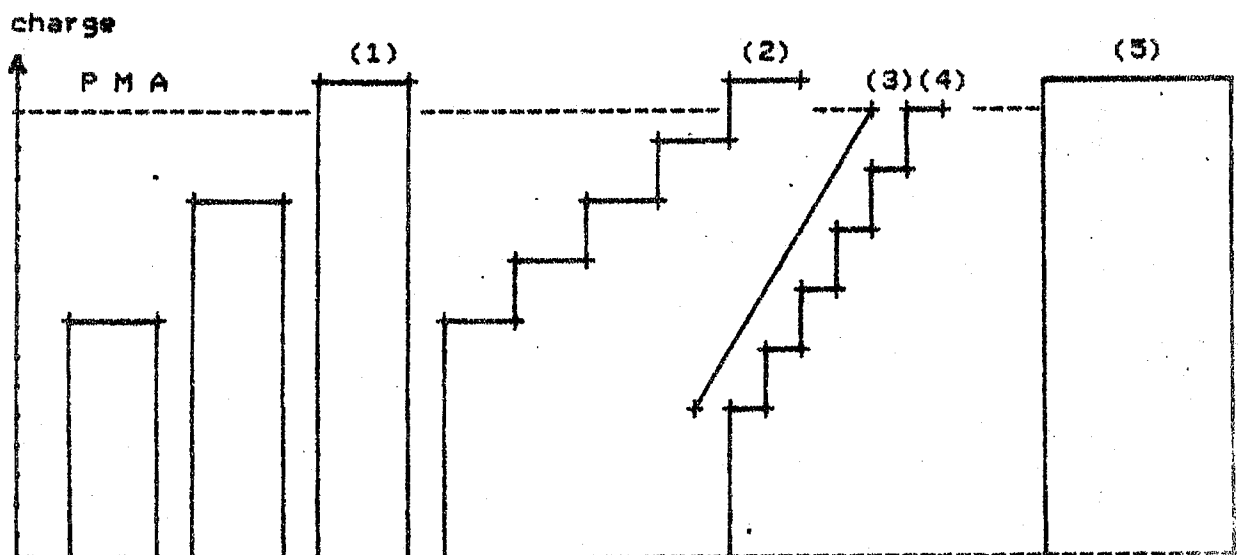


Figure 2.1 : Catégories de charges utilisées dans les épreuves d'effort

- (1) épreuve à charge croissante discontinue, c'est-à-dire avec un temps de repos intermédiaire entre deux charges
- (2, 3, 4) épreuves à charge croissante continue, à paliers de différentes durées :
 - (2) paliers de trois minutes et plus,
 - (3) paliers de quelques secondes,
 - (4) paliers de une minute à deux minutes,
- (5) épreuve à charge constante.

(Schéma adapté de celui de l'Organisation Mondiale de la Santé, rapporté par Lange Andersen et al., 1971).

Les valeurs de VO_2 max déterminées par chacun de ces protocoles sont identiques pour un même individu (23, 187). L'obtention de VO_2 max est assurée lorsqu'un plateau ou une légère baisse de VO_2 survient malgré l'augmentation de la charge.

2.2.3.3 Tests d'évaluation indirecte de VO2 max

Compte tenu des différents inconvénients liés à la mesure directe, de nombreux auteurs dont Astrand et Ryhming (7); Balke (9) et Léger et Boucher (121) ont développé des techniques permettant de mesurer d'une manière indirecte la capacité aérobie du sujet. Ces techniques présentent les principaux avantages suivants :

- la durée du test est généralement plus courte que celle des tests de mesure directe,
- les tests sont relativement peu coûteux,
- l'équipement est simple,
- certains tests s'adaptent à des évaluations de groupe.

Les prédictions de VO2 max à partir d'épreuves indirectes sont généralement basées sur les interrelations existantes entre VO2 max, et d'autres variables plus aisément mesurables telles que la fréquence cardiaque et la puissance de l'exercice. Les limites de ces techniques sont présentées au niveau de la discussion.

Ces épreuves peuvent être maximales et présenter les limites et les risques d'administration, tels que ceux des épreuves directes. Dans ce cas, l'estimation de VO2 max se base essentiellement sur la relation établie entre VO2 max et la puissance maximale supportée par le sujet.

Elles peuvent être sous-maximales et utilisent la relation qui existe entre VO2 max et FC pour une charge donnée, ou entre VO2 max et puissance pour une fréquence cardiaque donnée, ou utilisent l'extrapolation linéaire de VO2 max à partir de la relation VO2-FC, jusqu'à la fréquence cardiaque maximale théorique. Chaque type d'épreuve est accompagné de l'équation établissant la liaison entre VO2 max et FC ou charge de travail, à défaut de l'existence d'un nomogramme de prédiction de VO2max.

La capacité aérobie peut être également appréciée à partir de la puissance correspondant à une fréquence cardiaque de 170 bpm (191). En effet, l'adaptation d'un sujet à un effort sous-maximal est souvent évaluée par la recherche de la puissance de travail que peut effectuer un sujet lorsque sa fréquence cardiaque est égale à 170 bpm. Cette puissance est appelée Physical Work Capacity (PWC 170). La puissance, développée pour une fréquence cardiaque égale à 170 bpm, peut être un témoin de la capacité aérobie d'un sujet (159), elle correspond à un pourcentage élevé de PMA, lequel varie selon l'âge, le sexe et le niveau et type de pratique sportive (6).

2.2.4. EPREUVES DE MESURE DE VO₂ max UTILISEES

Lors de cette étude, deux profils d'épreuves maximales à charge progressivement croissante, sont utilisés pour évaluer la consommation maximale d'oxygène en laboratoire. Il s'agit de l'épreuve classique de Petit et al. (157), à paliers de deux minutes, et d'une épreuve expérimentale à paliers très courts (12 s), mise au point à l'occasion de cette étude; la première servant à tester la validité de la seconde. Le déroulement de chacune de ces deux épreuves est présenté ci-après.

2.2.4.1 Epreuve de Petit et al. (1962)

C'est une épreuve maximale à intensité progressivement croissante réalisée sur une bicyclette ergométrique. Elle consiste à réaliser le plus grand nombre possible de paliers. VO₂ max est généralement enregistré lors du dernier palier.

Caractéristiques

- accroissement de la charge : 30 watts toutes les 2 min,
- charge initiale : 60 watts,
- fréquence de pédalage : 60 rpm,
- durée des paliers : six minutes pour le premier
2 minutes pour les suivants.

Etapes détaillées du protocole

Les objectifs et les modalités de déroulement du test sont expliqués au sujet.

Après la pose des électrodes pour la mesure de la fréquence cardiaque, le sujet est assis sur la bicyclette ergométrique et respire au travers d'un masque facial relié au dispositif de recueil et d'analyse des gaz respiratoires, pendant une durée de 5 minutes. Cette période permet au sujet de s'adapter au port du masque respiratoire.

Après ajustement de la selle et du guidon à sa convenance, le sujet est invité à s'échauffer pendant une durée de 6 minutes à une intensité de 60 watts et une fréquence de pédalage de 60 rpm. Ce premier palier, considéré comme une phase d'échauffement permet au sujet de se familiariser avec le pédalage sur la bicyclette, il permet également la mise en jeu des processus métaboliques aérobie de l'organisme. Immédiatement après la période d'échauffement, le rythme de pédalage restant le même, la charge est augmentée de 30 watts toutes les deux minutes. L'exercice est poursuivi jusqu'à ce que le sujet ne soit plus capable de supporter une charge supplémentaire. L'épreuve est interrompue lorsque le sujet cesse de pédaler ou lorsque la fréquence de pédalage atteint une valeur inférieure à 50 rpm.

2.2.4.2 Epreuve expérimentale de détermination de VO₂ max

Le protocole, mis au point à l'occasion de cette étude, consiste à réaliser sur bicyclette ergométrique, un travail progressivement croissant, à paliers très courts (fig. 2.2, tab. 2.2).

Caractéristiques de l'épreuve expérimentale

- accroissement de la charge : 5 watts toutes les 12 s
- charge initiale : 50 watts,
- fréquence de pédalage : 70 ± 10 rpm.

L'épreuve débute par une charge de 50 watts qui est augmentée de 5 watts toutes les 12 secondes, soit un accroissement moyen de la charge de 25 watts par minute. Le rythme de pédalage augmente en fonction de l'accroissement de la charge. L'épreuve est poursuivie comme indiqué sur le tableau 2.2 et la figure 2.2, jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus supporter un accroissement supplémentaire de la charge

Après la fin de l'épreuve, le sujet récupère en pédalant modérément à une charge de 50 watts, ou à vide, pendant environ deux minutes. Pour s'assurer que le plateau de VO₂ max est atteint, l'épreuve est reprise 15 minutes après, à une intensité égale ou légèrement supérieure à celle atteinte à la fin du test progressif, à une fréquence de pédalage maximale (entre 80 et 100 rpm). La consommation maximale d'oxygène considérée est la valeur la plus élevée, atteinte lors des deux tests.

Au cours des deux épreuves ergométriques décrites précédemment, les mesures de la consommation d'oxygène et de la fréquence cardiaque sont effectuées en continu. Les valeurs maximales de la consommation d'oxygène, de la fréquence cardiaque et de la charge de travail, atteintes généralement en fin de l'épreuve, sont également prises en considération.

2.2.4.3 La Physical Work Capacity (PWC 170) est déterminée à partir de la relation linéaire observée au cours de l'épreuve à charge progressive à paliers très courts, entre la fréquence cardiaque (FC) et la charge de travail (P). Elle est calculée de la façon suivante :

1- On porte sur le diagramme (figure 2.3) les couples de valeurs (FC-P) enregistrées lors de l'épreuve progressive, puis les points constitués par ces couples de valeurs sont joints;

2- l'intersection de la droite ainsi obtenue, avec l'échelle de fréquence cardiaque jusqu'à la valeur de 170 bpm fournit PWC 170 (point encerclé sur la figure 2.3), exprimée en watts, puis convertie en kgm/kg.min.

Sont également enregistrées pour chaque sujet, dans les mêmes conditions les charges correspondant aux fréquences cardiaques 160 et 180 bpm, et les fréquences cardiaques correspondant aux puissances 150, 200 et 250 watts.

Tableau 2.2 : Protocole expérimental permettant la détermination de la consommation maximale d'oxygène

durée (min)	cadence (rpm)	puissance (*) (watts)
0	60	50
2	60	100
4	60	150
6	70	200
8	70	250
9	80	275
10	80	300
etc..	etc..	etc..

(*) accroissement de la charge de 5 watts toutes les 12 s, soit un accroissement moyen de 25 watts par minute.

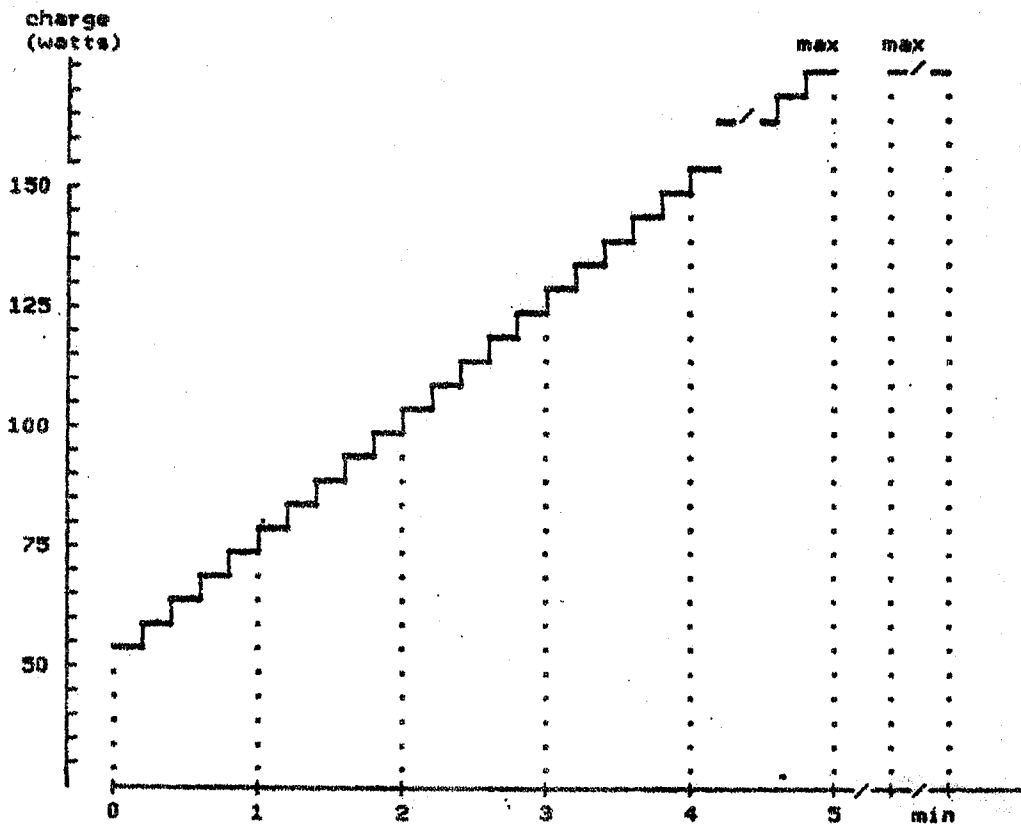


figure 2.2. : Protocole de détermination directe de VO2 max utilisé

CAPACITE AEROBIE

Ces paramètres permettent de vérifier le degré de validité de la PWC 170 dans l'appréciation de la capacité aérobie. La validité de ces mesures est testée par rapport à VO₂ max mesuré d'une manière directe lors de la même épreuve.

Dans le but d'étudier l'évolution de paramètres physiologiques (FC, VO₂, PWC 170, et PMA) dans le temps, l'épreuve a été réalisée annuellement chez 28 athlètes (18 coureurs et 10 foot-balleurs) durant quatre années.

L'ensemble des épreuves ergométriques a été réalisé au Centre National de Médecine du Sport d'Alger, entre 9h et 12h. Les sujets n'ont réalisé aucun effort excessif la veille des épreuves. Les conditions expérimentales et les précautions prises lors de la réalisation de ces différentes épreuves sont présentées en annexe.

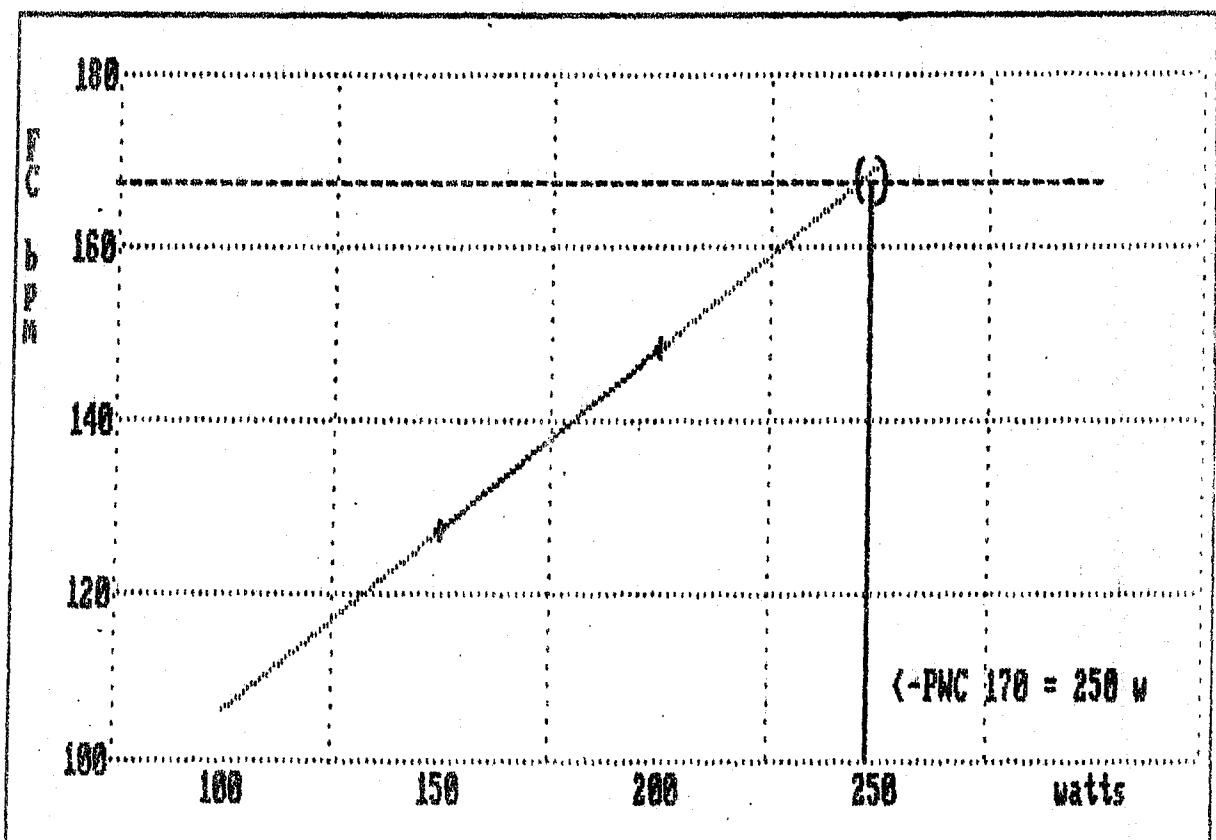


figure 2.3 : Détermination de la PWC 170

On porte sur le graphe ci-dessus les valeurs de FC obtenues lors de l'épreuve progressive avec leurs charges correspondantes, puis on trace une droite passant par ces points. Le point d'intersection de la droite obtenue avec le trait horizontal correspondant à la fréquence cardiaque 170, représente la PWC 170. Elle est lue sur le graphe et exprimée dans ce cas précis en watts.

2.2.4.4 Technique expérimentale de mesure indirecte de VO₂ max

Cette technique est mise au point à partir des données physiologiques recueillies au cours de l'épreuve maximale à charges progressives, à paliers très courts décrite, précédemment (section 2.2.4.2).

151 athlètes de sexe masculin de haut niveau, âgés de 24,3 ± 4,9 ans, ont participé à cette étude. 29 d'entre eux ont été examinés deux fois, dans un espace de temps d'une semaine, en vue de vérifier la reproductibilité de la technique.

Le protocole de l'épreuve est similaire à celui de l'épreuve maximale à paliers très courts qui a servi à sa mise au point, avec les particularités suivantes :

- l'épreuve n'est pas nécessairement réalisée jusqu'à épuisement du sujet, elle peut être soit maximale soit sous-maximale,
- le protocole ne nécessite pas d'appareillage de recueil et d'analyse des gaz respiratoires. Il ne nécessite pas non plus de cardiofréquence-mètre si l'épreuve est maximale,
- la consommation maximale d'oxygène est estimée à partir du nomogramme, présenté dans la section 2.3.2.2, conçu spécifiquement pour cette épreuve.

Caractéristiques de l'épreuve:

C'est une épreuve à intensité progressivement croissante qui peut être soit sous-maximale, soit maximale.

- charge initiale : 50 watts,
- accroissement de la charge : 5 watts toutes les 12 s,
- fréquence de pédalage : 60 ± 10 rpm,
- durée de l'épreuve : 4 à 8 minutes.

Matériel nécessaire:

- bicyclette ergométrique à freinage électromagnétique,
- dispositif de mesure de la fréquence cardiaque nécessaire uniquement lorsque l'épreuve choisie est sous-maximale,
- chronomètre.

Déroulement de l'épreuve :

Le sujet est invité à pédaler en position assise, à une cadence de 60 ± 10 rpm. La charge est fixée à 50 watts, puis augmentée progressivement et continuellement de 5 watts toutes les 12 s jusqu'à ce que la fréquence cardiaque atteigne une valeur proche de 170 bpm (entre 150 et 170 bpm). La fréquence cardiaque est surveillée en continu à l'aide d'un dispositif permettant la lecture instantanée, et enregistrée toutes les deux minutes, c'est-à-dire à 100, 200 watts etc...

CAPACITE AEROBIE

L'épreuve est interrompue, dès que la fréquence cardiaque atteint une valeur comprise entre 150 et 170 bpm, ou peut être poursuivie jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus supporter une charge supplémentaire.

Détermination graphique de la capacité aérobie :

La consommation maximale d'oxygène, la puissance maximale aérobie ainsi que PWC 170 sont déterminées graphiquement à partir du nomogramme élaboré précisément pour cette épreuve (figure 2.7)

Le nomogramme permet l'estimation de VO_2 max à partir d'une épreuve progressive, qu'elle soit maximale ou sous-maximale.

Si l'épreuve est poursuivie à une intensité maximale, la consommation maximale d'oxygène peut être appréciée à partir de la relation qui la lie à la puissance maximale (équation 2 de la section 2.4.1.2), figurant en ordonnée sur le nomogramme.

Lorsque l'épreuve est sous-maximale, l'estimation de VO_2 max se base sur l'extrapolation linéaire de VO_2 max à partir de la relation FC-P, jusqu'à la fréquence cardiaque maximale théorique figurant sur le nomogramme (section 2.3.2.2). Dans ce cas, VO_2 max est obtenu de la manière suivante :

1- on porte sur le nomogramme les couples de valeurs de FC et de la puissance enregistrées durant l'épreuve.

2- La droite obtenue en joignant les points constitués par les couples de valeurs de P et de FC, permet l'estimation de VO_2 max (l/min) et de PMA (watts) par extrapolation linéaire jusqu'à la courbe représentant la fréquence cardiaque maximale théorique correspondant à l'âge du sujet.

3- de la même façon, la PWC 170, exprimée en watts, est déterminée graphiquement par l'intersection de cette même droite avec la droite de fréquence cardiaque correspondant à la valeur de 170 bpm.

2.2.4.5 Epreuves d'évaluation de VO₂ max sur le terrain

L'inconvénient majeur des techniques de laboratoire est qu'elles se déroulent dans des conditions plus ou moins éloignées de la situation de terrain. De ce fait, les informations qui en découlent ont un intérêt pratique limité pour les entraîneurs et les athlètes. Elles posent, en outre, des problèmes de communication avec les techniciens des laboratoires.

VO₂ max peut être déterminé d'une manière indirecte sur le terrain, à partir de la vitesse sur une course d'une certaine durée ou d'une certaine distance (34, 37). En effet, il est bien admis que la vitesse, dans les courses d'une durée supérieure à 3 min, est limitée en grande partie par VO₂ max. Plus VO₂ max du sujet est élevé, plus ses performances sur ces distances sont importantes et vice-versa (49, 108, 162). A partir de ces considérations, il est possible d'estimer VO₂ max sur le terrain, à partir de la vitesse moyenne d'une course, à condition, que la durée du parcours soit suffisamment grande pour permettre la mise en jeu effective des processus aérobie, et de disposer de l'équation ou du nomogramme appropriés permettant cette estimation.

Les épreuves d'évaluation de VO₂ max sur le terrain présentent généralement les mêmes caractéristiques que celles réalisées en laboratoire. Elles peuvent comporter des paliers à vitesse progressivement croissante, c'est le cas des épreuves mises au point par l'Université de Montréal (121, 122, 142), ou constituées d'un seul palier à vitesse la plus élevée possible dont la durée et/ou la distance varient selon les auteurs, c'est le cas de l'épreuve de Cooper (37) et de celle de Coleman (34).

L'inconvénient majeur des épreuves progressives de l'Université de Montréal réside dans le fait qu'elles requièrent une bande magnétique pré-enregistrée du protocole, laquelle sollicite l'usage d'un magnétophone puissant et/ou une sonorisation du stade dans lequel se déroule l'épreuve. Les épreuves continues, telles celles de Cooper (12 min) et de Coleman (9 min) autorisent une alternance marche-course, ceci entraîne une certaine imprécision dans l'estimation du coût énergétique de l'épreuve, du fait que le rendement énergétique de la course est différent de celui de la marche (12, 94). D'autre part, compte tenu de leur durée relativement importante. Les résultats risquent d'être influencés par des facteurs psychologiques entre autres, particulièrement chez les sujets peu motivés. Ces différents inconvénients ne sont pas en faveur d'une application massive de ces épreuves pour prédire la consommation maximale d'oxygène.

CAPACITE AEROBIE

Une population de coureurs a été soumise à deux types d'épreuves maximales, l'une réalisée en laboratoire (épreuve de détermination directe de VO_2 max à paliers très courts, décrite dans la section 2.2.4.2, l'autre sur le terrain (épreuve de course d'une durée de 5 minutes). Ces deux épreuves ont été réalisées dans un espace de temps ne dépassant pas trois jours.

L'épreuve de 5 minutes consiste à parcourir, sur une piste d'athlétisme de 400 mètres, la plus longue distance possible, pendant une durée de 5 min.

Les sujets portant une tenue adaptée à l'exercice et une légère paire de "trainings" munies de pointes, effectuent l'épreuve dans des conditions proches de celles de leurs séances habituelles d'entraînement. Cette épreuve est précédée d'une période d'échauffement de 10 à 20 min en vue de permettre la mise en jeu des processus métaboliques aérobie. Le temps de passage est noté tous les 400 mètres et la fréquence cardiaque enregistrée en continue par télémétrie (Télécust 36, Siemens), afin de vérifier la stabilité de la vitesse et de la fréquence cardiaque durant cette épreuve.

Le rapport VO_2 max (ml/kg.min) mesuré en laboratoire, sur la vitesse moyenne (km/min) développée lors de l'épreuve de 5 min est calculé et exprimé en ml O_2 /kg.km.

Tous les sujets ont réalisé les deux épreuves, sans difficulté particulière, dans un intervalle de temps ne dépassant pas trois jours.

2.2.5. CHOIX DE L'ERGOMETRE

Pour espérer atteindre la valeur maximale de sa consommation d'oxygène, un sujet doit solliciter au minimum 70 % de sa masse musculaire totale (6). Pour impliquer une sollicitation maximale du système cardio-vasculaire, il est nécessaire d'effectuer un exercice mettant en jeu une masse musculaire importante. Il s'agit généralement d'un exercice des membres inférieurs, réalisé, soit sur bicyclette ergométrique, soit sur tapis roulant. La montée d'une marche (step test) est en fait rarement utilisée, car difficile à réaliser au niveau maximum de puissance.

Les valeurs de VO_2 max les plus élevées sont obtenues sur tapis roulant (tab. 1.4), cependant, la puissance fournie pendant l'exercice n'est calculée qu'indirectement puisqu'exprimée en vitesse.

C'est lors du travail sur bicyclette ergométrique que la mesure peut être le plus facilement réalisée. La bicyclette ergométrique est un appareillage relativement peu coûteux, de plus le maintien du buste en position immobile lors de l'exercice facilite la mesure de nombreux paramètres physiologiques et offre l'avantage d'une plus grande facilité pour les

CAPACITE AEROBIE

prises de sang. Elle permet en outre, de connaître avec une grande précision le travail mécanique fourni, ce qui facilite la conduite de l'épreuve. C'est essentiellement pour ces raisons que nous avons opté pour le choix de la bicyclette ergométrique.

Quel que soit l'ergomètre utilisé, il est important de déterminer les meilleures modalités de son utilisation. Lors d'un travail sur ergocycle, le choix d'une fréquence de pédalage est important. Il existe, en effet, des modalités optimales de fréquence de pédalage qui influencent les résultats des paramètres physiologiques et particulièrement VO_2 max. Il a été démontré (32), que la cadence optimale de pédalage augmente avec la charge de travail. Elle passe de 50 rpm pour une puissance de 100 W, à 80 rpm pour une puissance de 300 W.

2.2.6. UNITES DE MESURE DE VO_2 max

Plus la masse musculaire mise en jeu lors d'un exercice est importante, plus la consommation d'oxygène est élevée, sans que cela ne constitue pour autant un indicateur suffisant pour certaines disciplines. Ceci suggère que VO_2 max devrait être rapporté au kilogramme de masse musculaire ou à défaut au kilogramme de masse corporelle.

La valeur est habituellement exprimée en volume par minute (l/min) dans les disciplines sportives telles que le cyclisme et l'aviron, dans lesquelles, les poids ne constitue pas une charge importante pour l'athlète. Elle est exprimée en volume par kilogramme de masse corporelle et par unité de temps (ml/kg.min) dans les activités telles que la course à pied, où les athlètes supportent leur poids.

La P M A s'exprimé généralement en watts (W). Pour les courses, la natation et le cyclisme, elle peut être exprimée en vitesse (m/s).

2.2.7. LES ANALYSES STATISTIQUES

Les données sont généralement présentées sous forme de moyennes (m) et écarts-types (s), la variation est appréciée au moyen de leur rapport (s/m) \times 100. Les résultats sont analysés au moyens de :

- la comparaison de deux moyennes par le test t de Student,
- le test de Snedecor, et l'analyse de la variance (ANOVA), pour comparer plusieurs moyennes,
- la corrélation simple, partielle et multiple,
- l'erreur standard de l'estimation (S_{xy}),
- les régressions linéaires simples et multiples.

Les différences seront jugées significatives pour $p \leq 0,05$ et non significatives pour $p > 0,05$.

Les données ont été exploitées sur un micro-ordinateur.

2.3. R E S U L T A T S

2.3.1 CAPACITE AEROBIE ET SPORT DE PERFORMANCE

VO2 max et types de pratique sportive

Le tableau 2.3 illustré par les figures 2.4 et 2.5, présente les valeurs moyennes de VO2 max (ml/kg.min, l/min), et de PWC 170 (kgm/kg.min), mesurées chez les équipes nationales algériennes de différentes disciplines sportives.

La comparaison de ces moyennes par l'analyse de la variance (ANOVA), fait apparaître une différence significative ($p < 0,01$) entre les athlètes des différentes disciplines, aussi bien pour VO2 max que pour PWC 170. Les degrés de signification de ces différences sont similaires qu'il s'agisse de VO2 max ou de PWC 170

L'analyse de la variance fait ressortir quatre groupes d'athlètes distincts par leur VO2 max et leur PWC 170. Au sein d'un même groupe, les athlètes présentent des valeurs de VO2 max et de PWC 170 voisines. Les athlètes sont répartis en fonction de leur niveau de capacité aérobie de la manière suivante :

	VO2 max		PWC170
	ml/kg.min	l/min	kgm/kg.min
Premier groupe :			
courses de distances \geq 1500 m	71,9 \pm 5,0	4,31 \pm 0,38	28,5 \pm 4,0
cyclisme			
Deuxième groupe: aviron, natation			
	62,0 \pm 5,8	4,46 \pm 0,56	24,1 \pm 4,1
Troisième groupe: sports de combat			
foot-ball, course de 400-800 m	59,6 \pm 6,2	4,27 \pm 0,36	23,5 \pm 3,2
quatrième groupe :			
sports collectifs de salles	55,3 \pm 5,7	4,13 \pm 0,46	20,3 \pm 2,9
coureurs de 100 à 400 m, sauts			

Lorsque VO2 max est exprimé en valeur absolue, la comparaison des moyennes confirme la différence significative ($p < 0,01$) existant entre les athlètes de différentes disciplines sportives. Cette différence n'est, cependant, pas aussi forte que celle observée pour VO2 max et PWC 170 exprimés en valeurs relatives. On distingue, en effet, deux groupes d'athlètes distincts par leur VO2 max absolu, au lieu de quatre, comme pour VO2 max relatif :

- Premier groupe, composé des athlètes pratiquant les courses de distances supérieures à 400 mètres, le cyclisme, l'aviron, les sports de combat et les sports collectifs, excepté le volley-ball,

- Deuxième groupe, composé des coureurs de courtes distances (inférieures ou égales à 400 m), des sauteurs et des volleyeurs.

CAPACITE AEROBIE

Tableau 2.3 : Valeurs moyennes comparées de VO₂ max et de PWC 170 des athlètes de différentes disciplines

Disciplines sportives	n	VO ₂ max ml/kg.min	l/min	PWC 170 kgm/kg.min
courses ≥ 1 500 m	25	72,2 ± 4,9	4,31 ± 0,40	28,4 ± 4,1
cyclisme	06	70,4 ± 5,7	4,29 ± 0,29	28,9 ± 3,9
natation	12	63,6 ± 4,7	3,82 ± 0,22	21,5 ± 2,8
aviron	39	61,5 ± 6,3	4,66 ± 0,48	24,9 ± 4,2
courses 400-800 m	09	63,9 ± 2,3	4,30 ± 0,45	22,9 ± 2,5
boxe	06	63,7 ± 5,5	4,15 ± 0,41	24,2 ± 3,1
judo	39	58,8 ± 6,8	4,24 ± 0,28	22,7 ± 3,5
foot-ball	110	59,4 ± 6,1	4,28 ± 0,37	23,7 ± 3,1
basket-ball	57	56,5 ± 6,6	4,33 ± 0,38	19,9 ± 3,2
hand-ball	49	55,4 ± 5,7	4,37 ± 0,45	20,6 ± 3,0
volley-ball	30	52,7 ± 5,2	3,89 ± 0,28	20,5 ± 2,2
courses < 400 m	23	54,2 ± 4,1	3,60 ± 0,30	19,7 ± 3,0
sauts	16	57,1 ± 3,1	3,90 ± 0,21	21,2 ± 2,3
ANOVA		p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01

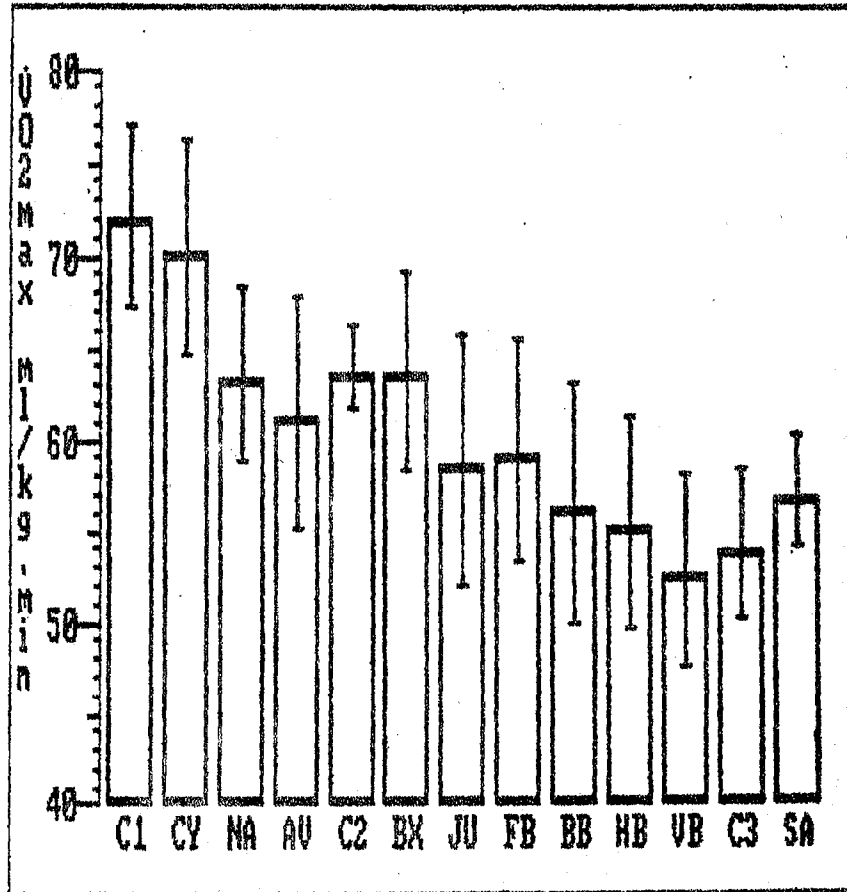


figure 2.4. : Consommation maximale d'oxygène mesurée chez l'élite sportive algérienne de différentes spécialités.

C1 : coureurs de demi-fond et de fond
 NA : nageurs
 C2 : coureurs de 400-800 mètres
 JU : Judokas
 BB : basketteurs
 VB : volleyeurs
 C3 : coureurs de 100-400 mètres

CY : cyclistes
 AV : rameurs
 BX : boxeurs
 FB : footballeurs
 HB : handballeurs
 SA : sauteurs

CAPACITE AEROBIE

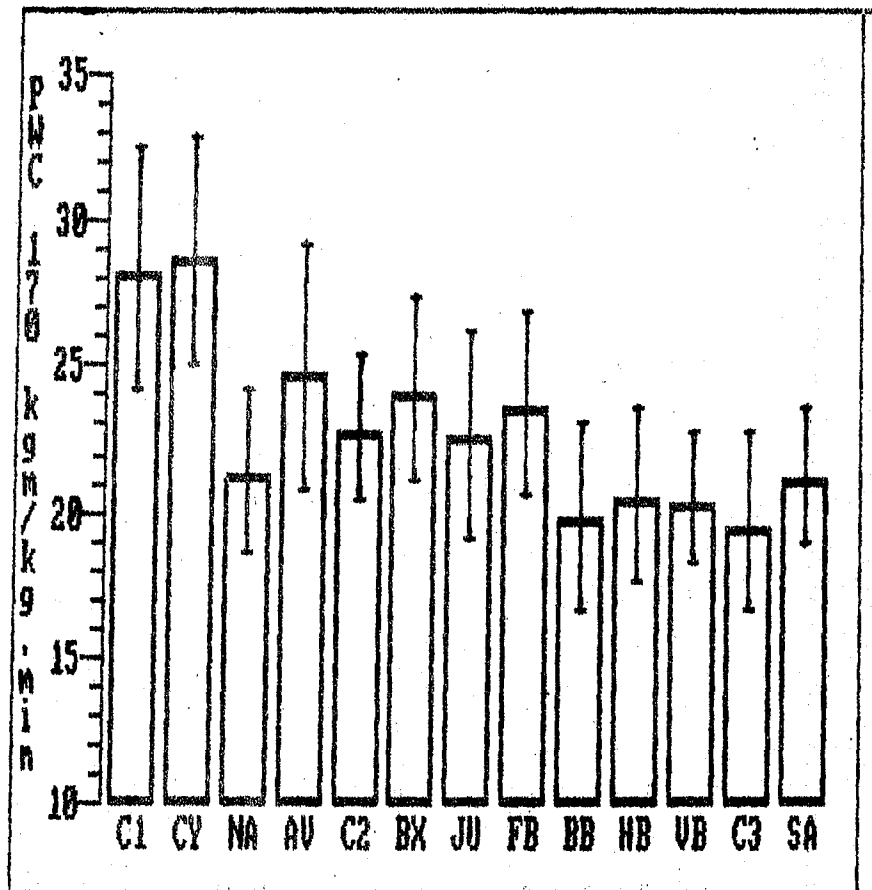


figure 2.5. : Capacité de travail (PWC 170) mesurée chez l'élite sportive algérienne de différentes spécialités.

CAPACITE AEROBIE

Le tableau 2.4 présente les valeurs moyennes de la fréquence cardiaque enregistrée en fonction de la charge travail, chez 56 coureurs appartenant à cinq spécialités différentes, au cours de l'épreuve maximale progressive à paliers très courts. Sont également présentées les moyennes des valeurs maximales de la fréquence cardiaque, de la charge et de VO₂ max enregistrées en fin de cette même épreuve.

Tableau 2.4 : Evolution de la fréquence cardiaque en fonction de la charge, au cours d'un travail maximal réalisé sur bicyclette ergométrique, chez des coureurs de différentes spécialités.

spécialités	100 W bpm	150 W bpm	200 W bpm	250 W bpm	FCmax bpm	PMA watts	VO ₂ max ml/kg.min
3000 m et + (n = 13)	96 ± 10	113 ± 14	132 ± 13	150 ± 13	167 ± 10	296 ± 29	74,3 ± 4,7
1500 - 3000 m (n = 12)	104 ± 10	126 ± 15	145 ± 14	161 ± 14	172 ± 12	285 ± 21	70,5 ± 4,4
400 - 800 m (n = 10)	115 ± 08	140 ± 12	159 ± 13	171 ± 13	177 ± 09	259 ± 29	63,2 ± 1,1
200 - 400 m (n = 07)	123 ± 13	144 ± 14	161 ± 11	172 ± 10	174 ± 06	246 ± 11	56,0 ± 3,1
100 - 200 m (n = 14)	124 ± 14	146 ± 15	163 ± 14	173 ± 09	178 ± 11	241 ± 29	52,3 ± 3,6
ANOVA	S	S	S	S	NS	S	S

Ce tableau fait ressortir les observations suivantes :

- Pour une charge de travail donnée, les cinq groupes de coureurs diffèrent d'une manière significative par leur fréquence cardiaque ($p < 0,01$). Quelle que soit la charge, comprise entre 100 et 250 watts, les valeurs moyennes de FC sont plus basses chez les coureurs de longues distances que celles des coureurs de plus courtes distances,

- Les cinq groupes de coureurs ne diffèrent pas par leur fréquence cardiaque maximale,

- VO₂ max diffère ($p < 0,01$) d'une spécialité à une autre (fig. 2.6). Plus la distance de course est élevée, plus les valeurs moyennes de VO₂ max sont importantes.

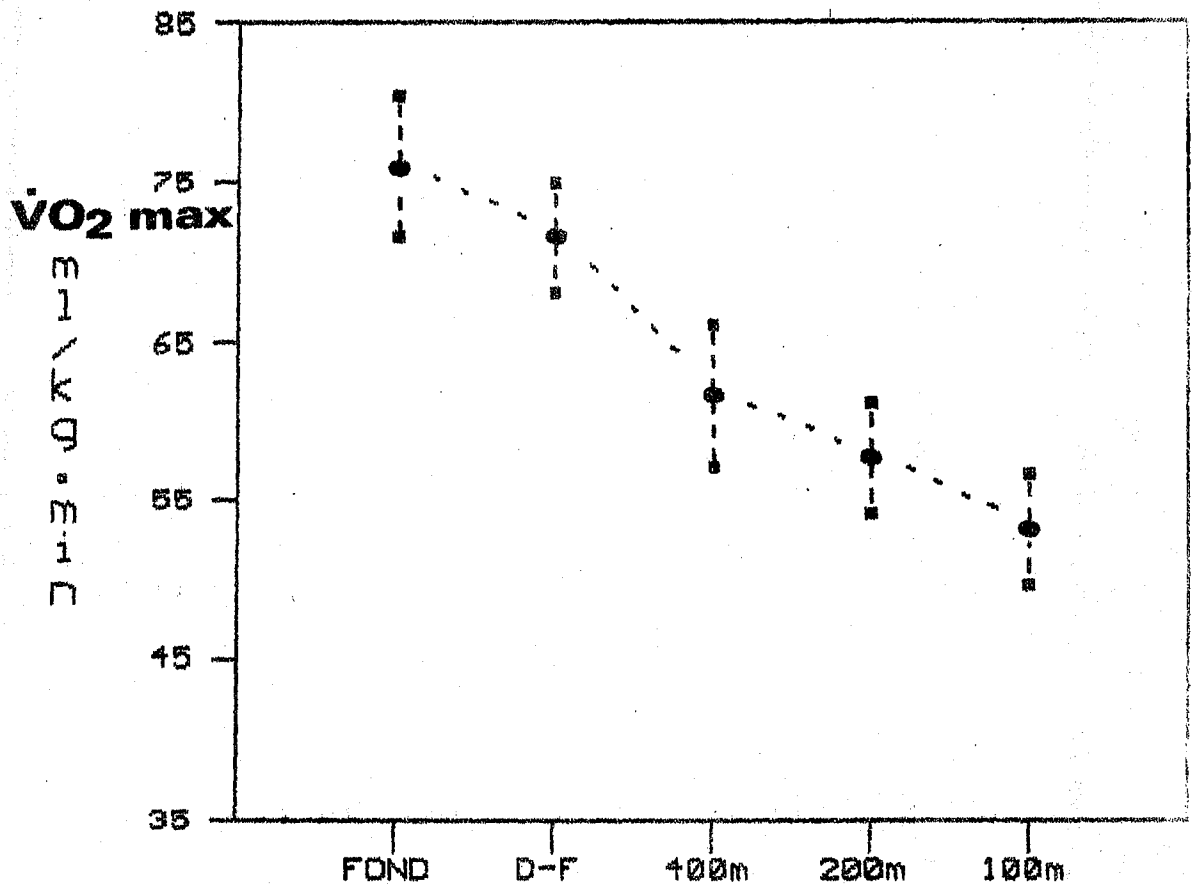


figure 2.6 : VO₂ max mesuré chez des coureurs à pied de haut niveau, par spécialité de courses.

Interrelations entre les paramètres étudiés

Le tableau 2.5 présente les interrelations entre les paramètres enregistrés, au cours de l'épreuve maximale progressive, chez 151 athlètes de différentes disciplines sportives.

Compte tenu de l'effectif, les degrés de signification des coefficients de corrélation retenus sont $p < 0,05$; $p < 0,01$ respectivement pour $r > 0,19$ et $r > 0,25$. La corrélation n'est pas significative pour $r < 0,19$.

Tableau 2.5 : interrelations observées entre les différents paramètres enregistrés lors de l'épreuve maximale progressive

	âge	pds	VO2max	PMA	FC1	FC2	FC3	FCmax	PWC170	PWC160
poids	,13	1,00								
VO2 max	,37	,30	1,00							
P M A	,41	,26	,87	1,00						
FC 1	-,44	-,02	-,53	-,55	1,00					
FC 2	-,46	-,07	-,59	-,60	,94	1,00				
FC 3	-,47	-,08	-,60	-,61	,86	,93	1,00			
FC max	-,32	-,01	-,25	-,18	,68	,75	,82	1,00		
PWC 170	,41	,13	,63	,60	-,82	-,91	-,96	-,76	1,00	
PWC 160	,42	,11	,62	,60	-,89	-,95	-,95	-,76	-,99	1,00
PWC 180	,40	,15	,62	,58	-,75	-,87	-,95	-,76	-,99	-,96

pds: poids corporel.

FC1: FC correspondant à une puissance de 150 watts,

FC2: FC correspondant à une puissance de 200 watts,

FC3: FC correspondant à une puissance de 250 watts,

PWC 170: Charge correspondant à une fréquence cardiaque de 170

PWC 160: Charge correspondant à une fréquence cardiaque de 160

PWC 180: Charge correspondant à une fréquence cardiaque de 180

Le tableau 2.5 fait ressortir les principales observations suivantes :

- l'âge est étroitement corrélé ($p < 0,01$) à l'ensemble des paramètres, excepté le poids corporel,

- le poids corporel est corrélé à VO2 max (ml/kg.min) et à PMA exprimée en watts ($p < 0,01$)

- VO2 max et PMA sont étroitement corrélés ($p < 0,001$) aux fréquences cardiaques correspondantes aux charges de 150, 200 et 250 watts. Pour une charge donnée (comprise entre 150 et 250 watts), il existe une étroite corrélation entre la capacité aérobie (représentée par VO2 max et/ou par PMA) et la fréquence cardiaque enregistrée à cette charge. VO2 max et PMA sont également corrélés ($p < 0,001$) aux charges correspondantes aux fréquences cardiaques de 160 bpm (PWC 160), de 170 (PWC 170) et de 180 bpm (PWC 180). Pour une fréquence cardiaque donnée (comprise entre 160 et 180 bpm), la capacité aérobie est corrélée à la charge qui induit cette valeur de fréquence cardiaque.

CAPACITE AEROBIE

La possibilité d'amélioration de la capacité aérobie est étudiée par la mesure de VO2 max à deux reprises, à dix années d'intervalle (tab. 2.6), et annuellement pendant une période de quatre années (tab. 2.7), chez deux populations d'athlètes.

Le tableau 2.6 présente les valeurs moyennes de VO2 max (ml/kg.min et l/min) et de FC max, enregistrées à deux reprises chez une population de 7 coureurs dans un intervalle de temps de dix années. Les premières mesures sont réalisées en 1975 (22), les deuxièmes en 1984. Le protocole utilisé pour la mesure de ces paramètres étant celui de Petit et al. (paragraphe 2.2.4.1). Ces coureurs, âgés de $20,8 \pm 3,8$ ans lors de la première mesure appartenaient à l'élite sportive algérienne; ils ont poursuivi régulièrement leurs entraînements et compétitions à un haut niveau, pendant les dix années qui séparent les deux tests.

Tableau 2.6 : valeurs moyennes de VO2 max exprimées en valeurs absolues et relatives et de FC max, mesurées dans un intervalle de dix années, chez 7 coureurs à pied

	VO2 max ml/kg.min	VO2 max l/min	FC max b p m
mesures prises en 1975	66,3 ± 5,0	3,93 ± 0,23	184 ± 08
mesures prises en 1984	76,1 ± 5,0	4,53 ± 0,20	170 ± 09
amélioration (%)	15,1 ± 8,0	15,6 ± 9,2	-7,2 ± 5,2
ANOVA	p<0,01	p<0,01	p<0,01

ANOVA: analyse de la variance, la différence est significative entre les séries de mesures.

Le taux d'amélioration des trois paramètres correspond au rapport $(m_1 - m_2) \times 100 / m_2$.

L'analyse de la variance montre une différence significative ($p<0,01$) entre les valeurs de VO2 max exprimé en valeurs absolue et relative et de FC max, mesurées chez une même population à dix années d'intervalle.

VO2 max (ml/kg.min et l/min) a augmenté d'une manière significative, à des taux moyens respectifs de 15,1 et 15,6%. Le taux d'amélioration maximal observé est de 27,7%, le taux minimal est de 8,5%.

La fréquence cardiaque maximale a diminué d'une manière significative ($p<0,01$) durant les dix années d'entraînement. La diminution moyenne représente 7,2%, avec les valeurs extrêmes de 0,5 et 13 %.

CAPACITE AEROBIE

Le tableau 2.7 présente les valeurs moyennes et écarts types de FC max, de PMA, de VO2 max et de PWC 170 enregistrées annuellement pendant une période de quatre années, chez un échantillon de 28 athlètes de haut niveau (18 coureurs et 10 foot-balleurs).

Tableau 2.7 : Valeurs moyennes et écarts-types de FC max, PMA, VO2 max et de PWC 170, mesurées annuellement chez 28 athlètes de haut niveau, pendant une durée de quatre ans (période comprise entre 1984 et 1987).

	années 1984	1985	1986	1987	coefficient de variation
FC max (bpm)	171 ± 11	172 ± 09	172 ± 09	170 ± 12	3,0 % ±1,7
P M A (watts)	296 ± 26	301 ± 29	305 ± 29	297 ± 25	5,0 % ±2,3
VO2 max (l/min)	4,41 ±0,33	4,41 ±0,39	4,49 ±0,38	4,35 ±0,37	4,2 % ±2,1
PWC 170 (watts)	289 ± 35	291 ± 38	294 ± 34	290 ± 36	6,0 % ±4,4

Le coefficient de variation (CV) présenté correspond à la moyenne des quatre CV intra-individuels observés.

D'une année à l'autre, la dispersion des résultats est peu importante. L'analyse de la variance ne montre pas de modification de ces variables durant la période de 4 ans.

2.3.2 ELABORATION ET VALIDATION D'EPREUVES DE MESURE DE VO2 max EN LABORATOIRE

2.3.2.1 Epreuve de mesure directe de VO2 max

Deux épreuves maximales à charges progressivement croissantes, sont utilisées pour évaluer la consommation maximale d'oxygène. L'une standard (épreuve de Petit et al., 1962) à paliers de 2 min, l'autre expérimentale à paliers très courts (12 s); la première servant à tester la validité de la seconde.

La validité et la reproductibilité de l'épreuve expérimentale sont vérifiées sur une échantillon de 27 athlètes de sexe masculin de l'élite sportive nationale, âgés de 22,5 ± 3,2 ans. 15 d'entre eux ont été soumis aux deux épreuves en vue

CAPACITE AEROBIE

de vérifier la validité de l'épreuve expérimentale. Les 12 autres ont réalisé deux fois l'épreuve expérimentale dans un espace de temps d'une semaine, en vue de vérifier sa reproductibilité.

La validité de l'épreuve expérimentale à paliers très courts décrite au paragraphe 2.2.4.2, est vérifiée par rapport à la technique classique de Petit et al. (par. 2.2.4.1), sur un échantillon de 15 athlètes. Le tableau 2.8 présente les valeurs moyennes et écarts-types de PMA, FC max et VO2 max mesurées dans un intervalle d'une semaine, à partir des deux protocoles.

Il existe un lien étroit entre les deux séries de mesures ($p < 0,01$). L'analyse de la variance ne montre pas de différence significative ($p > 0,05$) entre les valeurs de VO2 max et de FC max mesurées à partir des deux protocoles, par contre celles de PMA diffèrent d'un protocole à l'autre ($p < 0,01$); le protocole de Petit et al. fournit des valeurs plus élevées de 9 %.

Tableau 2.8 : valeurs moyennes de PMA, de VO2 max et de FC max, mesurées dans un intervalle d'une semaine, à partir de l'épreuve expérimentale et à partir de l'épreuve de Petit et al.

	PMA	VO2 max	FC max
épreuve expérimentale	287 ± 27	4,30 ± 0,32	166 ± 10
épreuve standard	313 ± 23	4,25 ± 0,30	170 ± 08
r	0,47*	0,78*	0,85*
ANOVA	$p < 0,01$	$p > 0,05$	$p > 0,05$

r*: coefficient de corrélation significatif ($p < 0,01$).

La reproductibilité du protocole expérimental est vérifiée à partir de la mesure, à deux reprises, de VO2 max, de FC max et de PMA, chez 12 sujets, dans un intervalle de temps d'une semaine (tab. 2.9).

D'une épreuve à l'autre, la dispersion des résultats est peu importante, il n'existe pas de différence significative entre les moyennes et variances des deux séries de mesures, pour les trois paramètres. Pour un paramètre donné, le coefficient de corrélation est significatif ($p < 0,01$) entre les deux séries de mesures.

CAPACITE AEROBIE

Tableau 2.9 : comparaison des valeurs moyennes de PMA, de FC max et de VO2 max mesurées, à partir de l'épreuve expérimentale, à deux reprises dans un intervalle d'une semaine

	PMA	FC max	VO2 max
test	299 ± 15	175 ± 12	4,37 ± 0,18
retest	303 ± 20	174 ± 11	4,40 ± 0,24
r	0,88*	0,89*	0,83*
ANOVA	p>0,05	p>0,05	p>0,05

ANOVA: la différence n'est pas significative entre les deux séries de mesures pour les trois paramètres étudiés.

2.3.2.2 Technique de mesure indirecte de VO2 max

Cette technique, mise au point à l'occasion de cette étude, permet de déterminer d'une manière indirecte la consommation maximale d'oxygène et la puissance maximale aérobie, à partir du nomogramme élaboré précisément pour cette épreuve (figure 2.7)

Le nomogramme permet l'estimation de VO2 max à partir d'une épreuve progressive, qu'elle soit maximale ou sous-maximale.

Si l'épreuve est poursuivie à une intensité maximale, la consommation maximale d'oxygène peut être appréciée à partir de la relation qui la lie à la puissance maximale (équation 2 du paragraphe 2.4.1.2), figurant en ordonnée sur le nomogramme,

$$\text{soit : VO2 MAX (l/min)} = 0,0129 \text{ PMA (watts)} + 0,50.$$

Lorsque l'épreuve est sous-maximale, l'estimation de VO2 max se base sur l'extrapolation linéaire de VO2 max à partir de la relation FC-P, jusqu'à la fréquence cardiaque maximale théorique, corrigée selon l'Age du sujet, présentée par l'équation [5] du paragraphe 2.4.1.2 et par la figure 2.7.

Ce nomogramme est élaboré à partir de la combinaison des équations [2], [5] et [6] du paragraphe 2.4.1.2 et des interrelations observées entre les différents paramètres étudiés (tab. 2.5).

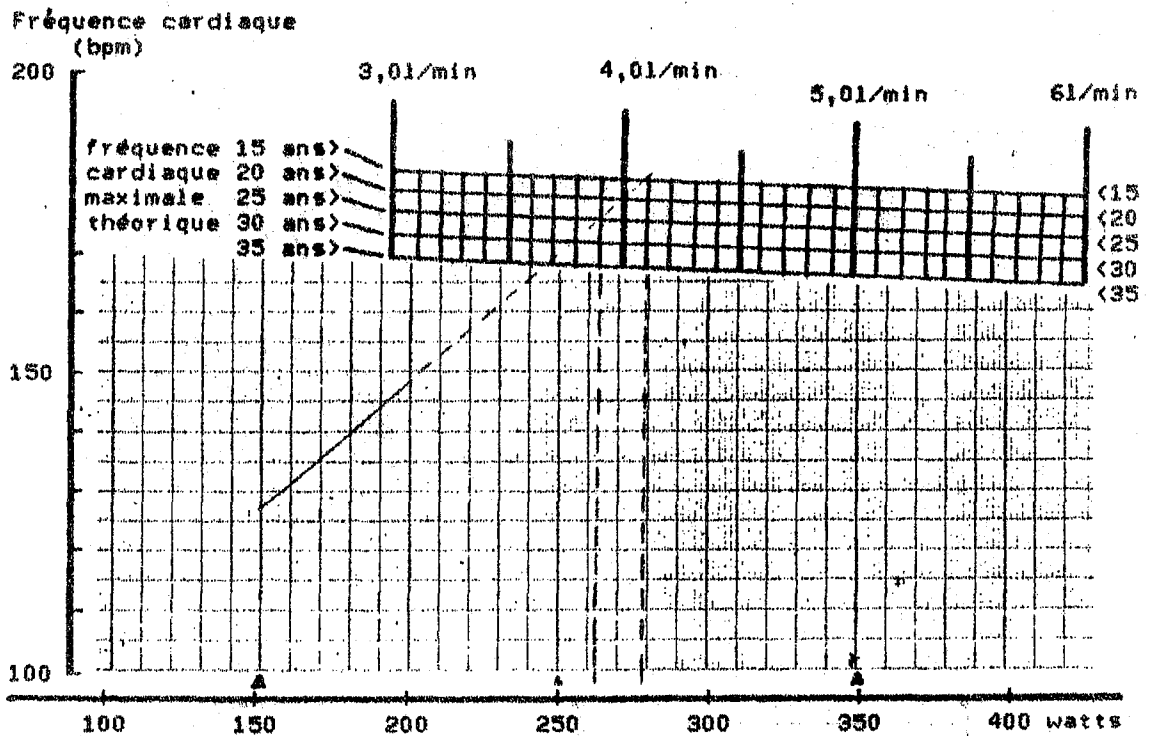


Figure 2.7 : Nomogramme de prédiction de V_{O_2} max à partir de la relation FC - puissance et/ou à partir de la puissance maximale.

Nomogramme établi à partir des relations suivantes :
 V_{O_2} max (l/min) = $0,0129 P$ (watts) + 0,5
 $n = 151, S_{xy} = \pm 5,1 \%$

FC max (bpm) = $200 - (0,021 P + 0,72 \text{ âge})$
 $n = 151, S_{xy} = 6,2 \%$

P : puissance maximale atteinte en fin de l'épreuve progressive, exprimée en watts,
 l'âge du sujet est exprimé en années,
 FC max : fréquence cardiaque maximale théorique,
 S_{xy} : erreur-type de l'estimation

CAPACITE AEROBIE

La validité du nomogramme est vérifiée par rapport à la technique de mesure directe de VO2 max, sur un échantillon de 151 athlètes de différentes disciplines sportives.

Le tableau 2.10 présente les valeurs moyennes et écarts types de VO2 max mesuré par rapport à VO2 max estimé à partir d'équations classiques établies par différents auteurs (Astrand et Ryhming, 1954; Balke, 1960; Karpman, 1980).

Il existe une étroite corrélation entre VO2 max mesuré et VO2 max prédit à partir de différentes méthodes. L'ANOVA ne montre pas de différence significative entre VO2 max mesuré et VO2 max prédit à partir de la relation VO2 max - P.M.A [2] et à partir du nomogramme [3] établis lors de cette étude. Le nomogramme d'Astrand [4] et l'équation de Balke [5] sous-estiment VO2 max moyen, respectivement de 5,6 et 10,9 %, avec des écarts maximum respectifs de 27 %. L'équation de Karpman [6] sous-estime VO2 max moyen de 11 %, avec un écart maximum de 38% .

Les écarts maximum enregistrés avec l'équation [2] et le nomogramme [3] correspondent respectivement à 14 et 20 %

Les étroites relations existantes entre VO2 max mesuré et VO2 max estimé à partir de la P.M.A [2], et à partir du nomogramme [3], de même que l'identité des moyennes et des variances de ces trois séries de mesures mettent en évidence la validité de cette nouvelle technique d'estimation de VO2 max.

Tableau 2.10 : Comparaison de VO2 max mesuré [1], par rapport à VO2 max calculé à partir d'équations [2, 3, 4, 5, 6] établies par différents auteurs

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
VO2 max	4,16	4,14	4,08	3,94	3,75	4,61
(l/min)	0,43	0,38	0,48	0,33	0,36	0,64
r		0,87*	0,63*	0,48*	0,87*	0,65*
ANOVA		p>0,05	p>0,05	p<0,01	p<0,01	p<0,01

r*: corrélation significative (p<0,01), ANOVA: teste les différences entre VO2 max mesuré et VO2 max prédit.

[1] VO2 max mesuré

[2,3,4,5,6] VO2 max calculés à partir des équations suivantes :

[2] équation expér.: $VO2 \text{ max (l/min)} = 0,0129 \text{ PMA (watts)} + 0,5,$

[3] nomogramme expérimental (fig.2.7), [4] nomogramme d'Astrand,

[5] équation Balke: $VO2 \text{ max (l/min)} = 0,0122 \text{ PMA (watts)} + 0,3,$

[6] équation Karpman: $VO2 \text{ max (ml/min)} = 2,2 \text{ PWC170 (kgm/kg.min)} + 1070,$

CAPACITE AEROBIE

La reproductibilité de VO₂max prédit à partir du nomogramme et à partir de la relation VO₂max-PMA est essentiellement liée à la reproductibilité des paramètres qui ont servi à leur élaboration. Autrement dit à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la relation FC-P pour "VO₂ max [3]", à partir de PMA pour "VO₂ max [2]".

Le tableau 2.11 présente les valeurs moyennes et écarts types de P.M.A, de a et b respectivement pente et ordonnée de la relation FC-P, et de VO₂ max prédit à partir de PMA et à partir du nomogramme, enregistrés chez 29 sujets à deux reprises dans un intervalle d'une semaine.

D'une épreuve à l'autre, la dispersion des résultats est peu importante. Il n'existe pas de différence significative entre les deux mesures, pour l'ensemble des variables. Le coefficient de corrélation, pour une variable donnée, est significatif ($p < 0,01$) entre les deux mesures.

Tableau 11 : Valeurs comparées de PMA, de a, b, et de VO₂ max estimé à partir du nomogramme, mesurées à deux reprises dans un intervalle d'une semaine.

	PMA	VO ₂ max[2]	a	b	VO ₂ max[3]
test	303 ± 26	4,45 ± 0,36	0,34 ± 0,06	71 ± 22	4,43 ± 0,43
retest	310 ± 28	4,54 ± 0,39	0,36 ± 0,06	65 ± 16	4,46 ± 0,41
r	0,78*	0,80*	0,55*	0,55*	0,85*
ANOVA	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05

r : coefficient de corrélation entre les variables mesurées à deux reprises, r* : corrélation significative ($p < 0,01$), ANOVA : la différence n'est pas significative entre les deux séries de mesures.

2.3.3. EPREUVE DE TERRAIN

V02 max et spécialité de course

Les valeurs moyennes de V02 max et de la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 min, sont présentées par spécialité de course au tableau 2.12 ci-dessous.

Une différence significative est observée entre les coureurs des différentes spécialités, aussi bien pour V02 max que pour la distance parcourue lors de l'épreuve de 5 min ($p < 0,01$). Les valeurs de V02 max et de la vitesse de course augmentent avec la distance de course pratiquée par le coureur.

Les valeurs moyennes de la fréquence cardiaque enregistrée à 400, 800, 1200 mètres et à la fin de l'épreuve de 5 min sont respectivement de 176 ± 9 , 180 ± 8 , 183 ± 8 et 185 ± 6 bpm. Il n'existe pas de différence significative entre ces valeurs. La variation intra-individuelle moyenne de la fréquence cardiaque enregistrée au cours de cette épreuve correspond à $1,6 \pm 0,9$ %, pour une variation intra-individuelle de la vitesse de $5,9 \pm 2,5$ %.

Tableau 2.12: Valeurs moyennes et écarts-types de la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 min, de V02 max et du volume maximal d'oxygène par km, pour différentes spécialités de course

spécialités	"5 minutes" km/h	V02 max ml/kg.min	V02 max/km ml/kg.km(*)
5 000-10 000 m	$21,5 \pm 0,7$	$75,2 \pm 3,3$	207 ± 9
800 - 1 500 m	$21,3 \pm 0,7$	$70,2 \pm 3,6$	199 ± 8
400 - 800 m	$20,2 \pm 0,7$	$60,2 \pm 4,8$	184 ± 4
200 - 400 m	$18,9 \pm 1,2$	$55,6 \pm 3,2$	186 ± 11
100 - 200 m	$17,0 \pm 1,0$	$53,5 \pm 3,6$	186 ± 9
ANOVA	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$

(*) ml d'O2/kg.km est l'expression du rapport V02 max (ml/kg.min), sur la vitesse moyenne de course (km/h).

Relation entre V02 max et la vitesse de course

La consommation maximale d'oxygène est étroitement liée à la vitesse moyenne développée au cours de l'épreuve de 5 min. Plus la vitesse du coureur est élevée, plus son V02 max est important. La relation linéaire (fig. 2.8) a tendance à sous-estimer V02 max pour les vitesses extrêmes, c'est-à-dire s'éloignant de la fourchette de $19,8 \pm 1,8$ km/h, et surestimer les valeurs moyennes. La courbe expérimentale s'ajuste sur différentes autres fonctions.

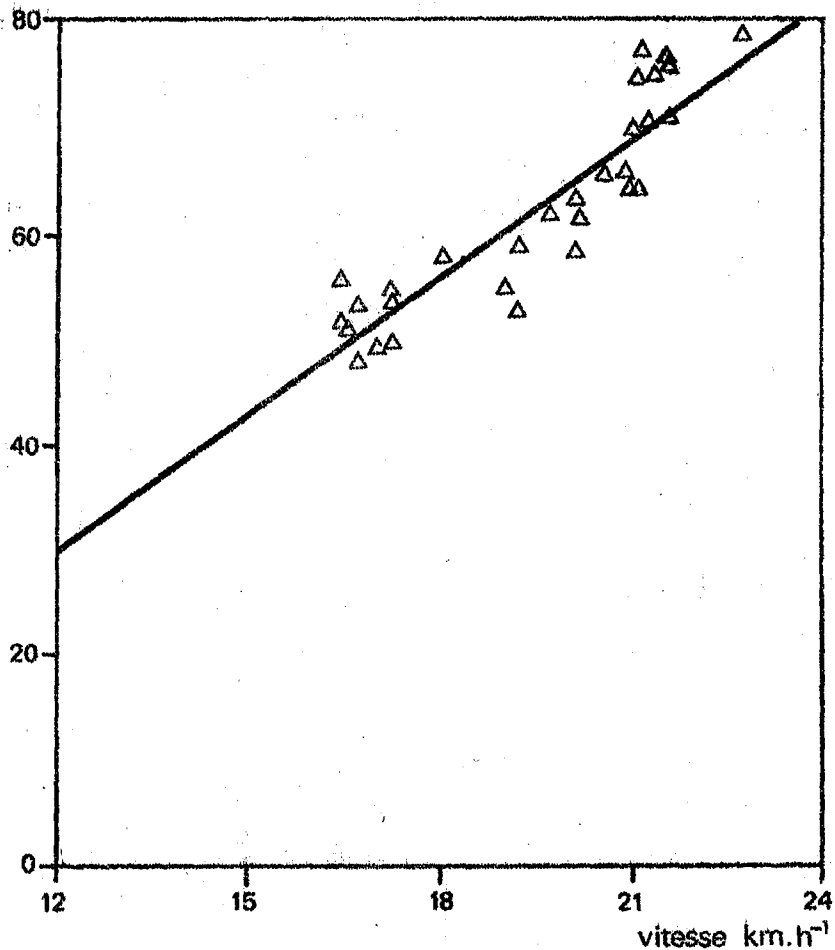


Figure 2.8 : Relation entre VO₂ max et la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 minutes, chez des coureurs de différentes spécialités.

La fonction parabolique fournit une meilleure estimation de VO₂ max ($r = 0,93$, $S_{xy} = \pm 5,0\%$) que les fonctions linéaire ($S_{xy} = \pm 7,1\%$), exponentielle et de puissance ($S_{xy} = \pm 6,9\%$) est du type :

$$[1] \text{ VO}_2 \text{ max (ml/kg.min)} = 340,6 - 34,14v \text{ (km/h)} + 1,01v^2$$

Elle croise les fonctions linéaire, exponentielle, logarithmique et de puissance à des vitesses de course de 17,5 et 21 km/h (fig. 2.9). Entre ces deux vitesses, l'estimation de VO₂ max à partir de l'une des 5 fonctions, fournit des valeurs non significativement différentes des valeurs réelles. On ne retrouve pas non plus de différence avec les valeurs estimées à partir des équations de Bransford et Howley (15), de Costill (41), de Mayhew (139) et de Pugh (164) élaborées sur des coureurs, à partir de la relation VO₂-vitesse sur tapis roulant.

Pour des vitesses supérieures à 21 km/h, l'équation parabolique fournit des valeurs de VO_2 max plus élevées ($p < 0,01$) et plus conformes à l'observation que les équations, linéaire, exponentielle, logarithmique et de puissance, ou que les équations des auteurs sus-cités.

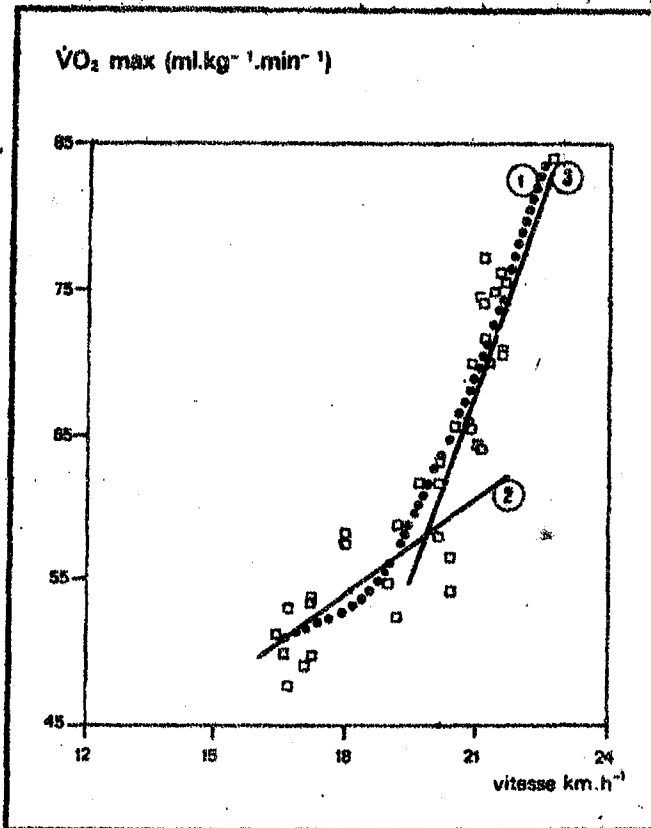


Figure 2.9 : Données de VO_2 max et des vitesses de course, ajustées sur différentes fonctions. Les chiffres indiqués correspondent aux équations présentées dans le texte.

Les données recueillies montrent que pour des vitesses comprises entre 16,5 et 20,0 km/h, la vitesse de course augmente d'une manière linéaire avec VO_2 max. Mais au delà de 20 km/h, l'accroissement de la vitesse de course entraîne une élévation plus accrue de la consommation d'oxygène. L'utilisation de l'équation [1] est alors plus indiquée pour l'estimation de VO_2 max pour toute l'étendue des vitesses enregistrées dans cette étude c'est-à-dire entre 16,5 et 22,7 km/h.

L'équation [1] du second degré est simplifiée et décomposée en deux équations linéaires du premier degré. Les équations [2] et [3] élaborées respectivement à partir des valeurs inférieures et supérieures à la moyenne, fournissent des

CAPACITE AEROBIE

erreurs types de l'estimation (S_{xy}) plus réduites que l'équation linéaire simple.

$$[2] \text{VO}_2 \text{ max (ml/kg.min)} = 2,27 v \text{ (km/h)} + 13,3$$
$$n = 19, r = 0,80, S_{xy} = \pm 5,4 \%$$

Cette équation est élaborée à partir des vitesses comprises entre 16,5 et 20 km/h et de leurs $\text{VO}_2 \text{ max}$ correspondants. Ces résultats sont généralement réalisés par les coureurs pratiquant des spécialités de course comprises entre 100 et 400 m.

Pour les vitesses supérieures à 20 km/h, développées par les coureurs pratiquant des distances supérieures ou égales à 400m, l'équation [3] permet une meilleure estimation de $\text{VO}_2 \text{ max}$:

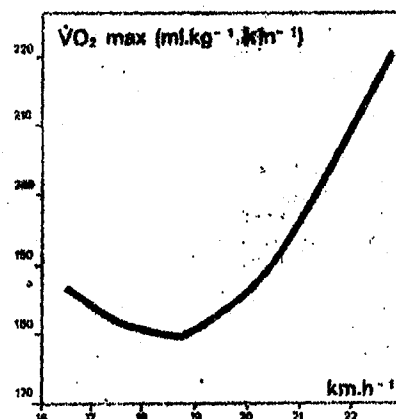
$$[3] \text{VO}_2 \text{ max (ml/kg.min)} = 8,67 v \text{ (km/h)} - 113$$
$$n = 19, r = 0,76, S_{xy} = \pm 5,3 \%$$

Relation entre le volume maximal d'oxygène par km parcouru et la vitesse de course sur 5 minutes.

L'évolution du volume maximal d'oxygène par km parcouru, en fonction de la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 min, présente une allure parabolique (fig. 2.10). Pour des vitesses comprises entre 16,5 km/h (vitesse minimale enregistrée) et 20,2 km/h, ce volume est constant, par contre, au delà de 20,2 km/h, il augmente avec la vitesse.

Le volume maximal d'oxygène, rapporté à la distance parcourue ($\text{ml d'O}_2/\text{kg.km}$), diffère d'une manière significative lorsque l'on compare l'ensemble des spécialités (tab. 2.12). Cependant, la comparaison des groupes pris deux à deux ne montre pas de différence significative entre les coureurs de 100 à 800 m. Les valeurs de coureurs de 1500 à 10.000 m sont plus élevées que celles des coureurs de 100 à 800 m ($p < 0,01$).

Figure 2.10 Relation entre le volume maximal d'oxygène par km et la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 minutes.



CAPACITE AEROBIE

Le tableau 2.13 présente les valeurs moyennes du volume maximal d'oxygène net par km parcouru, correspondant aux vitesses moyennes de $18,2 \pm 1,4$ et $21,2 \pm 0,5$ km/h. Ces volumes moyens sont comparés aux valeurs moyennes du volume d'oxygène net par km, établies par différents auteurs à partir d'épreuves sous-maximales réalisées sur tapis roulant. Ne sont présentées au tableau 2.13 que les données moyennes accompagnées de leurs écarts-types. Le tableau 2.13 montre que les valeurs moyennes du volume maximal d'oxygène par km, correspondant à des vitesses inférieures à 20,2 km/h, sont comparables aux valeurs moyennes du volume d'oxygène par km rapportées par différents auteurs. Pour des vitesses supérieures à 20,2 km/h, elles sont significativement plus élevées ($p < 0,01$).

Tableau 2.13 : Coût énergétique net de la course sur tapis roulant, rapporté par différents auteurs.

Sources	effectif	vitesse	coût énergétique
Bhambhani et sing (1985)	06	$9,3 \pm 0,7$	184 ± 18
Howley et Glover (1974)	08	$11,7 \pm 1,5$	178 ± 10
Mayhew (1977)	09	$12,9 \pm 2,5$	177 ± 8
Mc Miken et Daniels (1976)	08	$13,0 \pm 2,2$	172 ± 7
Présente étude	19	$18,2 \pm 1,4$	173 ± 8
	19	$21,2 \pm 0,5$	190 ± 11

CAPACITE AEROBIE

Relation entre VO2 max, vitesse de course sur 5 min et performances sur différentes distances de courses.

Le tableau 2.14 montre que dans les spécialités de course dont la distance est comprise entre 800 et 10.000 m, les athlètes possédant un VO2 max élevé, réalisent de meilleures performances que ceux dont VO2 max est bas. La relation entre VO2 max et la performance est plus forte ($p < 0,01$) pour les distances comprises entre 1500 et 5000 m. Les mêmes résultats sont observés avec l'épreuve de 5 min, mais les relations sont plus étroites que celles qui lient VO2 max à la performance, pour toutes les spécialités de distances comprises entre 800 et 10.000 m. Pour l'ensemble des distances comprises entre 1500 et 5000 m, les performances estimées, soit à partir de l'épreuve de 5 min, soit à partir de VO2 max, sont comparables aux performances réelles. On observe, en outre, une relation négative entre les performances réalisées sur les distances de 100 et 200 m et les résultats des deux tests (VO2 max et épreuve de 5 min).

Tableau 2.14 : Relations entre la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 minutes, VO2 max et la performance sur différentes distance de course.

	100m	200m	400m	800m	1500m	3000m	5000m	10000m
Epreuve 5 min	-S*	-S*	NS	S**	S**	S**	S**	S**
VO2 max ml/kgmin-S*	-S**	-S**	NS	S	S	S*	S**	S*
VO2 max l/min	-S*	-S*	NS	S*	S**	S**	S**	S*

La vitesse de course développée lors de l'épreuve de 3000m courue en compétition, est très voisine de celle de l'épreuve de 5 min, courue en situation expérimentale, elle correspond à $99 \pm 2\%$ de cette dernière. Celles des épreuves de 1500, 5000 et 10.000 m correspondent respectivement à 108 ± 2 , 95 ± 4 et $91 \pm 2\%$ de l'épreuve de 5 min.

2.4. DISCUSSION

Nous nous proposons d'analyser ci-après les adaptations immédiates et à long terme du système de transport et d'utilisation de l'oxygène, chez les athlètes de haut niveau, et d'apprécier les différences de ces adaptations en fonction du type de pratique sportive.

Ces adaptations sont essentiellement appréciées à partir de l'analyse des aspects qualitatifs et quantitatifs de l'évolution de la fréquence cardiaque et de la consommation d'oxygène lors d'une épreuve ergométrique standardisée à charge progressivement croissante, élaborée et validée à l'occasion de cette étude.

A partir de la nature des réponses physiologiques à l'effort et de leurs relations avec VO_2 max, et en vue d'adapter les épreuves d'évaluation de la capacité aérobie aux ressources disponibles, de nouvelles techniques de laboratoire et de terrain, sont mises au point.

L'évaluation, chez un groupe d'athlètes, de VO_2 max à deux reprises, à dix années d'intervalle (adaptation à long terme), de même que son évaluation continue et répétée chez un autre groupe d'athlètes, pendant une durée de quatre années (adaptation à moyen terme), nous permet d'étudier les possibilités d'amélioration de VO_2 max chez les athlètes de haut niveau.

2.4.1 CAPACITE AEROBIE ET SPORTS DE PERFORMANCE

2.4.1.1 VO_2 max et types de pratique sportive

La façon la plus commune d'apprécier la sollicitation du métabolisme aérobie imposée par une activité sportive quelconque, consiste à mesurer directement la consommation d'oxygène pendant la pratique de cette activité. Cependant, les contraintes liées au port de l'appareillage par le sujet lors de cette mesure, limitent les mouvements et entachent les mesures d'erreurs non négligeables. La consommation maximale d'oxygène atteinte par les meilleurs athlètes dans une discipline donnée, fournit de bonnes indications sur les contraintes imposées au système aérobie, sans pour autant avoir recours aux mesures sur le terrain (80). On part alors du principe que si les individus qui atteignent un haut niveau dans une discipline présentent un VO_2 max élevé, c'est certainement parce que cette discipline impose une forte sollicitation du système de transport de l'oxygène.

D'après de nombreux auteurs (6, 85, 86, 127), la capacité aérobie peut être exprimée d'une manière équivalente aussi bien à partir de VO_2 max, de PMA, qu'à partir de PWC 170. Cette constatation est appuyée par les étroites interrelations

CAPACITE AEROBIE

observées entre ces trois paramètres (tab. 2.5). Dans la discussion qui suit, l'emploi de VO₂ max est plus utilisé que PWC 170 et PMA pour exprimer la capacité aérobie, en raison de son caractère plus universel et aussi parce qu'il traduit mieux la capacité du système de transport et d'utilisation de l'oxygène.

La comparaison des valeurs moyennes de VO₂max et de PWC 170 mesurées chez les équipes nationales algériennes de différentes disciplines sportives (tab.2.3, fig. 2.5 et 2.6) fait apparaître une différence significative ($p < 0,01$) entre les athlètes des différentes disciplines, aussi bien pour VO₂ max que pour PWC 170. L'analyse de la variance fait ressortir cinq groupes d'athlètes distincts par leur VO₂ max et leur PWC 170. Il s'agit par ordre décroissant de VO₂ max et de PWC 170 :

1- des coureurs de distances supérieures ou égales à 1500m et des cyclistes, dont les moyennes de VO₂ max et de PWC 170 sont voisines et correspondent respectivement à $71,9 \pm 5,0$ ml/kg.min et $28,5 \pm 4,0$ kgm/kg.min,

2- les rameurs et les nageurs avec des moyennes respectives de $62,0 \pm 5,8$ ml/kg.min, et $24,1 \pm 4,1$ kgm/kg.min,

3- les boxeurs, judokas, coureurs de 400-800 m et footballeurs ($59,6 \pm 6,2$ ml/kg.min, $23,5 \pm 2,9$ kgm/kg.min),

4- et les coureurs de 200 à 400 mètres, sauteurs, et joueurs des sports collectifs exceptés les footballeurs ($55,3 \pm 5,7$ ml/kg.min, $20,3 \pm 2,9$ kgm/kg.min).

Les sédentaires de 20 à 25 ans possèdent un VO₂ max d'environ 3,0 l/min, soit 45 ml/kg.min (6, 22). Comparés à ces données, les résultats enregistrés chez les athlètes semblent montrer que l'ensemble des disciplines sportives étudiées fait appel à un niveau important du métabolisme aérobie, mais à des degrés qui diffèrent selon le type de sport pratiqué.

Les résultats de VO₂ max enregistrés dans cette étude confirment les données classiques (6, 56, 70, 125, 187), à savoir que les athlètes pratiquant des disciplines sportives qui requièrent un effort intense et soutenu pendant plus de deux minutes possèdent les capacités aérobies les plus élevées. C'est le cas des courses de distances supérieures ou égales à 1500 m, du cyclisme et de l'aviron. Inversement, les athlètes pratiquant des disciplines de très brèves durées ou intermittentes, présentent des valeurs de VO₂ max plus basses, mais toujours supérieures à celles des sédentaires. Ceci souligne l'importance du métabolisme aérobie dans la pratique des activités sportives d'une manière générale, et des sports d'endurance en particulier.

CAPACITE AEROBIE

Les athlètes des différentes disciplines sportives étudiées diffèrent également par leur VO₂ max lorsqu'il est exprimé en valeur absolue ($p < 0,01$). Cependant, cette différence n'est pas aussi forte que celle observée pour VO₂ max relatif et PWC 170. On peut, en effet, classer les athlètes en deux groupes distincts par leur VO₂ max absolu au lieu de quatre, comme pour VO₂ max relatif :

- les courses de distances supérieures à 400 mètres, le cyclisme, l'aviron, les sports de combat et les sports collectifs, excepté le volley-ball,

- les courses de courtes distances (inférieures ou égales à 400 m), les sauts et le volley-ball.

L'importance de VO₂ max exprimé en valeur absolue, chez les athlètes de certaines disciplines sportives, telles que les sports collectifs et les sports de combat, est liée aux exigences énergétiques aérobies de ces disciplines, mais également à l'importance de la masse musculaire chez leurs pratiquants. Il a été démontré en effet, que la masse corporelle influe d'une manière significative sur le niveau de développement de VO₂ max. Mc Ardle et al. (125) estiment que 60% des différences interindividuelles de VO₂ max dépendent des différences de masse corporelle. Wyndham et al. (200) montrent que la taille et le poids influent positivement sur VO₂ max dans les proportions respectives de 4 et 1 %. Lors de cette étude, nous avons trouvé effectivement des relations positives ($p < 0,01$) entre PMA et le poids corporel (tab. 2.5). Il semble de ce fait peu utile de comparer des valeurs absolues de VO₂ max d'individus de gabarit divers et de masse corporelle différente (125). C'est pourquoi la consommation d'oxygène est exprimée généralement en valeurs relatives à la masse corporelle.

Au sein d'une même discipline sportive qu'est la course à pied, VO₂ max diffère ($p < 0,01$) d'une spécialité à une autre (tab. 2.4 et 2.12, fig. 2.6). Les valeurs moyennes de VO₂ max augmentent généralement avec la distance de course pratiquée par le coureur. Plus la distance de la spécialité de course est longue, plus VO₂ max est élevé. Ceci témoigne de l'importance progressive de cette variable au fur et à mesure de l'augmentation de la distance de la spécialité, et met en évidence les exigences énergétiques aérobies des épreuves de longues distances. Cela peut éventuellement témoigner de l'influence de l'entraînement spécifique auquel sont soumis les coureurs de longues distances, sur le développement de VO₂ max.

CAPACITE AEROBIE

Cependant, à partir d'une certaine distance de course (5.000 m), la tendance à l'augmentation de VO_2 max ne se poursuit pas. Ceci suggère, qu'au delà de 5.000 m, d'autres facteurs interviennent d'une manière importante dans la réalisation de la performance, parmi lesquels :

- la capacité d'utilisation d'une grande fraction d'oxygène (41, 182),
- le seuil anaérobie (108),
- l'efficacité de la foulée (36).

Les données recueillies chez les coureurs à pied montrent, d'une part que plus VO_2 max est élevé, meilleure est la performance sur les distances supérieures ou égales à 800 mètres et que, d'autre part, VO_2 max est corrélé négativement aux performances de courtes durées et principalement sur celles de 100 et 200 mètres (tab. 2.14). Ceci reflète l'antagonisme entre les qualités aérobies, prédictives de la performance dans les épreuves de longues distances, et les qualités anaérobiques, déterminantes de la performance dans les courses de courtes distances. Autrement dit, dans les épreuves intenses et soutenues, la majeure partie de l'énergie utilisée provient des sources aérobies. De plus, l'intensité et la durée sont suffisamment élevées pour impliquer une consommation d'oxygène proche de son niveau maximum. Ce qui n'est pas le cas pour les épreuves de brèves durées, qui tirent leur énergie essentiellement des processus anaérobies (chap. 4).

La valeur de la consommation maximale d'oxygène peut permettre une certaine prédiction de la performance chez les athlètes dans les épreuves intenses et soutenues. En effet, les athlètes qui réussissent bien dans ce type d'épreuves présentent des valeurs de VO_2 max très au dessus de la moyenne (tab. 2.14). Nous reviendrons plus loin sur cette question.

Des valeurs élevées de VO_2 max sont primordiales pour certaines spécialités (course de distances supérieures ou égales à 800 m, natation, aviron, etc.), mais pas toujours suffisantes. En effet, d'autres facteurs tels que la motivation, la composition corporelle (39, 150), la capacité anaérobie (10, 187) utile pour le sprint final entre autres, le rendement mécanique (36), l'habileté (79, 147, 178) et la capacité à maintenir un pourcentage élevé de VO_2 max (41) etc., peuvent aussi affecter la performance. Si des athlètes, de différents niveaux se distinguent essentiellement par leur VO_2 max, les athlètes de haut niveau, ayant un niveau élevé de VO_2 max, se distinguent, de surcroît, par les autres facteurs.

CAPACITE AEROBIE

Un VO_2 max élevé favorise non seulement la performance de longue durée, mais en permettant des charges d'entraînement importantes en volume et en intensité, peut indirectement, favoriser le développement d'autres qualités (56). Il permet une meilleure récupération après l'exercice, car celle-ci se déroule en aérobie, et assure à l'entraînement une reconstitution rapide de l'énergie dépensée (187)

VO_2 max constitue aussi un critère d'une bonne capacité physique générale non seulement du sportif, mais aussi de l'enfant et de l'adulte non compétiteurs (30). Enfin, dans la plupart des recherches portant sur les incidences physiologiques de l'exercice ou de l'entraînement, l'augmentation de VO_2 max constitue l'un des critères objectifs souvent retenu pour apprécier l'amélioration de la capacité aérobie (127).

L'évaluation de la capacité d'un athlète à fournir de l'énergie à partir de la source aérobie doit être, de ce fait, appliquée systématiquement aux athlètes pratiquant des disciplines sportives, dans lesquelles la performance pourrait être affectée par les insuffisances de ce processus. La mesure de VO_2 max d'un athlète sera de moindre valeur pour la prédiction du potentiel compétitif, dans une discipline nécessitant une dépense d'énergie maximale d'une durée très brève.

Certaines activités sportives, comme les sports de raquette et la plupart des sports collectifs, nécessitent une série de brèves (5 à 20 s) explosions de libération d'énergie très intenses, séparées par des périodes de récupération d'intensité plus faible. Bien que dans de tels sports, la majorité de l'énergie soit issue directement de sources non oxydatives, les phases de récupération sont des processus oxydatifs. Aussi, la capacité de reconstitution des stocks de haute énergie dans les muscles (ATP, créatine phosphate) et l'oxydation des sous produits du métabolisme anaérobie (acide lactique) sont pour une large part sous la dépendance de VO_2 max de l'athlète. En outre, on peut s'attendre à ce que le degré de récupération soit un facteur de plus en plus important à mesure que la durée du match ou du tournoi augmente.

Pour ces raisons, l'évaluation de VO_2 max est également une épreuve utile pour de tels athlètes. Des normes d'appréciation de la capacité aérobie des sportifs sont présentées, par spécialité, au tableau 2.15. Ces normes sont élaborées à partir des valeurs moyennes et écarts-types, de VO_2 max et de PWC 170 présentées au paragraphe 2.3.1.

CAPACITE AEROBIE

Tableau 2.15 : Normes d'appréciation de la capacité aérobie à partir de VO₂ max (ml/kg.min), et à partir de PWC 170 (kgm/kg.min), établies pour les athlètes de haut niveau

	très bas	bas	satisfaisant	bon	très bon
courses 200 - 400 m,	<16	16-19	19-22	22-25	>25
sauts, HB, BB, VB	<49	49-53	53-57	57-62	>62
sports de combats,	<18	18-22	22-25	25-28	>28
foot-ball	<50	50-56	56-63	63-70	>70
aviron, natation (>100m),	<18	18-22	22-26	26-30	>30
courses 400 - 800 m	<54	54-59	59-65	65-70	>70
cyclisme, marche,	<23	23-26	26-32	32-34	>34
courses 1/2 fond et fond	<64	64-69	69-74	74-79	>79

Ces normes sont établies à partir des valeurs moyennes et écarts-types, de VO₂ max et de PWC 170, enregistrées chez les athlètes d'élite, au cours de l'épreuve maximale à charge progressive, réalisée sur bicyclette ergométrique.

2.4.1.2 Les possibilités d'amélioration de VO₂ max.

Faute d'études physiologiques longitudinales d'athlètes, menées depuis le début de leur carrière sportive, s'étendant sur une longue période, on ne peut savoir jusqu'à quel degré le niveau de VO₂ max est lié à l'entraînement plutôt qu'aux facteurs héréditaires.

Bien que l'on ne sache pas très clairement où se situe le facteur limitant de VO₂ max, on sait qu'il est possible d'améliorer cette qualité par l'entraînement. Les entraînements les plus adéquats, pour le développement de PMA sont ceux qui sollicitent la filière aérobie d'une manière maximale ou quasi-maximale (6, 70, 127). C'est ce que l'on appelle le principe de la surcharge.

Les possibilités d'amélioration de PMA par l'entraînement ne sont, bien entendu pas illimitées. On considère que, chez un sujet très sédentaire, il est possible, par un entraînement approprié d'augmenter PMA de 15 à 40 % (90, 160, 171. L'évaluation de VO₂ max chez un groupe de 7 coureurs de demi-fond, à deux reprises dans un intervalle de dix années, nous a permis de relever des améliorations moyennes de 15,1 et

CAPACITE AEROBIE

de 15,6 %, respectivement pour VO₂ max exprimé en valeurs relative et absolue, avec des valeurs extrêmes de 8,5 et 27,7 % (tab. 2.6). Cette amélioration de VO₂ max est accompagnée d'une diminution significative de la fréquence cardiaque maximale. Ceci suggère qu'une telle augmentation est liée à l'augmentation simultanée du volume d'éjection systolique et de la différence artério-veineuses pour l'oxygène (chapitre 1.).

En accord avec Astrand et Rodahl (6) et Mac Dougall et al. (127), il est admis que les possibilités d'amélioration de VO₂max, chez les athlètes très entraînés, sont virtuellement nulles. En effet, à l'occasion de mesures régulières et répétées, pendant une période de quatre années, chez 28 athlètes d'équipes nationales, donc soumis à des entraînements intensifs, VO₂ max et d'autres paramètres physiologiques (FC max, PMA et PWC 170) sont restés pratiquement constants au cours de ces quatre années (tableau 2.7). Parallèlement, les performances des athlètes se sont améliorées de 5 % en moyenne.

La consommation maximale d'oxygène des athlètes de haut niveau, ainsi que les paramètres qui la caractérisent, peuvent donc rester les mêmes pendant plusieurs années successives malgré un entraînement sévère et régulier. L'entraînement à ce niveau de performance, s'il n'améliore pas la consommation maximale d'oxygène, permet en revanche de la maintenir à un haut niveau. En effet, l'interruption de l'entraînement fait régresser progressivement le niveau de PMA jusqu'à sa valeur initiale (187).

Nous avons jusqu'à présent considéré la consommation maximale d'oxygène et les variables physiologiques qui la sous-tendent, comme seuls indices de l'aptitude aérobie des individus. Cependant, des facteurs locaux situés au sein du muscle lui-même exercent une influence sur le métabolisme.

Chez les athlètes de haut niveau, les modifications à long terme ne se traduisent pas forcément par des variations de VO₂max. Certains auteurs (91, 172) admettent que le potentiel oxydatif du muscle peut être augmenté par l'entraînement. D'autres (80, 70, 91, 127), admettent en outre, que l'augmentation du potentiel aérobie musculaire modifie le choix que le muscle opère au niveau de ses substrats, dans le sens où, pour une charge donnée, la part relative des lipides par rapport aux glucides, dans l'apport énergétique est augmentée. Ces modifications déterminent une moindre utilisation des stocks de glycogène et une diminution de la production du lactate qui se traduisent par une augmentation de l'endurance musculaire.

2.4.1.3 Réactions physiologiques au cours de l'exercice

Les figures 2.11 et 2.12 illustrent les modifications du système cardiorespiratoire en fonction de la charge de travail, chez 151 athlètes de haut niveau issus de 11 spécialités sportives différentes. Nous présentons ci-après les aspects qualitatifs de ces modifications.

Evolution de la consommation d'oxygène en fonction de la charge de l'exercice.

L'étude de la consommation d'oxygène pendant un exercice de charges progressivement croissantes nous permet de préciser, expérimentalement, l'évolution du métabolisme aérobie et de mieux définir le concept de VO_2 max.

La consommation d'oxygène (VO_2) montre, entre certaines limites liées à la capacité aérobie du sujet, une relation linéaire avec la charge de travail. Plus la charge développée est importante, plus la quantité d'oxygène consommé par unité de temps est élevée (figure 2.11).

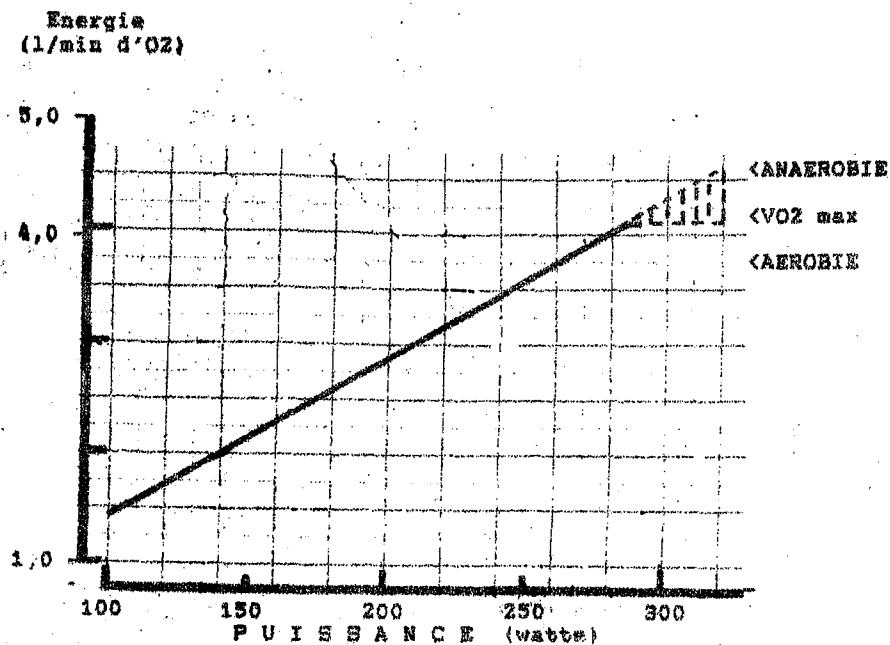
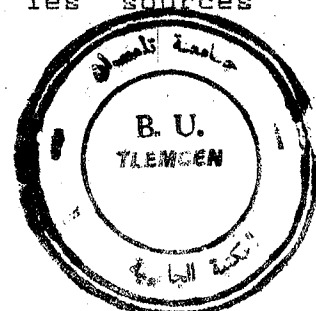


Figure 2.11: Evolution de la consommation d'oxygène en fonction de la charge. La consommation d'O₂ augmente d'une façon linéaire jusqu'à la puissance maximale aérobie (PMA). Au delà de la PMA, VO_2 n'augmente plus malgré l'augmentation de la charge. L'énergie requise supplémentaire est fournie par les sources anaérobies (partie hachurée de la figure).



CAPACITE AEROBIE

Les données expérimentales recueillies, pour des charges comprises entre 100 et 350 watts, chez l'ensemble des sportifs s'ajustent sur une fonction linéaire du type :

$$\begin{aligned} [1] \text{ VO}_2 \text{ (l/min)} &= 0,0145 \text{ P (watts)} + 0,015 \\ n &= 571, \text{ S}_{xy} = \pm 0,236 \text{ l/min, soit } \pm 6 \% \end{aligned}$$

Pour une charge donnée, l'analyse de la variance montre que la consommation d'oxygène est comparable chez l'ensemble des sujets ($p > 0,05$). L'allure de la courbe est identique quel que soit leur niveau de capacité aérobie. La variation interindividuelle moyenne de VO_2 , pour des charges comprises entre 100 et 250 W correspondant à 0,231 l/min, soit 5,7 % de la valeur moyenne. Cette observation constitue une donnée classique. Cependant, la pente de la droite diffère d'une étude à une autre, en fonction des modalités de déroulement de l'épreuve (7, 9, 125).

Pour des charges élevées, la consommation d'oxygène tend vers une valeur maximale, variable selon les individus, qui n'augmente plus, malgré une augmentation de la charge. Ce "plateau" constitue la consommation maximale d'oxygène (VO_2max); la charge correspondante est appelée puissance maximale aérobie (PMA). Ce plafonnement est une donnée classique; pour des charges supérieures à PMA, il est admis une plus grande participation du métabolisme anaérobie, permettant un supplément d'apport énergétique nécessaire au travail musculaire réalisé.

La relation entre la consommation maximale d'oxygène (VO_2max) et la puissance maximale aérobie (PMA) est également étroite. Elle est du type :

$$\begin{aligned} [2] \text{ VO}_2 \text{ max (l/min)} &= 0,0129 \text{ PMA (watts)} + 0,50 \\ n &= 151, \text{ S}_{xy} = \pm 0,210 \text{ l/min, soit } 5,1 \% \end{aligned}$$

Malgré leurs différences de pentes et d'ordonnées à l'origine, les équations [1] et [2] fournissent les mêmes estimations de VO_2 et de VO_2max pour des charges comprises entre 150 et 350 watts. C'est sur la base de ces équations qu'est conçue le nomogramme d'estimation de VO_2max .

Evolution de la consommation d'oxygène en fonction de la fréquence cardiaque.

La consommation d'oxygène augmente de façon linéaire avec la fréquence cardiaque. L'allure de la droite est fonction de la capacité aérobie du sujet. Les sujets qui ont la droite dont la pente est la plus inclinée présentent à la fin de l'épreuve maximale un VO_2max plus élevé (fig. 2.12), fournissent un travail plus important et sont par conséquent plus adaptés à un effort prolongé, puisqu'ils peuvent transporter une plus grande quantité d'oxygène pour une fréquence cardiaque donnée.

CAPACITE AEROBIE

Certains auteurs (158, 191), observent qu'au delà de 170 bpm, la fréquence cardiaque croît moins que ne le fait la consommation d'oxygène, et tend à plafonner. Selon d'autres, la relation resterait linéaire jusqu'à l'effort maximal, particulièrement chez les athlètes très entraînés (6). Dans la présente étude, le plafonnement de la fréquence cardiaque n'est pas observé. Les valeurs maximales de FC et de VO₂ sont atteintes pour un niveau voisin de puissance appelée puissance maximale aérobie.

Relation entre la fréquence cardiaque et VO₂ max.

Entre certaines limites, comprises, dans la présente étude, entre 107 ± 13 et 178 ± 12 bpm, la fréquence cardiaque augmente d'une manière proportionnelle à la charge développée. Au repos et en début d'effort (de 0 à 50 et parfois jusqu'à 100 watts), la fréquence cardiaque est moins dépendante des besoins énergétiques réels. Elle est influencée par les émotions et les modalités de réalisation de l'exercice (158).

La pente de la droite et l'ordonnée à l'origine sont caractéristiques de la capacité aérobie du sujet. Comme pour les courbes de VO₂-FC, les indices (pentes et ordonnées) les plus bas se retrouvent chez les sujets à VO₂ max élevé. Plus ces indices sont bas, plus VO₂ max et donc PMA sont élevés (fig.2.12).

L'évolution de la fréquence cardiaque pendant des exercices musculaires reste très controversée. Une grande partie des divergences résulte des modalités parfois très différentes des exercices ou des techniques de mesure. Certains auteurs admettent qu'il existe une limitation cardiaque au transport de l'oxygène.

Le principal argument invoqué est alors la tendance au plafonnement des paramètres cardiaques parfois observé au cours des exercices musculaires très intenses (68). Pour d'autres (6, 83), la fréquence cardiaque continue de croître proportionnellement à la consommation d'oxygène, même pour les valeurs les plus élevées, aucun fléchissement n'apparaît. Nos résultats ne montrent pas de fléchissement de la relation FC-VO₂, ni celle de FC-P. En effet, avec le protocole à accroissement continu de la charge, la fréquence cardiaque atteint sa "valeur maximale" simultanément avec la consommation d'oxygène, dès que le sujet atteint sa puissance maximale aérobie. Contrairement à la consommation d'oxygène, l'allure de la droite FC-P est fonction de VO₂ max et donc de PMA du sujet (fig. 2.12).

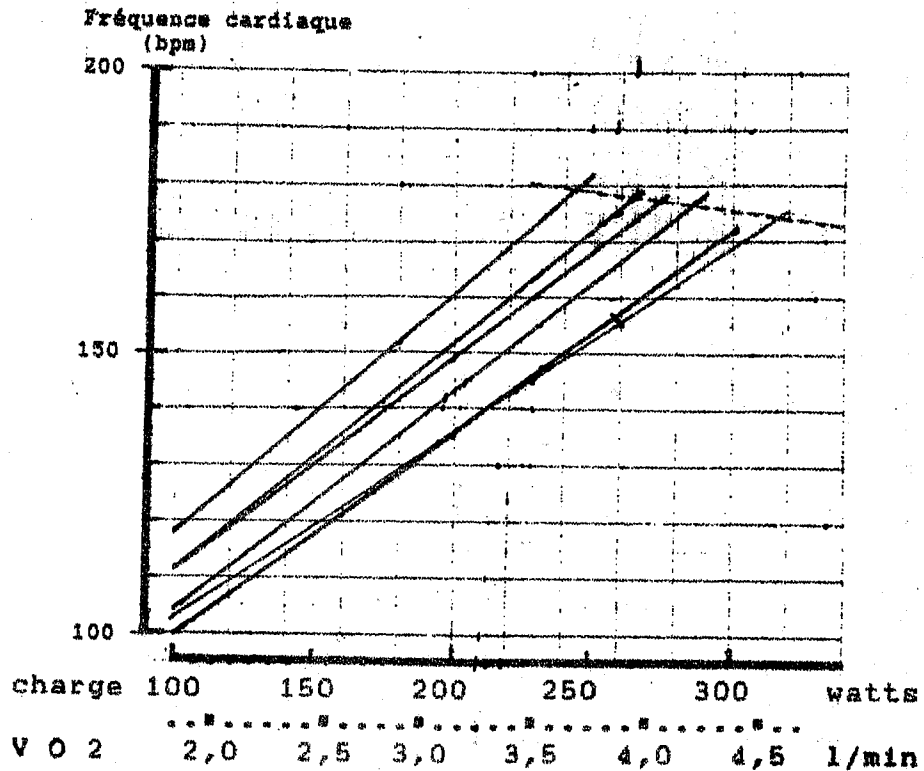


Figure 2.12: Relation entre la fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène et la charge de l'exercice pour différents niveaux de capacité aérobie. Cette figure montre que plus la pente de la droite est inclinée, plus la durée de l'épreuve est grande, et par conséquent VO₂ max et P.M.A élevés.

- Pour une charge donnée, plus la fréquence cardiaque du sujet est basse, plus sa consommation maximale d'oxygène est élevée. Le tableau 2.4, présentant l'évolution de la fréquence cardiaque en fonction de la charge chez les coureurs de différentes spécialités de courses, montre que pour une charge donnée, les coureurs de longues distances présentent les valeurs de FC basses et les valeurs de VO₂ max et de P.M.A élevées. C'est l'inverse qui est observé chez les coureurs de courtes distances.

Les coefficients de corrélation entre FC et VO₂ max, pour des charges comprises entre 100 et 250 watts sont significatifs ($p < 0,01$) et leurs degrés de signification voisins (tab. 2.5).

CAPACITE AEROBIE

- Pour une fréquence cardiaque donnée, plus la charge correspondante est élevée, plus VO₂ max du sujet est important. Les coefficients de corrélation entre VO₂ max et la charge à une fréquence cardiaque donnée, comprise entre 160 et 180 bpm, sont significatifs (p<0,01). Les degrés de signification de ces corrélations sont voisins (p>0,05).

A partir de ces observations, on en déduit que la capacité aérobie peut être appréciée, d'une manière équivalente, soit à partir de la charge extrapolée pour des fréquences cardiaques de 160, 170, et 180 bpm, soit à partir de la fréquence cardiaque extrapolée pour des charges de 150, 200, et 250 watts. Les coefficients de corrélation relevés entre la charge développée au niveau de ces zones de fréquences cardiaques et VO₂ max et ceux relevés entre la fréquence cardiaque atteinte pour des charges de 150, 200, 250 watts et VO₂ max sont voisins et de degré de signification de la corrélation élevé (p<0,01, tab. 2.5).

Les valeurs de PWC 170 (et de PWC 160, PWC 180) peuvent donc être utilisées comme indice du niveau de développement de la capacité aérobie ou bien exprimées en équivalent d'oxygène par minute grâce, pour la PWC 170, à l'équation suivante :

$$[3] \text{ VO}_2 \text{ max (ml/min)} = 0,96 \text{ PWC 170 (kgm/min)} + 2610, \\ \text{Sxy} = \pm 7,9 \%$$

Si PWC 170 est exprimée en watts et VO₂ max en l/min, l'équation [3] devient :

$$[4] \text{ VO}_2 \text{ max (l/min)} = 0,006 \text{ PWC 170 (watts)} + 2,61, \\ \text{Sxy} = \pm 7,9 \%$$

Chez les coureurs à pied, PWC 170 exprimée en kgm/kg.min est corrélée à la performance sur des distances comprises entre 800 et 10 000 mètres. Ce type de relation a été également observé par Heyters (85) pour des distances supérieures à 1000 mètres. La relation peut même, dans certains cas être meilleure que celle qui lie VO₂ max à la performance (41, 139). PWC 170 est par conséquent une épreuve qui permet d'apprécier la capacité d'un individu à réaliser un exercice musculaire prolongé. Certains auteurs (85) recommandent l'utilisation de cet indice avec son interprétation propre, plutôt que de l'employer pour obtenir de manière indirecte VO₂ max. En effet, l'utilisation des efforts sousmaximaux afin de prédire VO₂ max, par la relation qui lie la fréquence cardiaque et VO₂, entraîne une imprécision évaluée, d'après nos propres équations, à environ $\pm 8 \%$. Certains auteurs l'estiment à 15-20 % (62).

2.4.1.4 Influence de l'Age sur la fréquence cardiaque:

Cette étude a également permis de constater que l'âge influe d'une manière significative sur la fréquence cardiaque, quelle que soit la charge au niveau de laquelle elle est enregistrée (tableau 2.5).

Selon I. Astrand (2), pour une population homogène de même âge, la fréquence cardiaque maximale (FC max) est pratiquement la même. Elle correspond à $220 - \text{l'âge (années)}$ du sujet, elle est en moyenne de 200 ± 10 bpm chez un sujet de 20 ans, puis décroît progressivement lorsque l'âge augmente. Bien que cette formule d'Astrand soit très populaire, elle ne peut être généralisée. En effet, FC max dépend du mode et du type d'exercice effectué, de l'âge, de la capacité aérobie, mais surtout des conditions expérimentales dans lesquelles elle est enregistrée (21).

Dans la présente étude, les caractéristiques individuelles de la fréquence cardiaque maximale sont également observées. La fréquence cardiaque maximale décroît légèrement avec le niveau de capacité aérobie du sujet, et diminue plus nettement avec l'âge.

La relation observée entre FC max et l'âge, est du type :

$$[5] \text{ FC max (bpm)} = 196 - 0,77 \text{ Age (ans)}$$

$$n = 151, p < 0,01, S_{xy} = \pm 11 \text{ bpm, soit } \pm 6,3 \%$$

La relation observée entre la fréquence cardiaque et l'âge est plus étroite pour des charges submaximales (tab. 2.5), c'est-à-dire entre 150 et 250 watts ($p < 0,01$).

FC max est également liée à la puissance maximale aérobie ($p < 0,01$), la relation est négative. Pour un âge donné, plus FC max du sujet est basse, plus sa PMA est élevée. Cette relation, avec celle qui lie FC max à l'âge, fournit par la technique de régression partielle, la relation suivante :

$$[6] \text{ FC max (bpm)} = 200 - (0,021 \text{ PMA} + 0,72 \text{ Age})$$

$$n = 151, p < 0,01, S_{xy} = \pm 11 \text{ bpm, soit } \pm 6,2 \%$$

PMA est exprimée en watts, et l'âge en années.

2.4.2 ELABORATION ET VALIDATION D'EPREUVES DE MESURE DE VO₂ max EN LABORATOIRE

2.4.2.1 Validité d'une épreuve de mesure directe de VO₂ max

Un grand nombre d'études a été entrepris pour comparer différentes épreuves susceptibles de déterminer VO₂ max en laboratoire (3, 23, 157, 190).

De ces travaux, il découle que, quel que soit le protocole utilisé, la durée et l'intensité de l'exercice ne semblent pas influencer significativement les valeurs de la consommation maximale d'oxygène, pourvu qu'une fatigue excessive soit évitée et qu'un échauffement préalable suffisant soit effectué. Notons, toutefois, que la fréquence cardiaque est plus élevée, lorsque la durée de l'épreuve ergométrique est longue, même si la puissance mise en jeu est faible (23, 187, 197).

Il apparaît que c'est l'épreuve en paliers qui réalise les conditions idéales pour atteindre la consommation d'oxygène la plus élevée. Cette épreuve présente en effet différents avantages dont les principaux sont que l'intensité nécessaire à la mise en jeu de la totalité des processus aérobie n'est obtenue qu'après un échauffement progressif et que, cette intensité, n'est pas obligatoirement très importante. En outre, cette intensité n'est maintenue que pendant une courte période (1 à 3 min). Dans ces conditions, VO₂ max peut être déterminé sans épuisement préalable et sans production importante de lactate (6, 16).

Si l'épreuve classique à paliers croissants réalise les conditions idéales pour obtenir VO₂ max, elle a un inconvénient majeur: sa longue durée (supérieure à 20 min), ce qui réduit son champ d'application. Compte tenu de sa longue durée, il est très fréquent qu'une fatigue musculaire locale apparaisse lors de ce type d'épreuves entraînant l'interruption de l'épreuve avant que la consommation d'oxygène n'atteigne sa valeur maximale (187). Pour pallier ces inconvénients, nous avons élaboré une technique de mesure directe de VO₂ max à accroissement progressif et continu de la charge (5 watts/12 s). L'accroissement de la charge est conçu de manière à ce que la durée de l'épreuve se situe entre 6 et 12 min, soit deux à trois fois plus courte que l'épreuve classique.

La validité du nouveau protocole est vérifiée par rapport à la technique classique de Petit et al. (157), sur un même échantillon d'athlètes ayant réalisé, dans les mêmes conditions expérimentales, les deux épreuves dans un intervalle de temps d'une semaine. La comparaison des données recueillies à partir de deux protocoles, par le test t pairé, par l'ANOVA et par la corrélation simple, permet de montrer que l'épreuve

expérimentale fournit des valeurs de VO₂ max et de FCmax semblables à celles obtenues avec l'épreuve classique (tab. 2.8).

La puissance maximale aérobie (PMA), obtenue en fin de l'épreuve classique est, cependant, de 9 % supérieure à celle de l'épreuve expérimentale, soit une différence moyenne de 26 watts. La différence de PMA entre les deux épreuves est essentiellement liée aux modalités d'accroissement de la charge. En effet, comme généralement le dernier palier n'est pas toujours entièrement réalisé, l'épreuve entraîne une imprécision de la mesure de la charge maximale, de même ordre de grandeur que son taux d'accroissement d'un palier au suivant, soit 30 watts pour l'épreuve classique et 5 watts pour l'épreuve expérimentale. C'est cette différence dans l'imprécision de la mesure de la charge maximale qui semble justifier l'écart de PMA observé entre ces deux épreuves.

La reproductibilité de l'épreuve expérimentale est appréciée par la méthode test-retest, en mesurant à deux reprises dans un intervalle d'une semaine, avec le même protocole, les mêmes sujets et dans des conditions expérimentales similaires, VO₂ max, FC max et PMA (tab. 2.9). La comparaison des résultats ne montre pas de différence significative entre les deux séries de mesures, pour les trois paramètres étudiés ($p > 0,05$).

La similitude entre les valeurs de VO₂ max obtenues à partir de l'épreuve de Petit et al., et à partir de l'épreuve expérimentale, de même que la bonne reproductibilité de cette dernière, témoignent de la validité et de la fiabilité de l'épreuve à paliers très courts et autorisent son utilisation pour l'évaluation de VO₂ max.

2.4.2.2 Technique d'évaluation indirecte de VO₂ max

Les inconvénients liés à l'utilisation de la technique de mesure directe de VO₂ max, exposés précédemment et concernant principalement les ressources à mettre en oeuvre, ont suscité de nombreux auteurs à mettre au point des techniques moins contraignantes, moins coûteuses et applicables à de plus larges populations.

L'estimation de VO₂ max à partir des données obtenues lors d'épreuves indirectes sous-maximales ou maximales s'appuient généralement sur l'existence d'étroites relations entre VO₂ max et d'autres variables physiologiques, facilement mesurables. La littérature spécialisée offre une grande variété de tests basés sur ces principes (7, 9, 56, 120, 187).

CAPACITE AEROBIE

Les limites liées aux techniques de mesures indirectes (chapitre 2.2.), particulièrement lors de l'évaluation des athlètes de haut niveau, nous ont conduit à élaborer une nouvelle technique plus adaptée aux caractéristiques propres à nos populations sportives et à nos ressources. Les fondements théoriques de cette nouvelle technique sont présentés au paragraphe 2.4.1.3 .

La prédiction de VO_2 max à partir de la nouvelle technique est basée sur les interrelations observées entre VO_2 max, et d'autres variables plus aisément mesurables telles que la fréquence cardiaque et la charge de travail (tab. 2.5). Les données expérimentales, recueillies dans cette étude, nous ont permis d'établir des équations permettant d'estimer VO_2 max avec des erreurs standards satisfaisantes ($S_{xy} < 8\%$). La prédiction se base sur les relations enregistrées entre la consommation maximale d'oxygène et les aspects qualitatifs et quantitatifs des réactions cardiaques observées au paragraphe 2.4.1.3, illustrées par les équations [1] à [4].

La combinaison des relations N°2, 5 et 6 du même paragraphe a permis l'élaboration d'un nomogramme qui regroupe les principaux avantages des techniques rapportées par la littérature, exposés précédemment et limite, le plus possible, leurs inconvénients.

Le nomogramme proposé permet en effet, d'estimer VO_2 max à partir d'une épreuve sous-maximale, utilisant dans ce cas les relations enregistrées entre les variations de FC en fonction de la puissance et VO_2 max. Il permet aussi, d'estimer VO_2 max, à partir d'une épreuve maximale et, utilise la relation qui lie VO_2 max à la puissance maximale (équation [2], paragraphe 2.4.1.3).

Compte tenu de son influence sur la fréquence cardiaque (tab. 2.5 illustrée par l'équation [6] du paragraphe 2.4.1.4), l'âge est pris en considération en vue d'améliorer la précision de l'estimation de VO_2 max.

Les tests de validité et de reproductibilité de cette technique sont présentés au paragraphe 2.3.2.2. La bonne reproductibilité de l'épreuve à paliers très courts ainsi que celle des paramètres constituant le nomogramme, de même que les faibles erreurs standards de l'estimation de VO_2 max à partir de cette technique, autorisent à considérer l'épreuve à paliers très courts et le nomogramme qui l'accompagne comme une technique d'estimation de VO_2 max, fidèle et applicable dans de nombreuses circonstances et, notamment, lorsque les dispositifs de recueil et d'analyse des gaz respiratoires ne sont pas disponibles et/ou lorsque l'épreuve maximale n'est pas recommandée.

2.4.2.3 Limites de l'épreuve indirecte

Cette nouvelle technique de prédiction de VO₂ max, présente comme toutes les autres techniques similaires, certaines limites qui affectent la précision de l'estimation. Ces limites sont essentiellement liées aux imprécisions des méthodes d'estimation de la fréquence cardiaque maximale et aux variations intra et interindividuelles de la fréquence cardiaque.

Limites liées à la fréquence cardiaque

L'estimation de la fréquence cardiaque maximale théorique est l'expression d'une tendance générale mais qui doit être considérée avec beaucoup de prudence sur le plan individuel.

FC max mesurée dans des conditions rigoureusement identiques, peut varier, chez un même sujet, en fonction de la nature et de la durée de l'épreuve maximale (6, 127).

FC max est plus élevée sur le terrain qu'en laboratoire. Nous avons relevé une différence moyenne de 9% entre FC max du terrain enregistrée par télémétrie à l'entraînement et celle relevée lors d'un travail maximal réalisé sur bicyclette ergométrique, l'écart maximal est de 23 %. FC max enregistrée lors d'épreuves de compétition, chez des coureurs à pied, est en moyenne de 5% plus élevée que celle enregistrée lors d'un travail maximal réalisé sur tapis roulant; l'écart le plus élevé enregistré est de 8 %, correspondant à une différence de 15 bpm (21). Sur le terrain, à partir d'une certaine vitesse de course, FC max est plus influencée par la durée de l'épreuve que par sa vitesse (17).

FC présente une grande variabilité inter et intraindividuelle en fonction de la nature de l'épreuve, des modalités de l'accroissement de la charge et de la durée du travail. La linéarité entre la fréquence cardiaque et la puissance s'effectue dans certains cas dans des limites de puissance très restreintes. L'extrapolation à des valeurs extrêmes de fréquence cardiaque entraîne des valeurs imprécises de VO₂ max. Chez un même sujet, la fréquence cardiaque atteinte à une puissance de travail donnée, peut varier de ± 10 % d'une journée à l'autre (6), en fonction de l'état de forme du sujet et des conditions de réalisation de l'épreuve. Chez un même sujet et pour une même puissance, la fréquence cardiaque peut varier au cours d'une même journée.

Ces quelques facteurs entraînent des imprécisions lorsque la prédiction de VO₂ max s'effectue à partir de la fréquence cardiaque pour une charge donnée, à partir de la puissance pour une fréquence cardiaque donnée ou à partir de l'extrapolation

CAPACITE AEROBIE

linéaire de la fréquence cardiaque jusqu'à FC max théorique. Ces imprécisions peuvent être réduites si certaines conditions de réalisation de l'épreuve sont respectées. Il y a lieu également de respecter les modalités d'application des équations ou abaques de prédiction de VO₂ max. Le choix de ces derniers devra tenir compte de la population qui a servi à les établir.

Limites liées aux variations interindividuelles de VO₂

Pour la plupart des activités, le coût énergétique varie, pour une même puissance, d'un individu à l'autre en fonction de leur rendement. Selon le protocole élaboré, l'erreur standard moyenne de l'estimation de la consommation d'oxygène, pour des charges comprises entre 100 watts et la puissance maximale aérobie (285 ± 29 watts), est évaluée à 236 ml/min, soit 5,7 % pour un VO₂ max de 4,17 l/min. Le fait d'attribuer le même coût d'énergie à tous les sujets, pour une même puissance, surestime ou sous-estime donc systématiquement certains sujets. Ceci suppose, en effet, que le rendement mécanique est identique chez tous les sujets, ce qui n'est pas le cas, particulièrement chez les sujets éprouvant des difficultés de coordination, dans ce cas précis, ce type d'épreuves n'est pas recommandé.

L'estimation de VO₂ max à partir de la relation VO₂ - puissance entraîne pour un même individu, une erreur systématique acceptable. Ce test peut être utilisé pour comparer un individu à lui-même, c'est-à-dire suivre son évolution dans le temps.

La motivation et la collaboration du sujet influent sur la charge maximale, ce qui implique une surestimation de VO₂ max pour les sujets hautement motivés qui peuvent atteindre une charge plus élevée par des moyens anaérobies et une sous-estimation des sujets peu motivés, pouvant interrompre l'épreuve avant d'avoir atteint la puissance maximale aérobie.

Compte tenu du fait que, l'erreur standard de l'estimation de la consommation maximale d'oxygène, à partir de la puissance maximale, est réduite ($S_{xy} = \pm 5,7 \%$) par rapport à celle obtenue avec la fréquence cardiaque ($S_{xy} = \pm 10 \%$), l'estimation de VO₂ max, à partir de la relation VO₂-puissance, est plus précise et, de ce fait, plus recommandée aux sportifs.

2.4.3. VALIDITE DE LA COURSE DE 5 minutes POUR LA MESURE DE VO2 max CHEZ LE COUREUR A PIED

La validité de la course de durée de 5 minutes est testée par rapport à VO2 max, mesuré d'une manière directe en laboratoire. Les résultats de cette course seront ensuite corrélés à la performance sur différentes distances de course, en vue de juger leur valeur prédictive de la performance.

Habituellement le coût énergétique est obtenu en divisant VO2 requis en état stable pour une vitesse donnée. Lors de cette étude nous tenterons de comparer le coût énergétique obtenu de cette manière, avec le rapport VO2 max (ml/kg.min) mesuré en laboratoire, sur la vitesse moyenne (km/min) développée lors de l'épreuve de 5 min.

La corrélation calculée, pour l'ensemble des résultats, montre que plus la vitesse du coureur sur l'épreuve de 5 min est grande, plus son VO2 max est élevé (fig. 2.8). L'équation [1] du paragraphe 2.3.3 fournit la relation qui lie ces deux variables. Cette équation permet d'estimer VO2 max à partir de l'épreuve de course, avec une précision de $\pm 5,0 \%$, pour les vitesses comprises entre 16,5 et 22,7 km/h. L'équation [1] a été simplifiée et décomposée en deux équations du premier degré (équations [2] et [3]). Entre certaines limites, les équations [2] et [3] élaborées à partir des valeurs respectivement inférieures et supérieures à la médiane fournissent des prédictions similaires à la première (fig. 2.9).

L'équation [2] élaborée à partir des vitesses inférieures à la médiane et de leurs VO2 max correspondants, peut être utilisée pour estimer VO2 max chez les coureurs, pratiquant des spécialités de course inférieures ou égales à 400 m.

Pour les coureurs de distances supérieures ou égales à 800 mètres, développant généralement des vitesses de course supérieures ou égales à 20 km/h, l'équation [3] est plus indiquée. L'erreur type de l'estimation correspond dans les deux cas à 5,4 %.

Il est actuellement bien établi que les besoins énergétiques de la course sont étroitement liés à la vitesse. Une relation du type linéaire a été observée par différents auteurs, à partir des données issues d'épreuves sous-maximales réalisées sur tapis roulant (41, 122, 139). D'autres auteurs montrent que la linéarité de la relation VO2-vitesse n'est observée que pour une étendue de vitesses bien déterminée: entre 9,4 et 20,9 km/h pour Dill (57), entre 7,9 et 21,6 km/h pour Pugh (164), entre 10,8 et 15,6 km/h pour Mc Miken et Daniels (130).

CAPACITE AEROBIE

En étudiant le coût énergétique de la course sur piste, Pugh (164) a observé un aspect curvilinéaire de la relation VO_2 - vitesse, c'est-à-dire pour des vitesses élevées, il se produit une rupture de la linéarité de la relation. L'accroissement supplémentaire du coût énergétique pour des vitesses élevées est attribué, selon cet auteur, à une augmentation disproportionnée de la résistance de l'air et des changements probables de l'efficacité de la course.

Bien que dans la présente étude, la méthodologie adoptée soit différente de celle des études sus-citées, les données enregistrées font apparaître une similitude dans les aspects qualitatifs et quantitatifs de la relation VO_2 max-vitesse max avec ceux de la relation VO_2 -vitesse observée dans la littérature (15, 41, 139, 164). Si cette observation est confirmée pour d'autres populations, la relation VO_2 max-vitesse max, observée dans cette étude, serait analogue à la relation entre le coût énergétique et la vitesse de course rapportée par la littérature. La vitesse moyenne développée lors de l'épreuve de 5 min pourrait permettre l'estimation de la puissance maximale aérobie.

L'évolution du volume maximal d'oxygène, rapporté à la distance parcourue, lors de la course de 5 minutes, en fonction de la vitesse développée lors de cette épreuve, présente une allure parabolique (fig. 2.10). Pour une vitesse moyenne de course de $18,3 \pm 1,4$ km/h, ce volume est constant, égal à 184 ± 7 ml/kg.km, il est indépendant de la vitesse de course. Il est significativement plus élevé lorsque la vitesse de course est supérieure à 20,2 km/h, et il est lié à la vitesse de course ($p < 0,01$).

Pour des vitesses inférieures à 20,2 km/h, le volume maximal d'oxygène, exprimé en ml d' O_2 net est égal à 173 ± 8 ml/kg.km, il est comparable au coût énergétique de la course sur tapis roulant rapporté dans la littérature (tab.2.4.3). Cette similitude entre le rapport VO_2 max/vitesse max et VO_2 /vitesse laisse supposer que l'indice VO_2 max/vitesse max pourrait permettre, sous certaines réserves, une bonne approximation du coût énergétique de la course à pied. Si cette hypothèse est confirmée, l'accroissement du volume maximal d'oxygène par km, pour des vitesses élevées, serait expliqué par l'accroissement supplémentaire du coût énergétique lié à la résistance de l'air.

En aucun cas l'indice VO_2 max/vitesse max ne devrait, en l'état actuel de nos connaissances être interprété physiologiquement comme le rapport VO_2 /vitesse, c'est-à-dire le coût énergétique. Cependant, la similitude observée entre ces indices pourrait, si elle était confirmée par d'autres, représenter une approximation utile en raison de la simplicité de sa réalisation.

CAPACITE AEROBIE

L'analyse corrélationnelle montre que les athlètes possédant un VO₂ max élevé, réalisent de meilleures performances sur les distances comprises entre 800 et 10.000 m, que ceux dont VO₂ max est bas. Les relations qui lient VO₂ max aux performances sont plus étroites pour les spécialités de courses comprises entre 1500 et 5000 m. Les résultats de l'épreuve de cinq minutes fournissent des observations similaires à ceux de VO₂ max en ce qui concerne leurs liaisons avec ces performances. Plus les résultats de l'épreuve de 5 min sont élevés, meilleure est la performance sur ces distances. Les relations sont cependant plus étroites ($p < 0,01$), pour l'ensemble des spécialités de courses dont la distance est comprise entre 800 et 10.000 m. La précision de la prédiction de la performance, à partir de la vitesse de course est liée au fait que cette vitesse représente la résultante de 3 principaux facteurs (VO₂ max, économie de course et capacité anaérobie).

Les erreurs-types de l'estimation de la performance sur l'ensemble des distances comprises entre 800 et 10.000 m, sont plus faibles lorsque la prédiction est effectuée à partir de l'épreuve de 5 minutes (S_{xy} compris entre $\pm 1,8$ et $\pm 2,7\%$), qu'à partir de VO₂ max (S_{xy} compris entre $\pm 2,1$ et $\pm 3,2\%$), mais les écarts entre ces erreurs ne sont pas significatifs. Les performances sur les spécialités de courses comprises entre 800 et 10.000 m peuvent, de ce fait, être prédites d'une manière équivalente aussi bien à partir de VO₂ max qu'à partir de l'épreuve de 5 min. La précision de la prédiction de la performance, sur la distance de 800 m courue dans la spécialité, à partir de VO₂ max et à partir de l'épreuve de 5 min correspondent respectivement à $\pm 5,1$ et $\pm 4,3\%$. Au fur et à mesure de l'augmentation de la distance de course, la précision s'améliore pour atteindre, lors de la course de 3000 m, des précisions respectives de $\pm 2,3$ et $\pm 1,8\%$. A partir de 3000 m, l'erreur type de l'estimation augmente progressivement avec la distance du parcours. Ceci laisse supposer qu'au delà de 3000 m, d'autres facteurs métaboliques et/ou physiques interviennent dans la réalisation de la performance.

La vitesse de course sur l'épreuve de 5 min peut avoir plusieurs intérêts, parmi lesquels,

- l'estimation de VO₂ max des sprinters non entraînés aux efforts prolongés,
- l'expression de la puissance maximale aérobie en termes de vitesse,
- l'aide à la prescription d'un programme d'entraînement adapté à la capacité aérobie propre du coureur en pourcentage de sa puissance maximale,
- prédiction de la performance du coureur, avec une précision satisfaisante, sur les distances comprises entre 800 et 10.000 m.

2.5. CONCLUSION

L'intérêt porté à la mesure de la consommation maximale d'oxygène résulte, entre autres, de son importante influence sur la réalisation de la performance dans les disciplines qui requièrent un haut niveau de dépense énergétique, de son utilité pour de nombreuses autres disciplines, et de sa relation avec la condition physique. Cet intérêt est également lié au fait que la consommation d'oxygène constitue la première mesure de la dépense énergétique que l'on ait su calculer et interpréter.

Selon les objectifs envisagés, le niveau et type de pratique sportive et du matériel disponible, les techniques utilisées pour la mesure de VO_2 max varient, aussi bien par leur forme, leur intensité que par leur durée. La mesure peut être directe ou indirecte, maximale ou sous-maximale, réalisée au laboratoire ou sur le terrain. Différents types de techniques de mesure de VO_2 max sont mis au point et validés lors de cette étude. Leurs avantages et inconvénients, ainsi que ceux des techniques classiques sont présentés afin de fournir des éléments de choix permettant de sélectionner, parmi les épreuves proposées, celles qui répondent le mieux aux objectifs envisagés, aux populations concernées et au matériel disponible. Le degré de sophistication de l'appareillage disponible ne devrait pas influencer le choix de la technique à utiliser. La meilleure technique reste encore celle qu'on maîtrise le mieux.

En milieu médico-sportif, l'évaluation directe de VO_2 max n'est réalisée prioritairement et systématiquement que lors de phases bien déterminées du cycle annuel d'entraînement, et pour des populations sportives définies. Dans le cadre du contrôle approfondi, réalisé une à deux fois par saison sportive, l'évaluation directe de VO_2 max est recommandée pour les athlètes dont la pratique sportive requiert cette qualité. Le protocole doit être spécifique afin de mettre en jeu les masses musculaires sollicitées préférentiellement par la spécialité. Pourvu qu'une fatigue excessive soit évitée et qu'un échauffement préalable suffisant soit effectué, la durée et l'intensité de l'exercice ne semblent pas influencer significativement les mesures de VO_2 max.

Dans le cadre du contrôle continu, réalisé plusieurs fois par saison sportive, il n'est pas nécessaire que la mesure soit directe. Les épreuves indirectes maximales ou sous-maximales, réalisées au laboratoire ou sur le terrain, répondent parfaitement aux objectifs de ce type de contrôle. L'épreuve doit cependant, reproduire le geste sportif, et le même protocole répété pour les différents contrôles. Dans ce cas, les résultats enregistrés sont d'un grand intérêt, pour comparer le sujet à lui-même dans le temps.

CAPACITE AEROBIE

Certaines épreuves indirectes, telles la PWC 170 ou la course de 5 min utilisent les relations liant leurs indices à la dépense énergétique, pour estimer la consommation maximale d'oxygène. Compte tenu des imprécisions des résultats de ces estimations, il est recommandé d'utiliser ces indices avec leurs interprétations propres, plutôt que pour apprécier VO₂ max.

Si, pour de nombreuses activités sportives, les athlètes de différents niveaux, se distinguent essentiellement par leur capacité aérobie, les athlètes de haut niveau qui réussissent le mieux sont ceux qui, en plus d'une forte valeur de VO₂ max, possèdent d'autres qualités utiles, qu'il convient également d'évaluer telles que la capacité anaérobie, le seuil anaérobie, et les autres qualités biologiques, psychologiques etc..

Chapitre 3

Seuil anaérobie

- 3.1 INTRODUCTION
 - 3.1.1 HISTORIQUE
 - 3.1.2 INTERPRETATIONS BIOCHIMIQUES DU SEUIL ANAEROBIE
 - 3.1.3 LE SEUIL ANAEROBIE ET LA PERFORMANCE ATHLETIQUE
 - 3.1.4 TECHNIQUES D'EVALUATION DU SEUIL ANAEROBIE
 - 3.1.5 OBJECTIFS

- 3.2 MATERIEL ET METHODES
 - 3.2.1 POPULATION
 - 3.2.2 MATERIEL
 - 3.2.3 PROTOCOLES
 - 3.2.3.1 Détermination du seuil anaérobie
 - 3.2.3.2 Détermination du seuil ventilatoire

- 3.3 RESULTATS
 - 3.3.1 LACTATE SANGUIN ET FREQUENCE CARDIAQUE EN FONCTION DE LA CHARGE
 - Aspects de la courbe du lactate sanguin
 - Aspects de la courbe de fréquence cardiaque
 - Etude comparative entre coureurs
 - 3.3.2 PARAMETRES VENTILATOIRES ET METABOLIQUES EN FONCTION DE LA CHARGE

- 3.4. DISCUSSION
 - 3.4.1 ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODOLOGIE
 - 3.4.2 CINETIQUE DU LACTATE SANGUIN A L'EFFORT
 - 3.4.3 FC ET VO2 AU SEUIL ANAEROBIE
 - 3.4.4 ALLURE DE LA COURBE DE FC ET LE SEUIL ANAEROBIE
 - 3.4.5 ALLURE DU DEBIT VENTILATOIRE ET LE SEUIL ANAEROBIE
 - 3.4.6 TAMPONNEMENT DE L'ACIDE LACTIQUE ET VCO2
 - 2.4.7 RELATION ENTRE LE SEUIL ANAEROBIE ET LE SV

- 3.5. ETUDE CRITIQUE DU SEUIL ANAEROBIE

Seuil anaérobie

3.1 INTRODUCTION

3.1.1 HISTORIQUE

Au début de ce siècle, Hill et al. (87, 88), ont constaté qu'un travail pouvait être réalisé sans apparition de quantités importantes du lactate dans le sang, par rapport à l'état de repos. En 1930, Owles (151) était le premier à établir ce qu'il appelait un niveau métabolique critique, désigné plus tard comme le "point d'Owles" au-dessus duquel un accroissement du lactate sanguin apparaît, ainsi qu'une baisse du bicarbonate plasmatique, considérant ce point comme un début d'acidose métabolique due à l'exercice.

Le concept du seuil anaérobie est probablement imputable à Margaria et al. (134), qui n'observèrent aucune apparition d'acide lactique dans le sang, jusqu'à environ 60 % de $\dot{V}O_2$ max. Au delà de cette intensité du travail, la lactatémie augmente dans le sang.

Remarquant un changement simultané de la concentration du lactate sanguin et de la ventilation, Hollman (89) définit alors ce point comme "point d'efficacité ventilatoire optimale" qu'il identifie à celui de "la limite de la performance aérobie".

A partir de ces travaux et, compte tenu, d'une part, de l'indisponibilité, à l'époque des techniques de microdosages du lactate sanguin et, d'autre part, de l'étroite similitude de l'aspect des courbes de la lactacidémie et de la ventilation, l'utilisation des paramètres ventilatoires est de plus en plus répandue.

Wasserman et Mc Ilroy (195) ont introduit la notion de "seuil anaérobie", associant aussi les variables ventilatoires et la lactacidémie. Ils définissent le seuil anaérobie comme étant la charge maximale pouvant être maintenue par un sujet, par la seule utilisation de l'énergie aérobie. Le terme "anaérobie" est lié à la carence relative en oxygène au niveau musculaire et "seuil" à la charge au niveau de laquelle ce phénomène est observé. Ces auteurs ont élaboré le concept suivant lequel les échanges gazeux pulmonaires au niveau des voies aériennes supérieures pouvaient être utilisés pour détecter le début de l'acidose métabolique, c'est à dire le seuil anaérobie.

SEUIL ANAEROBIE

Lors d'une étude ultérieure, Mader (131) a montré que, lors d'une épreuve à charge progressivement croissante, la charge la plus élevée pour laquelle l'accumulation du lactate ne survient pas, coïncide approximativement à un taux de lactate sanguin de 4,0 mmol/l. Lors de cette étude, Mader identifie un seuil aérobie (2 mmol/l) et un seuil anaérobie (4 mmol/l), séparés par une zone de transition aéro-anaérobie.

L'usage de la méthode de détermination du seuil anaérobie s'est bien développé en milieu sportif depuis l'amélioration des possibilités de mesure rapide et précise du lactate sanguin, grâce aux microméthodes de dosages. Malgré ce net progrès de la technologie, il faut relever néanmoins que ces nouvelles techniques impliquent un minimum de cinq prélèvements sanguins pendant l'exercice, pour réaliser une courbe de lactate et détecter l'assaut de la courbe. Bien que les microprélèvements sanguins soient tout à fait supportables, cette méthode demeure désagréable et contraignante, particulièrement lorsque le mode de travail tel qu'effectué sur tapis roulant, par exemple, ne permet pas de réaliser des prélèvements sanguins aisés et systématiques.

Pour éviter ces inconvénients, des méthodes alternatives, non invasives, sont actuellement de plus en plus utilisées.

Parmi ces méthodes, celle de Wasserman et Mac Ilroy (195) se fonde sur le fait que les points d'inflexion de la courbe du débit ventilatoire et de la production de gaz carbonique en fonction de la consommation d'oxygène (seuil ventilatoire), sont étroitement liés aux points d'accroissement du lactate sanguin. En fait, la ventilation pendant le test progressif augmente d'une manière linéaire avec la charge, jusqu'à un point au-dessus duquel l'accroissement ventilatoire devient plus accentué et disproportionné par rapport au besoin de l'organisme en oxygène. D'après ces auteurs, cette hyperventilation est liée au fait que la production accrue de CO₂ et la baisse du pH consécutives à l'accumulation de l'acide lactique au-dessus du seuil, stimulent de façon marquée les mécanismes de contrôles de la ventilation.

Cette méthode, ainsi que celle proposée par Mader (131), sont des tests de laboratoire; donc, d'accès difficile pour une large population d'athlètes. De plus, l'application pratique des résultats sur le terrain, est limitée.

Pour ces raisons, des méthodes de terrain sont proposées. Celle préconisée par Conconi et al. (35) se fonde sur la perte de la linéarité de la relation entre la fréquence cardiaque et la charge de travail. En effet, ces auteurs ont montré que le point d'inflexion, c'est-à-dire le point où se perd la linéarité de la courbe de fréquence cardiaque, était étroitement lié au seuil anaérobie.

3.1.2 INTERPRETATIONS BIOCHIMIQUES DU SEUIL ANAEROBIE

Si l'intérêt de la mesure du seuil anaérobie, attire l'intérêt de la plupart des physiologistes de l'exercice, en revanche, l'unanimité n'est pas obtenue quant à son interprétation biochimique.

Certains auteurs n'admettent pas le terme "anaérobie" du fait qu'il soit démontré que le muscle produise de l'acide lactique même en aérobose.

De la même façon, le terme de seuil est contesté parce que selon certains auteurs (24, 201), il n'existe pas, au cours d'une épreuve progressive, un point identifiable de façon non équivoque, à partir duquel débute la production de lactate. En effet, celui-ci serait en réalité produit par les fibres musculaires dès les premières phases du travail et, seul un déséquilibre du processus de son extraction, permettrait son accumulation dans le sang. Cette dernière, s'effectue, de surcroît, d'une manière exponentielle, d'où les difficultés d'identification du point d'inflexion de la courbe de lactate.

Actuellement, on suppose que cinq mécanismes au moins, sont impliqués :

- Une première théorie suggère qu'un déficit de distribution locale en oxygène est à l'origine de l'intervention de la glycolyse anaérobie et par conséquent de l'accumulation de lactate. En d'autres termes, on pense que l'apport global en oxygène aux muscles est adéquat, comme le montre les mesures de PO₂ veineuse. Il faudrait vérifier s'il existe une hétérogénéité dans la diffusion intramusculaire de l'O₂; certaines fibres musculaires seraient hyper et d'autres hypoperfusées. Une telle hypothèse est confortée par le fait que, dans les situations expérimentales de carence en oxygène, par carboxyhémoglobine par exemple, on a observé aussi une réduction du seuil anaérobie.

Une étude de Wasserman et al. (194) a montré que l'augmentation initiale du pyruvate suivie de l'augmentation du lactate, apparaît même pour des charges sous-maximales, tandis que pour des charges situées au SA ou au-dessus, le facteur le plus important dans la limitation de l'oxydation du pyruvate réside dans la diminution des capacités d'oxydo-réduction mitochondriales liée au mécanisme de "navette" (glycérophosphate et malate aspartate) du NADH.

- Une deuxième hypothèse suggère qu'une limite à l'utilisation de l'O₂ (l'apport d'O₂ étant suffisant) est localisée au niveau du patrimoine enzymatique mitochondrial. On admet ainsi que l'incapacité du système aérobie à métaboliser le

3.1.3 LE SEUIL ANAEROBIE ET LA PERFORMANCE SPORTIVE

Bien que des incertitudes persistent quant aux mécanismes biologiques responsables de l'augmentation de la lactacidémie, il est en revanche bien admis, que la performance sportive dans les épreuves de longues durées est étroitement liée à l'aptitude du sujet à utiliser un pourcentage élevé de son VO₂ max. La performance sportive est donc liée non seulement à VO₂ max (chap. 2.), mais aussi, à la fraction de son utilisation, c'est à dire au seuil anaérobie (66, 115, 184).

Il convient de souligner que le but que visaient les physiologistes dans l'évaluation du seuil anaérobie, était d'identifier un facteur prédictif de la performance dans les sports de longues durées. En effet, les nombreux travaux réalisés dans ce domaine ont permis de montrer que le SA est mieux corrélé à la performance que ne le sont VO₂ max, les fibres musculaires lentes, l'économie de course, etc..

Le SA reflète la capacité d'un sujet à soutenir un exercice physique prolongé, à un haut pourcentage de sa PMA (51). A VO₂ max égal, les meilleurs coureurs de longues distances sont ceux qui disposent d'un SA significativement plus élevé (39, 127). Chez les coureurs de fond, le SA est étroitement lié à la performance (66, 115, 176). Le SA peut de ce fait permettre d'apprécier le niveau de performance, particulièrement chez les coureurs pratiquant des distances supérieures ou égales à 800 mètres (1, 46, 66, 108, 162). Plus généralement, le SA est un paramètre utile à mesurer chez les athlètes pratiquant des épreuves cycliques de longue durée telles que les courses de demi-fond et de fond, l'aviron, et le cyclisme.

Un autre aspect, qui accentue l'intérêt de la mesure du SA réside dans la possibilité de l'améliorer d'une manière significative par le biais de l'entraînement. Davis et al. (51) ont observé, chez des jeunes sujets sédentaires ayant subi un entraînement de 9 semaines, une amélioration du SA de 44%, alors que celle de VO₂ max n'était que de 25%. Par ailleurs, il est connu que les athlètes ont, en général, un seuil anaérobie (d'environ 80 % de VO₂ max) significativement plus élevé que celui des sujets sédentaires (50 à 60 %).

Ainsi, le rôle fondamental joué par le SA dans les épreuves de longues durées, apparaît nettement.

SEUIL ANAEROBIE

pyruvate provenant de la glycolyse anaérobie, détermine l'accumulation de l'acide lactique. A l'appui de ceci Holloszy et Coyle (92), ont montré que l'entraînement porte sur une augmentation du nombre et de la taille des mitochondries. Une telle hypothèse n'explique pas pourquoi la baisse aigue de Hb entraîne une baisse du SA, alors qu'on pourrait penser qu'une hypovolémie marquée, puisse réduire le niveau d'O₂ périphérique en dessous du seuil de la capacité d'utilisation mitochondriale.

- Une troisième hypothèse propose qu'à la base de l'accumulation rapide du lactate, on ait une diversification des fibres musculaires impliquées dans le type d'épreuve (31). Pour les charges de travail sous-maximales, le sujet utiliserait préférentiellement les fibres lentes, tandis qu'avec l'augmentation de la charge, celles-ci ne seraient plus suffisantes pour développer la puissance prescrite. Ainsi interviendraient les fibres rapides qui, plus riches en enzymes de la glycolyse anaérobie, et plus pauvres en mitochondries, utiliseraient de façon plus intense le métabolisme glycolytique avec formation de lactate. Selon d'autres auteurs (149), c'est la formation du lactate avec l'acidose qui en découle, qui entraîne l'altération des mécanismes d'excitation-contraction musculaires des fibres. Ceci réduirait la capacité de tension de chaque fibre isolée et impliquerait ainsi un recrutement des fibres rapides elles-mêmes, pour garantir le niveau de puissance requis.

- Selon Brooks (24), il est impropre de parler de seuil anaérobie, parce que l'accumulation du lactate ne serait pas déterminée par un passage imprévu du métabolisme aérobie à l'anaérobie, mais d'un déséquilibre entre la production et l'élimination du lactate. Celle-ci diminuerait, notamment au niveau hépatique, lors de l'augmentation de la charge à cause de la vasoconstriction splanchnique liée à l'effort.

- Une dernière hypothèse concerne l'influence des substrats métaboliques sur le seuil anaérobie. Selon Hughes et al. (95), la disponibilité majeure ou mineure en acides gras libres est en mesure de modifier le niveau du SA. Ces auteurs ont montré, en effet, qu'un repas riche en acides gras libres, entraînait une augmentation du SA.

Ainsi, malgré le grand intérêt suscité par ce problème et les nombreux travaux réalisés sur le sujet, de larges zones d'ombre subsistent, que les recherches ultérieures, notamment avec la résonance magnétique nucléaire devront développer.

3.1.4 TECHNIQUES D'EVALUATION DU SEUIL ANAEROBIE

Le SA peut être évalué, de façon relativement précise, en mesurant la puissance (mécanique ou métabolique) la plus élevée que le sujet puisse maintenir pendant un temps prolongé. Cette méthode consiste à soumettre le sujet à plusieurs épreuves à charge constante, différente d'une épreuve à l'autre, de durées minimales de 30 minutes (89). Au cours de chaque épreuve la lactacidémie est mesurée, périodiquement, afin d'identifier la charge pour laquelle le lactate atteint une valeur constante, la plus élevée possible.

Une telle technique est en fait peu pratique car elle requiert une série d'essais avant de définir la valeur correcte du SA. Compte tenu des contraintes qu'elle occasionne au sujet et à l'opérateur, et du coût de dosages des nombreux échantillons sanguins, cette technique ne peut être retenue.

Aussi, les physiologistes ont cherché à mettre au point des méthodes qui, au terme d'un seul test, puissent identifier la valeur du SA. Les épreuves proposées sont généralement fondées sur une épreuve à charge progressivement croissante, amenant le plus souvent, l'athlète à sa PMA.

Lors de ce type d'épreuve, les auteurs (52, 54, 103, 131, 197) ont cherché à faire apparaître les variations de divers paramètres ventilatoires et métaboliques au niveau du SA. D'autres auteurs ont proposé des tests plus simples comme celui de Conconi et al. (35) fondé sur le rapport fréquence cardiaque - vitesse, ou celui de Moritani et al. (146), ou de Mognoni (47) fondés sur le relevé de la durée de trois tests réalisés respectivement à puissance mécanique constante et à vitesse constante.

Le seuil anaérobie peut donc être déterminé, lors d'une épreuve à charge progressive, de plusieurs façons :

1- par l'augmentation de la concentration sanguine d'acide lactique (131),

2- par une augmentation de la concentration d'ions hydrogène correspondant à une diminution du pH sanguin et de la concentration de bicarbonate,

3- par une augmentation du quotient respiratoire due à la libération d'un excès de CO₂,

4- par la déviation de la linéarité de la relation (VE-VO₂) causée par l'important stimulus ventilatoire que constitue cet excès de CO₂ (100, 195, 197).

SEUIL ANAEROBIE

Ces différentes méthodes d'identification du seuil anaérobie font appel à différentes techniques. Les deux premières nécessitent des prélèvements de sang veineux, la troisième méthode, non invasive, nécessite l'analyse presque instantanée du quotient d'échanges gazeux. Dans la quatrième méthode, il suffit de suivre l'évolution du débit ventilatoire en fonction de l'intensité de l'exercice. On identifie le seuil anaérobie comme correspondant au point où la relation entre VE et VO₂ (ou la charge de travail) perd sa linéarité. C'est à ce niveau que l'acide lactique s'accumule et que surviennent les variations de la concentration de bicarbonate, de pH et du quotient respiratoire (52, 196).

3.1.5 OBJECTIFS

Etant donné la complexité théorique de la question, la très large diffusion des techniques d'évaluation du seuil anaérobie et les limites des connaissances actuelles, nous avons choisi de d'exposer, dans ce chapitre, séparément les méthodes de mesures invasive et non invasive du seuil anaérobie.

Sur la base de résultats expérimentaux, nous tenterons d'analyser chacune des deux méthodes, méthode invasive de Mader et al. (131), et méthodes non invasives de Wasserman et Mac Ilroy (195), de Conconi et al. (35), de Moritani et al. (145) et de Mognoni (47).

En fin de chapitre, sur la base d'une interprétation physiologique du seuil anaérobie, nous avons tenté de mettre en évidence les limites de telles techniques.

3.2. MATERIEL ET METHODES

Le matériel et les méthodes utilisés pour l'étude du seuil anaérobie diffèrent principalement de ceux utilisés pour le seuil ventilatoire, par la population et les variables.

3.2.1 POPULATION

L'étude du seuil anaérobie est réalisée avec la collaboration de 15 coureurs à pied, de sexe masculin. Il s'agit de 7 coureurs de demi-fond (pratiquant des distances comprises entre 800 et 5000 m) et de 8 coureurs de fond (de distances supérieures à 5000 mètres), appartenant à une association sportive de performance. Les caractéristiques morphologiques et VO₂ max de ces coureurs sont présentés au tableau 3.1.

Tableau 3.1: caractéristiques morphologiques et VO₂ max des coureurs étudiés.

	âge ans	poids kg	taille cm	VO ₂ max ml/kg.min
coureurs de demi-fond (n=7)	27,4 ±2,8	58,6 ±2,1	170 ± 4	69,0 ±5,4
coureurs de fond (n=8)	27,4 ±3,3	63,2 ±4,4	174 ± 6	72,0 ±4,7

Pour l'étude du seuil ventilatoire, nous avons examiné, 74 athlètes, de sexe masculin, appartenant à 5 disciplines sportives. Ces athlètes, âgés de 25,9 ± 5,4 ans, appartiennent à l'élite sportive algérienne. Les effectifs, les valeurs moyennes de l'âge, du poids et de VO₂ max des athlètes par discipline sportive figurent au tableau 3.2.

Tableau 3.2: Effectifs et valeurs moyennes de l'âge, du poids et de VO₂ max des athlètes étudiés

	âge ans	poids kg	VO ₂ max ml/kg.min
Footballeurs (n=18)	28,0 ± 4,4	74,0 ± 6,6	60,0 ± 5,8
Coureurs (n=27)	26,3 ± 6,2	61,5 ± 4,7	70,0 ± 6,3
Volleyeurs (n=18)	24,5 ± 4,7	76,4 ± 4,7	50,9 ± 3,5
Judokas (n= 5)	22,0 ± 3,7	66,5 ± 4,1	59,4 ± 6,7
Nageurs (n= 6)	17,4 ± 1,3	60,3 ± 5,1	63,6 ± 4,7

3.2.2 MATERIEL

Le matériel utilisé pour la réalisation de cette étude comprend une bicyclette ergométrique à freinage électromagnétique, un dispositif d'enregistrement continu de la fréquence cardiaque, un dispositif d'analyse automatique et continue de la consommation d'oxygène et un appareil d'analyse du lactate sanguin.

Les caractéristiques techniques de ce matériel sont présentées en annexe.

3.2.3 PROTOCOLES

Le seuil anaérobie est déterminé lors d'une épreuve à accroissement progressif de la charge, à partir de la courbe illustrant la concentration sanguine d'acide lactique en fonction de la charge (131),

Le seuil ventilatoire est identifié lors d'une épreuve similaire à la précédente, à partir de la déviation de la linéarité des relations entre les variables respiratoires et VO_2 et/ou entre ces variables et la charge de travail (100, 193, 195).

La première méthode nécessite une série de prélèvements de sang veineux. Le seuil anaérobie correspond à la charge de travail correspondant à une concentration sanguine du lactate de 4mmol/l.

La deuxième méthode, non invasive, nécessite la mesure presque instantanée des variables respiratoires et métaboliques et le suivi de l'évolution de ces variables en fonction de la charge de travail. Le seuil ventilatoire correspond au point à partir duquel la relation entre VE et VO_2 (ou entre VE et la charge) perd sa linéarité.

3.2.3.1 Détermination du seuil anaérobie

Dans cette étude, le critère de seuil anaérobie retenu est celui de Mader (131), correspondant à la charge de travail qui induit dans le sang une concentration de lactate de 4 mmol/l. Il s'agit d'une valeur empirique de la charge, au dessus de laquelle la production du lactate sanguin augmente brusquement et dépasse son élimination.

Le seuil anaérobie est déterminé à partir d'une épreuve maximale à accroissement progressif de la charge, décrite au paragraphe 2.2.4.2, durant laquelle sont enregistrés les paramètres suivants :

SEUIL ANAEROBIE

- la concentration sanguine de l'acide lactique, mesurée à partir d'échantillons sanguins, prélevés au niveau du lobe de l'oreille à l'aide de microcapillaires de 20 μ l. Cinq à six échantillons sanguins sont prélevés à intervalles de deux minutes, soit à 100, 150, 200, 250, 300 watts et à la fin de l'épreuve. La durée moyenne des prélèvements est d'environ cinq secondes,

- la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène sont mesurées d'une manière continue, sous forme graphique, grâce à un ergospiromètre SIRESGNOST FD 88 (Siemens).

La courbe illustrant la cinétique du lactate en fonction de la charge (fig. 3.1) est dessinée, et on cherche le point correspondant à la valeur de 4 mmol/l, à partir duquel on abaisse une perpendiculaire à l'axe des abscisses. Les intersections de cette perpendiculaire avec les courbes de fréquence cardiaque (FC), de la consommation d'oxygène (VO₂), et de l'axe des abscisses déterminent respectivement FC, VO₂ et charge correspondant au SA.

Le SA est également exprimé en termes de pourcentages de la puissance maximale aérobie (% PMA), de VO₂ max (% VO₂ max), et de FC max (% FC max).

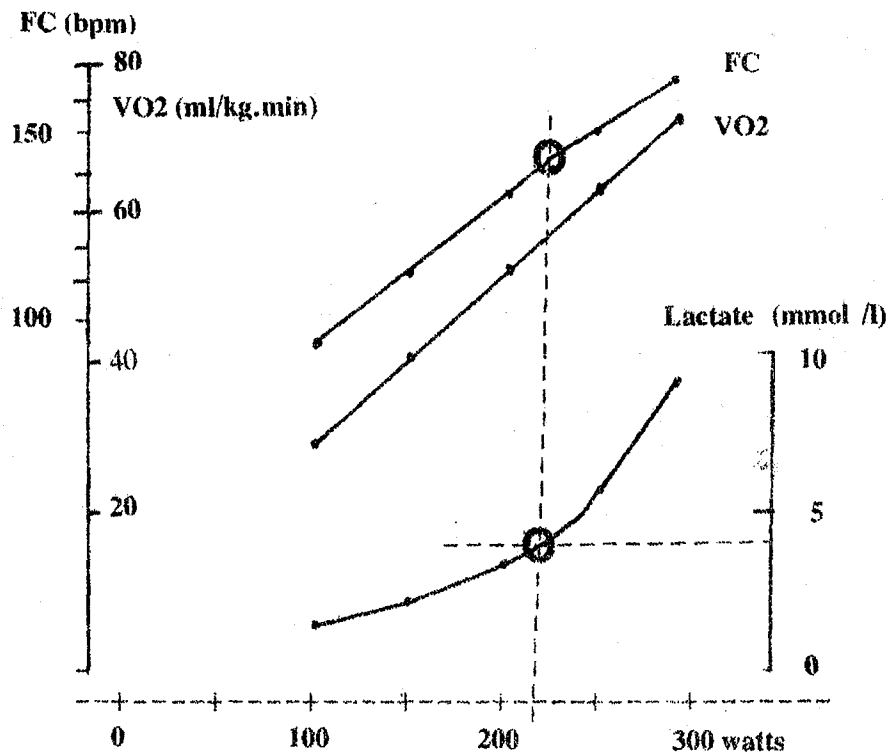


Figure 3.1 : Evolution de la fréquence cardiaque (FC), de la consommation d'oxygène (VO₂) et du lactate sanguin en fonction de la charge du travail. Le point de cassure de la courbe du lactate (encerclé) correspond au seuil anaérobie.

3.2.3.2 Détermination du seuil ventilatoire :

Le seuil ventilatoire est déterminé à partir d'une épreuve maximale dont le protocole est similaire à celui de l'épreuve qui a servi à l'étude du SA.

Lors de cette épreuve, sont recueillis, en continu sous forme graphique, la consommation d'oxygène (VO_2), le rejet de CO_2 (VCO_2), le débit ventilatoire (VE), et la fréquence respiratoire (FR).

A partir de ces variables, différents indices sont calculés parmi lesquels :

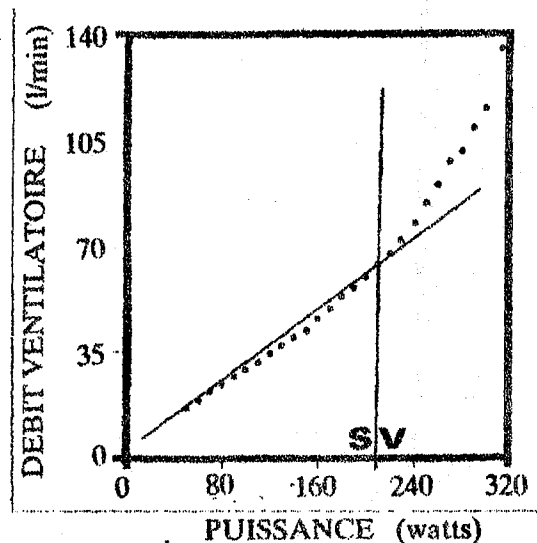
- l'équivalent respiratoire d' O_2 , correspondant au nombre de litres d'air ventilés pour consommer un litre d' O_2 (VE/VO_2). Ce rapport caractérise l'efficacité des échanges ventilatoires pour l'oxygène,
- l'équivalent respiratoire de CO_2 , correspondant au nombre de litres d'air ventilés pour évacuer dans l'air ambiant un litre de CO_2 (VE/VCO_2),
- le quotient respiratoire (QR), correspondant au rapport VCO_2/VO_2 ,
- le volume courant (VC), obtenu en divisant le débit ventilatoire par la fréquence respiratoire ($VC = VE/FR$).

Compte tenu du nombre élevé de points à exploiter par graphique (100 par variable et par sujet), un sondage aléatoire au 1/5e a permis de retenir 14 sujets, aux caractéristiques biométriques et aptitudes physiques voisines, pour analyser plus finement, l'aspect qualitatif des courbes des différentes variables en fonction de la charge.

Le seuil ventilatoire est déterminé à partir de la courbe du débit ventilatoire exprimé en fonction de la charge. Il représente la charge correspondant au point de rupture de la linéarité de VE (fig. 3.2). Sont également recherchés les points d'inflexion des courbes de VCO_2 , FR , du QR , du volume courant et des rapports VE/VO_2 et VE/VCO_2 , exprimées en fonction de la charge.

figure 3.2 :

Détermination graphique
du seuil ventilatoire



3.3. RESULTATS

3.3.1 LACTATE SANGUIN ET FREQUENCE CARDIAQUE EN FONCTION DE LA CHARGE

Les résultats présentés aux tableaux 3.3, 3.4 et 3.5, illustrés par les figures 3.1 et 3.3, font apparaître les observations suivantes:

La concentration sanguine du lactate est faible en début de l'épreuve ($1,4 \pm 0,6$ mmol/l à 34% de la PMA), puis augmente linéairement et légèrement en fonction de la charge pour atteindre $2,1 \pm 0,9$ et $3,3 \pm 1,6$ mmol/l respectivement à 51 et 68% de PMA. A partir d'une charge de travail comprise entre 200 et 250 watts (68 et 85 % de PMA), il se produit une rupture de la linéarité de la courbe de lactate sanguin qui prend une allure curvilinéaire.

La valeur de 4 mmol/l de lactate est observée pour une charge moyenne de 226 ± 42 watts correspondant à une utilisation moyenne de 79 ± 8 % de VO2 max.

Le lactate sanguin atteint leurs valeurs maximales ($9,3 \pm 2,2$ mmol/l) en fin d'épreuve, soit à 295 ± 34 watts.

La fréquence cardiaque moyenne augmente d'une manière linéaire en fonction de la charge de travail. Cette linéarité est constante jusqu'à la fin de l'épreuve avec, cependant, une légère inflexion des courbes. Le point d'inflexion de la courbe de fréquence cardiaque n'est pas observé chez tous les sujets. Pour les sept sujets, appartenant aux deux groupes présentant un point d'inflexion, une relation significative ($p < 0,05$) est observée entre ce point, exprimé en watts, et le SA exprimé en watts. Chez ces sujets, il n'existe pas de différence significative, entre la charge moyenne correspondant au point d'inflexion de la courbe de fréquence cardiaque (248 ± 44 watts) et celle correspondant au SA (223 ± 61 watts).

Tableau 3.3: fréquence cardiaque et lactate sanguin en fonction de la charge, chez des coureurs à pied.

C H A R G E		F C	Lactate
watts	% PMA	bpm	mmol/l
100	34 ± 4	91 ± 10	$1,4 \pm 0,6$
150	51 ± 6	112 ± 11	$2,1 \pm 0,9$
200	68 ± 8	133 ± 14	$3,3 \pm 1,6$
250	85 ± 10	151 ± 15	$5,7 \pm 3,0$
295 ± 34	100%	165 ± 11	$9,3 \pm 2,2$
SA"FC"	141 ± 16 bpm	86 ± 9 % FC max	
SA"VO2"	$55,7 \pm 7,7$ ml/kg.min	79 ± 8 % VO2 max	

SA"FC": FC correspondant au SA exprimé en bpm et en % FCmax
 SA"VO2": VO2 correspondant au SA (ml/kg.min, % VO2 max)

Comparaison entre coureurs de demi-fond et coureurs de fond

Les résultats présentés au tableau 3.4 et illustrés par la figure 3.3, font apparaître un déplacement vers la droite des courbes du lactate sanguin et de la fréquence cardiaque en fonction de la charge de travail, chez les coureurs de fond par rapport à celles des coureurs de demi-fond :

- la rupture de la linéarité initiale du lactate sanguin est réalisée à une charge moindre ($p < 0,05$) chez les coureurs de demi-fond que chez les coureurs de fond,

- les coureurs de fond présentent à tous les niveaux de charge, un taux de lactate sanguin plus bas que celui des coureurs de demi-fond ($p < 0,05$). La différence n'est pas significative, à tous les paliers, entre ces deux groupes pour la fréquence cardiaque ($p > 0,05$),

- un taux donné de lactate sanguin correspond, chez les coureurs de fond, à des niveaux de puissance, de VO_2 , et de fréquence cardiaque plus élevés que ceux des coureurs de demi-fond ($p < 0,05$). Par exemple, la valeur de 4 mmol/l de lactate correspond, respectivement chez les coureurs de demi-fond et chez les coureurs de fond, à une utilisation moyenne de 75 ± 5 et 84 ± 6 % de VO_2 max (tab. 3.5), et à des fréquences cardiaques moyennes de 133 ± 16 et 151 ± 9 bpm.

Tableau 3.4: valeurs moyennes de la fréquence cardiaque (FC) et du lactate sanguin en fonction de la charge, chez des coureurs à pied par spécialité.

COUREURS	F O N D (n=8)		DEMI-FOND (n=7)	
	FC bpm	lactate mmol/l	FC bpm	lactate mmol/l
100	90 ± 6	1,1 ± 0,4	93 ± 13	1,8 ± 0,6
150	111 ± 9	1,5 ± 0,3	113 ± 15	2,8 ± 1,0
200	129 ± 9	2,2 ± 0,6	138 ± 18	4,5 ± 1,4
250	147 ± 11	3,6 ± 1,2	154 ± 18	8,1 ± 2,7
max	166 ± 10	8,1 ± 2,0	164 ± 13	10,6 ± 1,2

Les coureurs de demi-fond et de fond atteignent, en fin de l'épreuve maximale des valeurs voisines de fréquences cardiaques. Les valeurs du lactate enregistrées, en fin de l'épreuve, chez les coureurs de demi-fond ($10,6 \pm 1,2$ mmol/l) sont significativement plus élevées ($p < 0,01$) que celles enregistrées chez les coureurs de fond ($8,1 \pm 2,0$ mmol/l).

Tableau 3.5 : seuil anaérobie exprimé par différentes unités, enregistré chez les deux groupes de coureurs

VARIABLES	FOND (n=8)		DEMI-FOND (n=7)
SA"P"	258 ± 24	watts	190 ± 27
SA"FC"	151 ± 9	bpm	133 ± 16
SA"%FCmax"	91 ± 6	% FC max	79 ± 7
SA"VO2"	60,6 ± 4,5	ml/kg.min	50,2 ± 6,7
SA"%VO2max"	84 ± 6	% VO2 max	73 ± 6

SA "P" représente la charge correspondant au SA,
 SA"FC", SA"%FC max" : fréquence cardiaque (exprimée en bpm et en % de FC max) correspondant au SA,
 SA"VO2", SA"%VO2max" : consommation d'oxygène (ml/kg.min, % VO2max) correspondant au SA

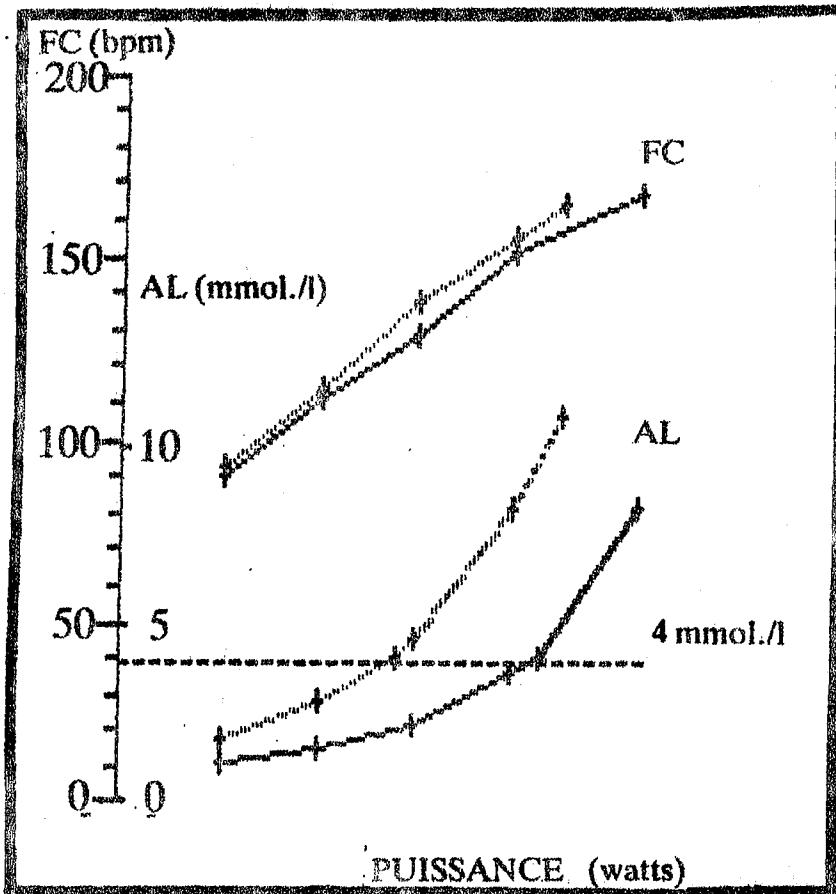


figure 3.3: Evolution de la fréquence cardiaque (FC) et du lactate sanguin (AL) en fonction de la charge, chez des coureurs de demi-fond (...) et chez des coureurs de fond (---)

3.3.2 PARAMETRES VENTILATOIRES ET METABOLIQUES EN FONCTION DE LA CHARGE

L'accroissement de la charge entraîne des modifications qualitatives et quantitatives des variables respiratoires et métaboliques. L'épreuve est interrompue à une charge (PMA) variable selon la capacité aérobie des sujets (314 ± 36 watts), amenant ces variables à leurs valeurs maximales.

Le tableau 3.6 et la figure 3.4 illustrent l'évolution, en fonction de la charge, des diverses variables ventilatoires et métaboliques habituellement retenues pour la détermination graphique du seuil ventilatoire.

Les différentes variables étudiées évoluent en fonction de la charge de la manière suivante :

- La consommation d'oxygène augmente de façon linéaire. Cette linéarité est constante, elle se poursuit jusqu'à la fin de l'épreuve. De $0,28 \pm 0,06$ l/min au repos, elle passe progressivement à une valeur moyenne de $4,15 \pm 0,81$ l/min en fin d'épreuve.

Contrairement à VO_2 dont l'évolution, en fonction de la charge, est constante, VE, VCO_2 , FR, VC évoluent au cours de l'épreuve en deux phases distinctes (tab. 3.6, fig. 3.4):

- phase 1: à augmentation linéaire de ces variables, qui s'étend du début de l'épreuve jusqu'à une charge, variable selon les sujets, appelée seuil ventilatoire (SV),
- phase 2: débute à partir de SV (222 ± 32 watts) et se poursuit jusqu'à la fin de l'épreuve. Les pentes des courbes sont modifiées lors de cette phase.

Lors de l'épreuve progressive, chacune des différentes variables évolue de la manière suivante :

- le débit ventilatoire (VE) présente une allure parabolique en fonction de VO_2 ou de puissance (fig. 3.2., 3.4), dont l'accroissement est plus important aux puissances élevées.

En début de l'épreuve, VE croît progressivement et atteint, au niveau du seuil ventilatoire, une valeur moyenne de 68 ± 11 l/min. A partir de SV, VE augmente d'une manière plus accrue et, atteint, en fin de l'épreuve une valeur moyenne deux fois plus élevée (136 ± 30 l/min) que celle atteinte au niveau du SV,

- VCO_2 (fig. 3.5) présente une allure similaire à celle de VE, l'inflexion de la courbe s'effectue au même niveau de charge (fig. 3.4). La valeur moyenne de VCO_2 atteinte en fin d'épreuve présente une augmentation de 78% par rapport à celle enregistrée au niveau du SV.

VCO_2 augmente d'une façon linéaire avec VE. A partir de SV, VE croît plus rapidement que VCO_2 (fig. 3.6),

SEUIL ANAEROBIE

Tableau 3.6: Evolution des variables ventilatoires et métaboliques en fonction de la charge

n = 14	VO2 l/min	VCO2 l/min	VE l/min	VE/VO2 l/l	FR n/min	VC litres
repos	0,28 ±0,06	0,25 ±0,04	8,9 ±2,9	32,5 ±12,3	8,3 ±3,0	1,11 ±0,38
50 W	0,52 ±0,15	0,46 ±0,11	15,8 ±4,5	31,4 ±11,2	14,5 ±3,9	1,08 ±0,31
100 W	1,22 ±0,15	0,91 ±0,09	29,2 ±5,4	24,3 ± 6,4	18,3 ±3,6	1,59 ±0,34
150 W	1,86 ±0,19	1,47 ±0,13	42,5 ±7,3	23,0 ± 4,2	21,7 ±4,8	2,00 ±0,28
200 W	2,55 ±0,26	2,16 ±0,18	59,9 ±8,9	23,7 ± 4,6	25,5 ±5,3	2,40 ±0,36
250 W	3,27 ±0,39	2,97 ±0,25	85,3 ±7,3	26,3 ± 6,3	32,2 ±5,5	2,66 ±0,39
MAX 314±36	4,15 ±0,81	4,33 ±0,81	136,0 ±30,6	33,2 ± 6,1	44,5 ±7,4	3,12 ±0,78

SEUIL ANAEROBIE

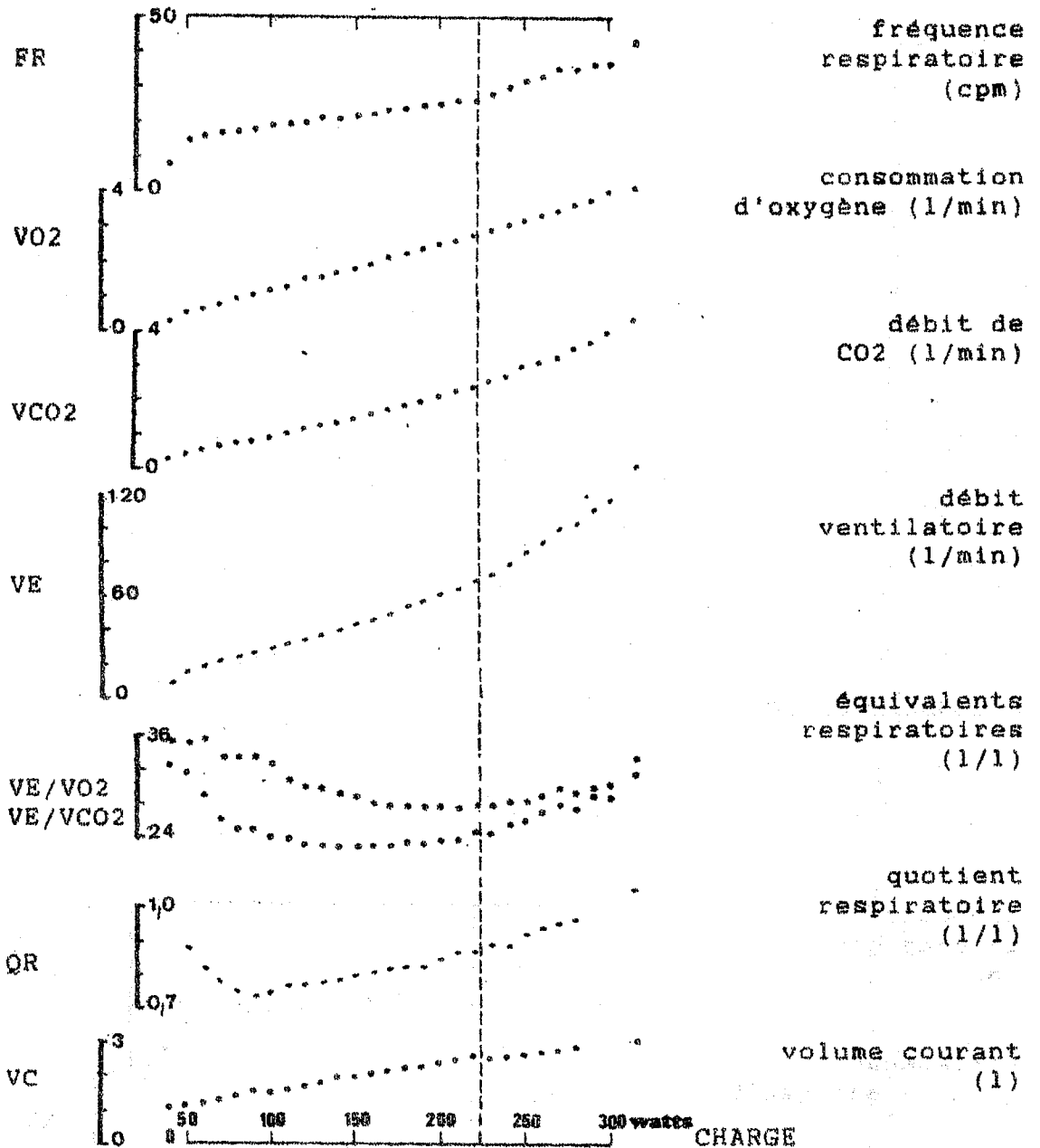


figure 3.4 : Evolution des paramètres respiratoires et métaboliques en fonction de la charge. La ligne verticale (en tirés) correspond au seuil ventilatoire

- $\frac{VE}{V_{O_2}}$ (fig. 3.4 et 3.7) présente une allure grossièrement parabolique, avec trois phases distinctes. Il diminue en début de l'exercice, passant progressivement de $32,5 \pm 12,3$ au repos à $23,0 \pm 4,4$ à 120 watts. Il se stabilise à $23,2 \pm 2,5$ pour des charges comprises entre 120 et 200 watts, puis augmente progressivement, pour atteindre une valeur maximale ($33,2 \pm 6,1$) en fin d'épreuve,

- $\frac{VE}{V_{CO_2}}$ présente une allure similaire à celle de $\frac{VE}{V_{O_2}}$, (fig. 3.7). Cependant, les limites des 3 phases ne sont pas bien évidentes, particulièrement entre les phases 2 et 3. Les valeurs de $\frac{VE}{V_{CO_2}}$ sont plus élevées ($p < 0,01$) que celles de $\frac{VE}{V_{O_2}}$ lors des deux premières phases, la différence s'estompe progressivement, lors de la 3e phase, pour s'annuler en fin de l'épreuve,

- la fréquence respiratoire moyenne au niveau du SV est de $26,4 \pm 5,7$ cycles par minute (cpm), elle atteint en fin d'épreuve une moyenne de $44,5 \pm 7,4$ cpm, soit une augmentation de 68% (fig. 3.4),

- le volume courant présente une allure différente de celles des variables précédentes. Contrairement à VE, V_{CO_2} et FR, le volume courant augmente rapidement lors de la 1ère phase de l'épreuve, puis plus lentement durant la 2e phase, la pente de la droite diminue de 37% (fig. 3.4).

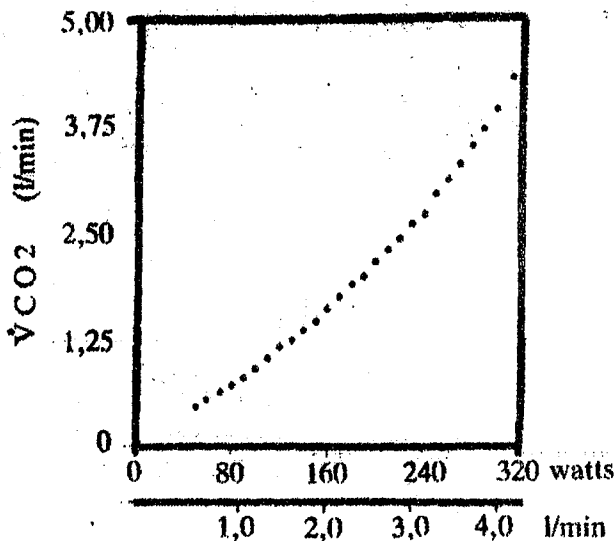


Figure 3.5 : Evolution de $\dot{V}CO_2$ en fonction de la puissance et de la consommation d'oxygène

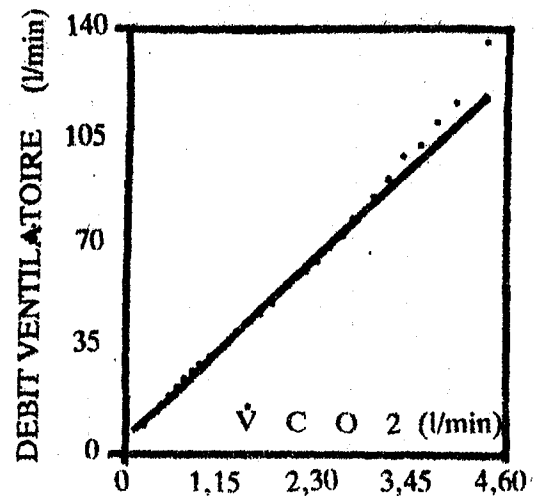


Figure 3.6 : Relation entre le débit ventilatoire et le débit de gaz carbonique

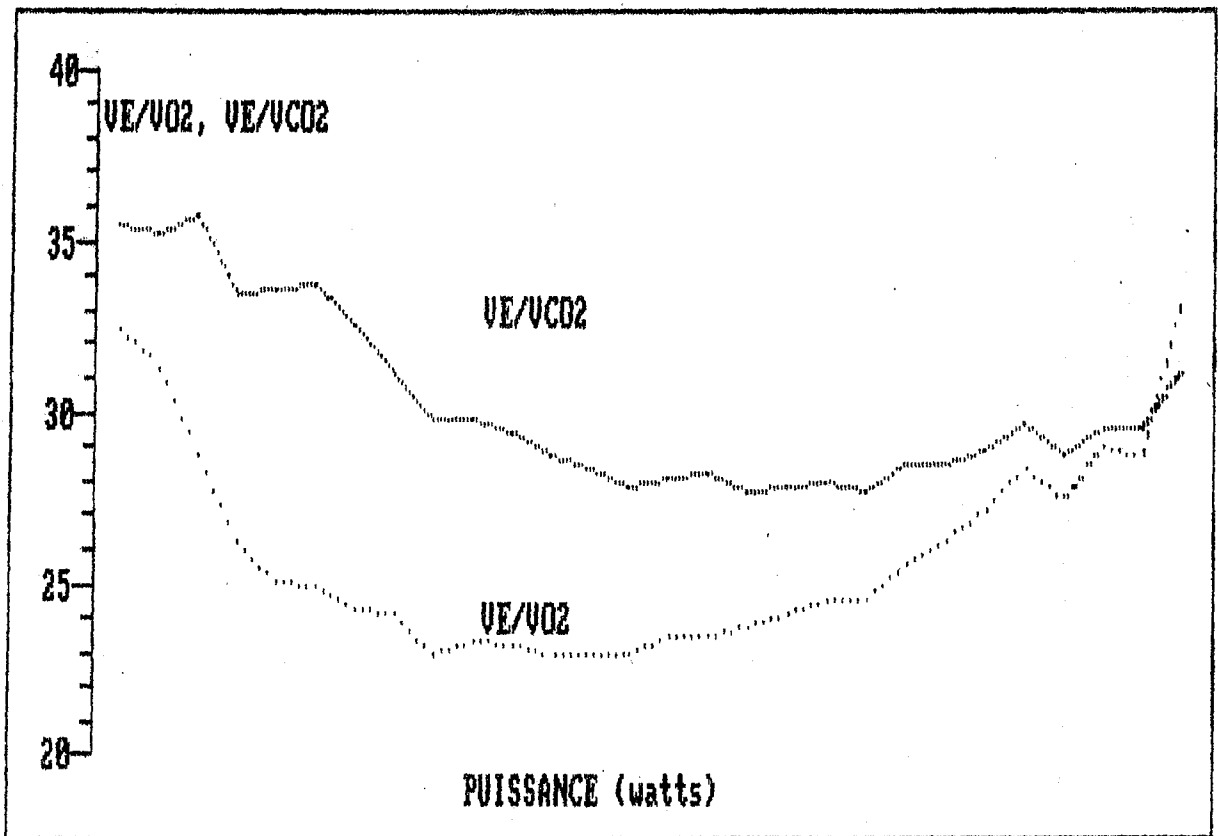


figure 3.7 : Evolution des équivalents respiratoires pour l'oxygène (VE/VO_2) et pour le rejet de gaz carbonique (VE/VCO_2) en fonction de la puissance (watts)

3.4. DISCUSSION

Actuellement, de nombreux auteurs (112, 177, 187) adoptent la définition et la méthode d'évaluation du seuil anaérobie, proposée par Mader. Cette méthode est basée sur la détermination de la courbe de lactacidémie, obtenue lors d'une épreuve maximale à charge progressivement croissante. Sur la base d'observations empiriques, cet auteur considère la valeur de 4 mmol/l de cette courbe de lactate, comme point correspondant au seuil anaérobie.

La mesure du seuil anaérobie implique une série de prélèvements d'échantillons sanguins pendant un exercice à charge progressivement croissante. Le dosage extemporané du lactate sanguin est actuellement possible, grâce à l'apparition de microméthodes et d'appareils automatiques appropriés. Cependant, la multiplicité des prélèvements sanguins, le coût des dosages qui demeure élevé et les limites de leur application sur le terrain, ont conduit de nombreux auteurs à rechercher d'autres méthodes de repérage du seuil anaérobie. Ces nouvelles méthodes, non invasives, fondées sur les variations brusques de certains paramètres, entre autres cardio-respiratoires, sont d'application plus facile, dans les conditions expérimentales ou de terrain.

C'est ainsi qu'un pourcentage élevé de la fréquence cardiaque maximale (80 % de FC max) est utilisé traditionnellement comme repère de l'intensité de l'effort à imposer lors de l'entraînement (110). D'autres auteurs (61, 177) suggèrent que l'entraînement au SA, défini par un pourcentage élevé de VO_2 max (85 %), est aussi efficace que s'il est défini au niveau de la valeur de 4 mmol/l de lactate sanguin. Ces techniques reposent sur l'hypothèse selon laquelle les contraintes métaboliques imposées à ces niveaux de FC max ou de VO_2 max, sont identiques pour chaque sujet (153).

Conconi et al. (35) ont mis au point une méthode de détection du seuil anaérobie fondée sur le repérage d'un point d'inflexion de la courbe de fréquence cardiaque lors d'une course à vitesse progressivement croissante. Si ce point d'inflexion constitue un repère fiable du seuil anaérobie, il devrait se manifester en laboratoire, lors d'une épreuve à charges progressivement croissantes, pour une concentration sanguine de 4 mmol/l de lactate.

De nombreux auteurs (29, 52, 76, 163, 196) ont souligné que le seuil anaérobie peut être également mesuré de façon satisfaisante, durant un travail sous-maximal ou maximal à charge progressivement croissante, à partir de l'aspect de la courbe du débit ventilatoire exprimé en fonction de la charge.

Cette méthode se fonde sur l'hypothèse selon laquelle la production accrue du lactate dans le sang provoque l'acidose métabolique et agirait, sur la ventilation pulmonaire comme un stimulus. Le point de rupture de la linéarité de la relation VE - charge (seuil ventilatoire), coïnciderait tout à fait avec le point d'inflexion de la courbe du lactate sanguin.

La notion de seuil ventilatoire (SV) a été soutenue par de nombreux auteurs (29, 163, 177), et son utilisation très répandue grâce, notamment au développement des techniques d'analyse continue des gaz respiratoires.

Aussi, nous sommes-nous proposés, dans une première étape, de vérifier ces faits expérimentaux, dans l'ordre suivant :

- vérifier si les pourcentages de FC max et de VO₂ max au seuil anaérobie peuvent être utilisés comme indicateurs du seuil anaérobie et par conséquent pouvant être utilisés facilement et au moindre coût pour la surveillance de l'entraînement,

- vérifier si le SA peut être détecté à partir de l'allure de la courbe de fréquence cardiaque lors d'une épreuve à charge progressivement croissante, tel que préconisé par Conconi et al.,

La deuxième phase du présent chapitre est consacrée à l'analyse de l'aspect qualitatif des courbes illustrant les variables respiratoires et métaboliques en fonction de la charge, dans le but de rechercher, entre autres, parmi les variables respiratoires, celles qui plus facilement mesurables que VE, peuvent être utilisées pour l'estimation du seuil anaérobie.

3.4.1 ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODOLOGIE

La durée de l'épreuve et la pente d'accroissement de la charge altèrent, selon Powers et al. (163), la précision de la mesure du seuil anaérobie si, notamment, des paliers inférieurs à trois minutes sont appliqués au cours de l'épreuve d'effort. Ceci est lié, d'après ces mêmes auteurs, au délai de diffusion du lactate, du muscle vers le sang. Toutefois, Caiozzo et al. (29), Takano (183) et Wasserman (193) ont montré qu'une augmentation de la charge de 15 à 20 W/min, n'affecte pas la fiabilité de la mesure du seuil anaérobie. En appliquant des paliers de courtes durées, ces auteurs ont montré qu'il était possible d'obtenir des valeurs fiables de VO₂ max et de SA dans un délai de 6 à 15 minutes.

Mc Lellan (128) et Wasserman (193) ont montré que pour un même accroissement de la charge, le seuil anaérobie déterminé à partir du lactate sanguin ou à partir des échanges gazeux, est plus élevé lorsque la durée des paliers est plus courte. Ces

SEUIL ANAEROBIE

auteurs ont montré qu'un accroissement de la charge, proche de 20 watts/min, en permettant la mesure du SV dans un délai convenable, permet une estimation satisfaisante du SV.

L'épreuve utilisée, dans la présente étude, semble répondre aux normes recommandées par ces auteurs aussi bien par sa durée (comprise entre 8 et 12 min) que par l'accroissement de la charge (25 watts par minute).

Le rythme de pédalage influe selon certains auteurs sur la mesure de SA et de SV. Takano (183) montre que le SV peut être atteint, pour une charge plus faible, lorsque le rythme de pédalage est élevé et que le SA peut coïncider avec le SV pour une vitesse optimale de pédalage laquelle est variable selon les sujets. L'accroissement progressif de la fréquence de pédalage utilisé lors de cette étude, permet l'obtention de SV et de SA avec un rythme, variable selon les sujets, compris entre 65 et 75 rpm. Cette zone de fréquences est conforme à celle recommandée par Coast et Welch (32) et par Takano (183) pour l'évaluation de VO₂ max, du SA ou du SV.

L'ergospiromètre utilisé dans cette étude permet de recueillir et d'analyser automatiquement les variables respiratoires et métaboliques étudiées. Chacune de ces variables est enregistrée, alternativement sous forme graphique, toutes les six secondes, soit un enregistrement moyen de 100 mesures par variable et par sujet, durant l'épreuve. Compte tenu du nombre important de paliers que comporte l'épreuve, et du nombre de mesures réalisées, la technique utilisée permet de détecter finement le point de rupture de la linéarité des variables respiratoires.

Les techniques classiques, à accroissement de la charge de 30 à 50 watts toutes les 2 à 5 minutes, permettent, l'obtention de 4 à 8 couples de valeurs seulement. Bien que ce nombre de couples suffise pour tracer une courbe, il n'est cependant pas suffisant pour détecter avec précision le seuil ventilatoire, particulièrement lorsqu'une erreur de mesure intervient dans l'un des paliers, et/ou lorsque le seuil se manifeste entre deux paliers successifs. Les tests à paliers très courts, tels que celui utilisé dans la présente étude, associés à la mesure continue des échanges gazeux, peuvent être utilisés d'après Mac Lellan (128), Takano (183) et Wasserman (193), en remplacement des mesures du lactate sanguin ou des paramètres acido-basiques, à évaluer le seuil anaérobie. Ce type de tests est

3.4.2 CINÉTIQUE DU LACTATE SANGUIN A L'EFFORT

L'analyse de la cinétique du lactate sanguin en fonction de la charge montre que l'acide lactique commence à s'accumuler dans le sang, chez des sujets en activité, à une charge de travail inférieure à la puissance maximale aérobie.

La concentration sanguine moyenne du lactate augmente progressivement et linéairement au début de l'exercice, passant de $1,4 \pm 0,6$ mmol/l à 100 watts, à $3,3 \pm 1,6$ mmol/l à 200 watts. Le seuil anaérobie est atteint pour une charge moyenne de 226 ± 42 watts. Au delà de cette charge, l'augmentation du lactate sanguin est plus rapide et atteint, en fin d'épreuve, des valeurs sept fois plus élevées que celles enregistrées à 100 watts ($9,3 \pm 2,2$ mmol/l).

Le seuil anaérobie correspond, chez notre population, à une utilisation moyenne de 79 ± 8 % de VO_2 max. Ces données sont conformes à celles rapportées dans la littérature pour des populations et des niveaux de performances similaires (98, 102, 166).

L'augmentation accrue du lactate sanguin est due essentiellement au déséquilibre entre la production de l'acide lactique par les fibres musculaires, se contractant dans des conditions anaérobies, et la capacité de l'organisme à l'oxyder (127), c'est à dire, soit à le transformer en glucides, soit à l'éliminer sous forme de CO_2 et H_2O . Au fur et à mesure que la charge de travail augmente, ce déséquilibre s'accroît, entraînant une accumulation rapide de l'acide lactique dans le sang, jusqu'à l'interruption de l'exercice.

Il a été démontré que l'entraînement n'induisait pas de production de lactate lorsqu'il est effectué à une intensité inférieure au seuil anaérobie (131). On admet généralement que l'entraînement est un stimulus efficace seulement, lorsque des intensités supérieures au seuil anaérobie, sont appliquées pendant de longues périodes (112). A partir de ces considérations, on en déduit que l'intensité optimale d'entraînement se situe autour du seuil de 4 mmol/l de lactate sanguin. Cette intensité a, selon certains auteurs (110), entraîné au cours de ces dernières années, des améliorations des performances sans que le débit cardiaque, la taille du cœur et la consommation maximale d'oxygène, n'augmentent sensiblement par rapport aux mêmes paramètres d'athlètes de haut niveau des années passées. Ainsi, des processus purement métaboliques qui se déroulent au niveau des cellules musculaires seraient responsables de l'amélioration des performances.

3.4.3 FREQUENCE CARDIAQUE ET CONSOMMATION D'OXYGENE AU SEUIL ANAEROBIE

La présente étude fait apparaître que les coureurs de demi-fond et de fond présentent des valeurs voisines de VO_2 max. La fréquence cardiaque, la charge, et la consommation d'oxygène correspondant au seuil anaérobie, exprimées en valeurs absolues et relatives, diffèrent, par contre, d'une manière significative ($p < 0,05$) entre ces deux groupes de coureurs. Cette observation est également faite par de nombreux auteurs (102, 182).

VO_2 max qui constitue habituellement un facteur non négligeable de l'aptitude physique des coureurs de demi-fond et de fond (chapitre 2.), ne permet de distinguer ces coureurs ni par spécialité ni par niveau de performance (102). Les coureurs de fond se distinguent, en effet, des coureurs de demi-fond, principalement par leur niveau plus élevé du seuil anaérobie, qu'il soit exprimé en valeurs absolues ou relatives de la charge, de consommation d'oxygène ou de fréquence cardiaque. L'assaut du lactate sanguin se manifeste plus tardivement chez les coureurs pratiquant de longues distances.

Pour un niveau donné de lactate sanguin, les coureurs de fond sont capables de développer une plus grande charge que les coureurs de demi-fond. Ceci témoigne de l'importance relative de l'endurance aérobie dans les courses de longues distances. Celle-ci se traduit par l'aptitude de ces coureurs à travailler le plus longtemps possible en dépensant une quantité d'énergie relativement plus faible que les coureurs de plus courtes distances. Autrement dit, à VO_2 max égal, les coureurs possédant un seuil anaérobie élevé sont capables de réaliser de meilleures performances dans les courses de longues distances. Ces observations concordent avec celles de Kenney et Hodgson (108), de Pollock et al. (162), et de Svedenhag et Sjodin (182), faites sur des populations similaires à la nôtre.

Contrairement aux observations de Davis et al. (52) et de Parkhouse et al. (153), cette étude ne fait pas apparaître de liaison significative, entre la consommation maximale d'oxygène et le seuil anaérobie, quelle que soit l'unité d'expression de ce dernier. Ceci est probablement lié à l'homogénéité de notre population de coureurs, au regard de la capacité aérobie.

Le seuil anaérobie est atteint à des niveaux différents de fréquence cardiaque et de consommation d'oxygène. Le pourcentage de FC max atteint au niveau du seuil anaérobie ($86 \pm 9\%$) est plus élevé ($p < 0,05$) que le pourcentage de VO_2 max ($80 \pm 10\%$). Des pourcentages similaires de FC max au niveau du seuil anaérobie, compris entre 84,5 et 88 %, sont enregistrés par de nombreux auteurs (59, 61, 153).

SEUIL ANAEROBIE

Pour l'ensemble des coureurs, le coefficient de variation du seuil anaérobie exprimé en terme de fréquence cardiaque (SA"FC") correspond à 10,5 %, il est de 12,5 % pour le SA exprimé en terme de consommation d'oxygène (SA"VO2"). Ces coefficients de variations sont relativement élevés pour que l'on puisse prescrire valablement l'intensité de l'entraînement sur les pourcentages de FC max ou sur ceux de VO2 max.

En accord avec Katch et Weltman (106) et, contrairement aux conclusions de Parkhouse et al. (153), l'importance des coefficients de variation des pourcentages de FC max et de VO2 max au niveau du seuil anaérobie, montre que les sujets travaillant à un même pourcentage de FC max ou de VO2 max subissent des contraintes métaboliques différentes.

Compte tenu de leurs grandes variabilités interindividuelles et, en accord avec Brooks et Fahey (25), Dwyer et Bybee (61), Wasserman et al. (196), nous considérons que la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène ne sont pas des indicateurs fiables pour l'identification précise du seuil anaérobie.

Ces observations ne sont pas en faveur de l'utilisation de ces variables comme expression générale de l'intensité efficace de l'entraînement anaérobie. En revanche, chez un individu donné, ces variables pourraient constituer de bons indicateurs du seuil anaérobie lorsqu'elles sont mesurées dans des situations proches de celles de l'entraînement. Dans ces conditions, la connaissance préalable des relations individuelles, liant le seuil anaérobie à ces variables, permet de mieux préciser la charge d'entraînement anaérobie à imposer sur le terrain. Kinderman et al. (112) admettent la fréquence cardiaque comme paramètre utile dans le contrôle de l'entraînement.

Compte tenu de la facilité d'enregistrement sur le terrain de FC, l'utilisation de celle-ci, comme indice d'appréciation de la charge d'entraînement, est préférée à celle des autres variables. On peut, dans ces conditions, définir jusqu'à quel pourcentage de sa FC max, un sujet peut travailler en restant en-dessous du seuil anaérobie. Si l'entraînement s'effectue à des fréquences cardiaques plus élevées, le niveau de lactate augmente rapidement et conduit à l'interruption de l'exercice.

Pour chaque individu, l'atteinte du seuil anaérobie peut être repérée par la fréquence cardiaque à partir d'un test spécifique. Cependant il est nécessaire d'émettre quelques réserves en raison des variations intraindividuelles de la fréquence cardiaque liées, entre autres, aux conditions expérimentales (paragraphe 2.4.2.2). En effet, il est possible que chez un même sujet et pour une même charge, le seuil anaérobie soit atteint pour des niveaux différents de fréquence cardiaque, selon les modalités de réalisation de l'épreuve (153).

Ces observations ne sont pas en faveur de l'utilisation de ces variables comme expression générale de l'intensité efficace de l'entraînement anaérobie. En revanche, chez un individu donné, ces variables pourraient constituer de bons indicateurs du seuil anaérobie lorsqu'elles sont mesurées dans des situations proches de celles de l'entraînement. Dans ces condi-

3.4.4 ALLURE DE LA COURBE DE FREQUENCE CARDIAQUE ET SA

L'allure des courbes moyennes illustrant la relation FC-P enregistrée chez une large population d'athlètes et chez des coureurs de différentes spécialités, est analysée précédemment (paragraphe 2.4.1.3). Les résultats de ce chapitre comme ceux du précédent montrent que la fréquence cardiaque évolue d'une manière linéaire en fonction de la charge et que cette linéarité se poursuit jusqu'à la fin de l'épreuve maximale. Les résultats moyens ne montrent pas de fléchissement de la courbe de fréquence cardiaque en fonction de la charge.

De nombreux auteurs (68, 119, 158) observent, cependant, une allure sigmoïde de cette courbe et une tendance au plafonnement de FC à l'approche de la puissance maximale aérobie. Lors d'une épreuve réalisée sur le terrain par des coureurs à pied, Conconi et al. (35), ont constaté que le point de la courbe FC - Puissance, à partir duquel la fréquence cardiaque tend vers un plateau, coïncide avec le seuil anaérobie. Ces auteurs ont attribué, de ce fait, une influence directe du lactate sanguin sur ce plafonnement et suggéré d'utiliser la vitesse correspondant à ce point de la courbe comme repère du seuil anaérobie chez les coureurs.

Compte tenu de son intérêt pratique sur le terrain, cette technique a suscité l'intérêt de nombreux auteurs. Certains l'ont validée et adoptée (60, 65), et d'autres (58, 119) ont émis des réserves quant à sa validité.

L'analyse des courbes individuelles illustrant la fréquence cardiaque en fonction de la charge, fait ressortir que l'inflexion de la courbe apparaît seulement chez 7 des 15 sujets étudiés, soit chez 47 % de l'échantillon. Chez les sujets dont le point de rupture de la linéarité de FC est observé, une relation significative ($p < 0,05$) apparaît entre ce point (exprimé en watts) et le seuil anaérobie (exprimé en watts). En outre, la charge correspondante à ce point est proche de celle du seuil anaérobie.

Ribeiro et al. (167) ont également observé une concordance entre le point de cassure de la courbe de fréquence cardiaque et le seuil anaérobie mais seulement chez 50% de leur population. Ils suggèrent qu'il n'existe pas de lien causal entre les deux et que, par conséquent, le point de rupture de la courbe de FC ne peut pas être une variable physiologique.

Dreezen et al. (58), Lacour et al. (119) ont remis en cause la précision de la mesure du seuil anaérobie par la méthode de Conconi et al.. Ils ont, en effet, noté au laboratoire, l'absence de liaison systématique entre le point de cassure de la courbe de FC et le seuil anaérobie. Ils déconseillent l'utilisation de cette méthode dans la détermination du SA,

SEUIL ANAEROBIE

particulièrement chez les athlètes de haut niveau chez qui, l'imprécision de la mesure (estimée par ces auteurs à 5 %) limite grandement son intérêt dans la conduite de leur entraînement. L'entraînement au plus haut niveau nécessite, en effet, une précision extrême des vitesses d'entraînement (13).

Ces différentes études font ressortir que l'unanimité n'est pas observée autour de l'apparition du point d'inflexion de la courbe de fréquence cardiaque à l'approche de la PMA, ni sur la relation systématique entre ce point, lorsqu'il apparaît, et le seuil anaérobie.

Une part des divergences semble résulter des modalités d'accroissement de la charge, parfois différentes d'une étude à l'autre. En effet, alors que l'allure sigmoïde de la courbe de FC est systématiquement observée lors des exercices continus à charge progressivement croissante (48, 119), elle est beaucoup moins apparente lorsque l'épreuve est interrompue par des phases de repos (124) et lorsque, comme c'est le cas de notre étude, l'épreuve est relativement courte.

Compte tenu de la variabilité de la fréquence cardiaque en fonction de la nature de l'épreuve, des modalités d'accroissement de la charge et de la durée de l'épreuve (par. 2.4.2.2), il est probable que ces discordances résultent des conditions expérimentales, différentes entre les études. La technique de Conconi mériterait d'être vérifiée sur le terrain, avec enregistrement simultané de la fréquence cardiaque et du lactate sanguin, avant de porter un jugement définitif sur sa validité en tant de test de terrain.

Les auteurs sont de plus en plus nombreux à utiliser les variations des gaz respiratoires pour apprécier le seuil anaérobie, vu les contraintes liées à la mesure, en laboratoire, du seuil anaérobie, dûes essentiellement à la disponibilité de l'équipement nécessaire à l'analyse du lactate sanguin.

Cette technique est cependant également sujette à discussion, particulièrement en ce qui concerne le choix de la variable respiratoire ou métabolique, la plus sensible à l'assaut du lactate sanguin. A cet effet, nous tenterons, au travers de ce qui suit, d'analyser les fondements physiologiques de cette technique, et de décrire les variations qualitatives et quantitatives des variables respiratoires étudiées, durant un effort à charges progressivement croissantes.

3.4.5 CINÉTIQUE DU DÉBIT VENTILATOIRE LORS DE L'EXERCICE ET SEUIL ANAEROBIE :

En début d'épreuve, VE augmente proportionnellement à la charge, cette augmentation est liée à l'augmentation simultanée du volume courant et de la fréquence respiratoire.

A partir d'une charge, variable selon les sujets, VE augmente d'une manière plus importante qu'en début de l'épreuve (fig. 3.2). Ce point d'accroissement, non linéaire de VE, correspond au seuil ventilatoire (29, 52, 163, 196), il coïncide chez tous les sujets, avec celui de nombreuses autres variables parmi lesquelles FR et VC. Ainsi, la réponse ventilatoire à l'exercice diffère selon que le travail s'effectue au-dessous ou au-dessus du SA.

Au dessus du seuil anaérobie la fonction respiratoire est sollicitée d'une manière plus importante qu'en début de l'épreuve. Ceci serait lié aux troubles acido-basiques associés à la production accrue du lactate sanguin et à la baisse réciproque des bicarbonates (193).

Pour une charge supérieure au SA, on assiste à une augmentation continue de VE et de FR, mais contrairement à ces deux variables, VC tend à se stabiliser à partir du SV. Ces observations laissent supposer, qu'à partir du SA, FR joue un rôle plus important que VC dans l'augmentation de VE.

A partir du seuil ventilatoire, une diminution de la concentration artérielle de CO₂ assurerait une compensation respiratoire à l'augmentation de l'acidose métabolique (101, 195, 197). Grâce à cet ajustement ventilatoire, la saturation en oxygène du sang est complète, PO₂ et PCO₂ alvéolaires conservent pratiquement les mêmes niveaux qu'au repos. Le stimulus H⁺ fournissant ce supplément de débit ventilatoire semble être régi par le réflexe des corpuscules carotidiens. En effet, selon de nombreuses études (70, 127), ces modifications ne surviennent pas chez les sujets dont les corps carotidiens ont été enlevés. Elle ne surviennent pas non plus chez les sujets dont les corps carotidiens sont insensibles, et chez les patients qui ont une limitation respiratoire importante due à un syndrome obstructif pulmonaire (Weber et Janicki, 1985, cités par Wasserman, (193)).

Powers et al. (163), Simon et al. (174) apportent des arguments en faveur de l'hypothèse de contrôle non exclusif de l'hyperventilation par l'acide lactique, en démontrant, que des augmentations de la ventilation, pendant un exercice graduel, n'étaient pas nécessairement proportionnelles à celles de l'acide lactique. La description d'un patient atteint du syndrome de Mac Ardle, hyperventilant sans augmentation de lactate, est en faveur de cette hypothèse. Hagberg et al. (78)

montrent que le signal de déclenchement de l'hyperventilation à l'exercice graduel n'est pas exclusivement régulé par chémoréception, et que les nerfs afférents des groupes II et IV des muscles squelettiques répondant à des stimuli locaux, peuvent jouer un rôle dans le contrôle de la ventilation à l'effort. Des arguments en faveur de cette hypothèse sont fournis dans l'étude de Mc Closkey et Mitchell (1972) cités par Powers et al. (163).

3.4.6 TAMPONNEMENT DE L'ACIDE LACTIQUE ET VCO₂.

La courbe illustrant la relation entre VCO₂ et la charge (fig. 3.4, 3.5) présente une allure similaire à celle de VE. A partir du point de rupture de la linéarité de cette courbe, VCO₂ augmente plus rapidement que la charge, de plus, cette rupture s'effectue à un même niveau de charge que VE et coïncide avec le seuil ventilatoire.

Dans les conditions aérobies, la concentration de l'acide lactique n'augmente ni dans le muscle ni dans le sang; dans ce cas la production de CO₂ est intimement liée à la charge et à la consommation d'oxygène. Quand le métabolisme aérobie est suppléé par le métabolisme anaérobie pour fournir l'énergie requise, l'acide lactique augmente dans le muscle. Comme l'acide lactique est virtuellement dissocié du pH cellulaire, ses ions H⁺ doivent être immédiatement tamponnés. Comme le tampon prédominant est le bicarbonate, il y a augmentation de VCO₂ quand l'acide lactique s'accumule. Ce volume de CO₂ est ajouté à celui produit par le métabolisme aérobie, d'où VCO₂ supérieur à celui prédit par VO₂ ($QR > 1$). Comme l'acide lactique intracellulaire augmente et le bicarbonate diminue, un échange d'anions apparaît. L'acide lactique diffuse vers le sang, vraisemblablement pour des raisons de neutralité électrochimique, tandis que le bicarbonate entre dans la cellule, permettant aux tampons extracellulaires de participer au tamponnement de l'acide lactique.

La relation entre VE et VCO₂ est linéaire en début de l'épreuve (fig. 3.6). A partir du SV, l'augmentation de VE est plus importante que celle qui serait due à la seule production de CO₂. Ceci laisse supposer que l'excès de CO₂ n'explique pas seul l'augmentation accrue de VE au dessus du seuil ventilatoire.

Au-dessus du SA, CO₂ n'est pas seulement produit par le métabolisme aérobie. Des quantités importantes de CO₂ sont ajoutées au sang veineux à mesure que l'acide lactique nouvellement produit est tamponné par les bicarbonates. Ainsi la cinétique de VCO₂ paraît plus rapide que celle de VO₂ au dessus du SA.

SEUIL ANAEROBIE

La figure 3.8 de Wasserman (193), résume les échanges gazeux accompagnant l'acidose métabolique, lors de l'épreuve à accroissement rapide de la charge, comme celle utilisée dans la présente étude. Cette figure ainsi les figures 3.4 et 3.7, mettent en évidence trois phases successives des réactions respiratoires et métaboliques, durant l'exercice à charge progressive :

La phase 1, à accroissement linéaire de VO_2 et curvilinéaire de VCO_2 , se situe au-dessous du seuil anaérobie. Cette phase dépend uniquement de la réaction physico-chimique du tamponnement de l'acide lactique par les bicarbonates, elle est indépendante de la sensibilité des chémorécepteurs respiratoires (127, 193).

Lors de la phase 2, l'augmentation de VCO_2 est accompagnée d'une augmentation parallèle de VE (fig. 3.6), maintenant constante la $PaCO_2$. Comme VO_2 est resté linéaire et VE s'accélère, l'équivalent respiratoire pour l' O_2 (VE/VO_2) commence à augmenter, on est alors au-dessus du seuil anaérobie. Comme la $PaCO_2$ est maintenue constante par l'hyperventilation, VE/VCO_2 se stabilise à une valeur constante.

Ce tamponnement reflète le lien étroit entre VE et VCO_2 au niveau du seuil anaérobie.

Le fait qu'au niveau du seuil anaérobie, VE/VO_2 augmente, sans augmentation parallèle de VE/VCO_2 , suscite de nombreux auteurs à utiliser cette observation comme critère d'identification du seuil anaérobie (29, 52, 128, 193).

La phase 3 survient au delà du seuil anaérobie, elle reflète la compensation respiratoire à l'acidose métabolique, par l'augmentation de l'équivalent respiratoire pour le CO_2 (VE/VCO_2)

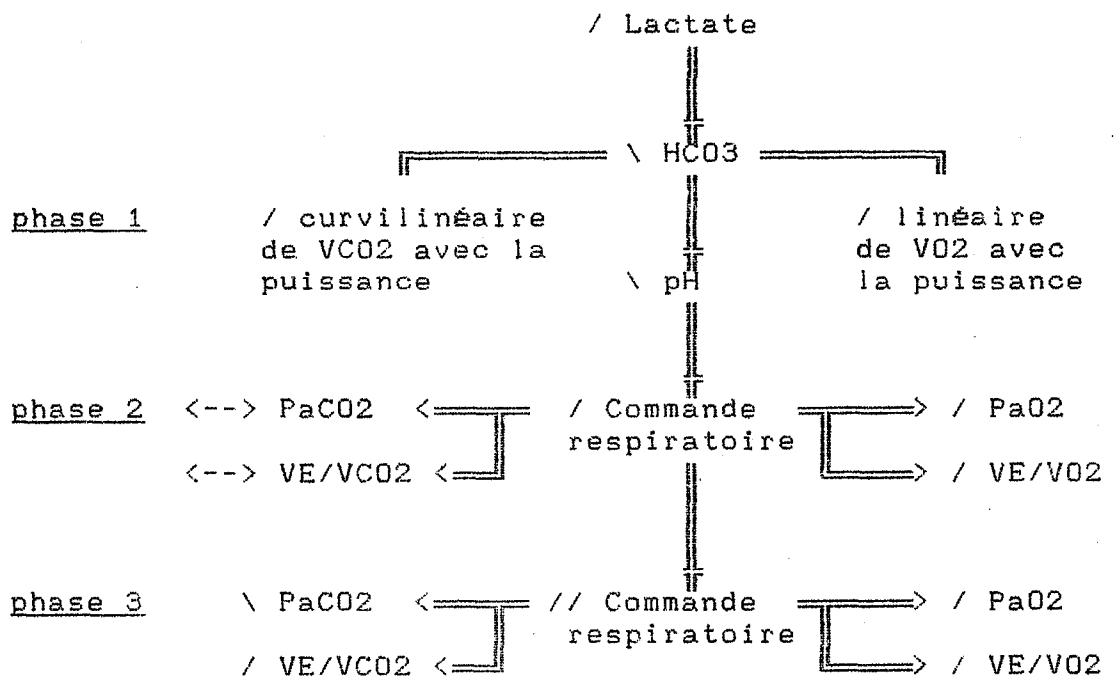


Figure 3.8: Schéma des différentes phases du tamponnement du lactate sanguin résultant d'un exercice à intensité progressivement croissante (Wasserman, 1987).

- / augmentation
- \ diminution
- <--> stabilisation
- phase 1: début de l'exercice progressif
- phase 2: zône du seuil anaérobie
- phase 3: fin de l'exercice

3.4.7 RELATION ENTRE SA et SV

Le seuil anaérobie déterminé à partir du lactate sanguin n'est pas significativement différent de celui déterminé à partir des divers paramètres d'échanges gazeux:

- Caiozzo et al. (29) trouvent que SV déterminé à partir de VE, VCO₂, et de VE/VO₂ ne diffère pas d'une manière significative de SA déterminé à partir du lactate sanguin.

- Mc Lellan (128) ne trouve pas de différence entre le seuil anaérobie et le seuil ventilatoire déterminé à partir de VE et de VE/VO₂.

- Powers et al. (163) montrent, par contre, que SA et SV n'apparaissent pas au même niveau de VO₂ chez tous les sujets, quoiqu'une relation significative soit relevée entre SA et SV.

- Le seuil ventilatoire, déterminé à partir de VE et de VCO₂, fournit une bonne corrélation avec le seuil anaérobie (76),

- la corrélation est également étroite ($p < 0,02$) entre SV déterminé à partir de VE/VO₂ et SA (52).

- Caiozzo et al. (29) et Mc Lellan (128) montrent que l'équivalent respiratoire pour l'oxygène (VE/VO₂) constitue, l'indice le mieux corrélé au seuil anaérobie. D'après ces mêmes auteurs, VE/VO₂ constitue l'indice le plus sensible et le plus fiable des indices ventilatoires ou d'échanges gazeux, par contre, VCO₂ et le quotient respiratoire sont les moins sensibles.

- D'autres auteurs (98) recommandent l'utilisation de VE/VCO₂ pour une estimation précise du SV.

La plupart des auteurs sont en faveur de l'utilisation de VE/VO₂ pour la détection non invasive du SA plutôt que de VE. En plus des raisons déjà citées d'autres arguments sont invoqués en faveur de l'utilisation de VE/VO₂ pour détecter le SA parmi lesquels: meilleur test-retest, la courbe illustrant VE/VO₂ en fonction de la charge montre un schéma à trois phases bien distinctes lui donnant une fiabilité certaine (193).

Lors de cette étude, en dehors de VO₂ dont l'évolution en fonction de la charge est constante, l'ensemble des autres variables (VE, VCO₂, FR et VC) évolue en deux phases. La charge correspondant au point de rupture de la linéarité de ces variables diffère selon les sujets. Cette observation est conforme à celle des différents auteurs sus-cités. De plus, chez un sujet donné, l'inflexion des courbes de ces quatre variables s'effectue simultanément, c'est-à-dire pour une même charge; ceci suggère que le seuil ventilatoire peut être apprécié d'une manière équivalente à partir de l'une de ces quatre variables.

SEUIL ANAEROBIE

Les équivalents respiratoires pour l'O₂ et le CO₂ évoluent en trois phases (fig. 3.7), conformément aux données de la littérature :

- une première phase à diminution rapide, se situant en moyenne entre 50 et 100 watts,
- une deuxième phase durant laquelle ces variables se stabilisent, dans une zone de charges moyennes comprises entre 100 et 220 watts,
- une troisième phase à augmentation lente se situant au delà de 220 watts.

Les charges correspondant aux changements d'allure de chacune des deux courbes sont variables en fonction des sujets. Chez un même sujet les charges correspondant aux modifications de l'allure de ces courbes diffèrent pour les deux variables. Contrairement aux observations de nombreux auteurs, les limites des 3 phases ne sont pas facilement détectables, l'erreur moyenne d'appréciation de ces zones est de ± 30 watts. Ceci souligne la difficulté d'apprécier le seuil ventilatoire à partir de VE/VO₂ et de VE/VCO₂ et montre, contrairement aux observations de nombreux auteurs, que ces deux indices sont moins fiables que VE, VCO₂, VC ou FR pour la détermination de SV.

A travers la revue de la littérature, il semble que tous les auteurs s'accordent à reconnaître que les paramètres respiratoires permettent d'apprécier convenablement le seuil anaérobie. Cependant, bien que l'utilisation des variables VE et VE/VO₂ soit recommandée par de nombreux auteurs, l'unanimité n'a pas été observée quant au choix des ou de la variable la plus sensible et la plus fiable pour l'estimation du seuil anaérobie.

Les divergences observées entre les études, quant au choix des variables les plus fiables, peuvent être expliquées par la diversité des conditions expérimentales et des techniques utilisées. Ces différences résideraient au niveau de différents facteurs qui affectent l'aspect des courbes, parmi lesquels, la durée des épreuves, le nombre de paliers, l'aspect de la pente d'accroissement de la charge, et l'ergomètre.

3.5. ETUDE CRITIQUE DU SEUIL ANAEROBIE

Un bref rappel sur le métabolisme de l'acide lactique aidera à mieux comprendre les critiques formulées. L'acide lactique est un métabolite présent aussi bien pendant l'effort qu'au repos.

Au repos ou lors d'un effort léger, c'est-à-dire inférieur à 60 % de VO_2 max, l'acide lactique est produit et enlevé du lit circulatoire en quantités égales. Cet équilibre entre la production et la dégradation est appelé turnover. Si le turnover est rapide la concentration sanguine du lactate demeure constante, les "entrées" équilibrent les "sorties". Le turnover est plus important à l'effort qu'au repos. Au cours de l'effort à intensité modérée, la concentration sanguine est constante bien que la production d'acide lactique est augmentée. Pour des efforts intenses, le taux de lactate sanguin s'élève. Après cette augmentation trois éventualités peuvent s'observer, le taux du lactate sanguin après avoir augmenté: s'élève, demeure constant, ou diminue malgré la persistance de l'effort intense.

- Si le taux d'acide lactique diminue, c'est que son enlèvement est supérieur à sa production, parce-que la circulation amène l'acide lactique au niveau des "sites" d'enlèvement et fournit l'oxygène nécessaire à la respiration musculaire.

- Le taux du lactate peut demeurer constant pour les mêmes raisons que lors du repos ou de l'effort léger.

- La troisième possibilité est l'élévation du taux du lactate lorsque la charge intense est maintenue, dans ce cas la production dépasse les capacités d'enlèvement.

Ainsi, le seuil anaérobie n'est que le reflet de l'équilibre entre les "entrées" et les "sorties" du lactate du sang et ne donne pas d'information précise sur le métabolisme anaérobie. Le seuil anaérobie n'est pas le point à partir duquel les muscles présentent un déficit en oxygène.

Si la théorie qui sert à fournir l'explication physiologique du seuil anaérobie ne résiste pas aux observations, la relation existant entre l'élévation du SA et la performance mérite d'être plus amplement étayée.

Le modèle de Wasserman et al. (196) liant l'augmentation de la production de l'acide lactique à la compensation respiratoire de l'acidose métabolique a servi de base pour l'estimation du SA à partir du seuil ventilatoire. Or ce modèle ne résiste pas aux évidences fournies par Hagberg et al. (78). Ces auteurs ont soumis des patients atteints du syndrome de Mac Ardle à des épreuves d'effort. Ces patients présentent une anomalie génétique se traduisant par un déficit enzymatique en phosphorylase qui les met dans l'incapacité de produire de l'acide lactique à partir du catabolisme du glycogène. Bien que

le taux du lactate sanguin demeure constant pendant l'épreuve, ces patients présentent un seuil ventilatoire, comme le groupe de contrôle.

Par ailleurs, de nombreux problèmes pratiques surviennent lorsqu'on essaie d'estimer SA à partir des mesures d'échanges gazeux :

- le point de non linéarité d'une variable donnée est déterminé empiriquement à partir d'un graphique. Bien que chez la majorité des sujets testés, le point de non linéarité soit tout à fait évident, chez beaucoup il ne l'est pas, particulièrement lorsque la courbe est dessinée à partir d'un nombre réduit de couples de variables. Il est important que la portion linéaire de la courbe soit bien établie pour que le point de cassure soit localisé. Cela nécessite une mesure continue des paramètres respiratoires en commençant avec de très basses charges (ex: à partir de 20 % VO₂ max, correspondant à environ 50 watts) et un raccourcissement des paliers en vue de multiplier le nombre d'enregistrements et permettre de tracer une courbe aussi précise que possible. L'utilisation de la technique d'analyse continue des gaz respiratoires et l'augmentation continue de la charge lors de la présente étude, nous ont permis, en effet, d'obtenir des courbes illustrant d'une manière très fine l'évolution des différentes variables en fonction de la charge et par conséquent de localiser assez facilement le point de rupture de la linéarité de ces variables.

- Thoden et al. (187) ont trouvé que la reproductibilité de la méthode sur la base du test-retest était faible, sans en fournir le coefficient. Davis et al. (52) ont décelé des différences intraindividuelles, dans l'évaluation de routine du seuil ventilatoire, de plus de 15 % .

Ces observations remettent en cause la fiabilité de cette méthode. On peut se demander si cette méthode est suffisamment précise pour déceler les changements parfois minces qui surviennent chez les athlètes de haut niveau, après une période d'entraînement donné, et si cette méthode offre une base raisonnable pour la comparaison du SV d'une équipe relativement homogène d'athlètes.

- L'interprétation du SA à partir des données respiratoires peut être compliquée par les différences individuelles liées à la sensibilité ventilatoire au CO₂ ou H⁺ qui peut affecter la relation VE et l'augmentation du lactate plasmatique.

- Il y a toujours problèmes à ce que le point de cassure de la courbe de VE soit utilisé pour l'estimation du SA (177). Il est suggéré que les changements non linéaires des paramètres ventilatoires peuvent seulement coïncider avec le début de l'accumulation d'acide lactique sans relation de cause à effet

SEUIL ANAEROBIE

(53, 78). Pour ces raisons, Thoden et al (187) pensent que l'évaluation, chez les athlètes d'élite, du SA par les méthodes non invasives devrait être déconseillée.

Le fait que le seuil ventilatoire ne soit pas la conséquence du métabolisme anaérobie et soit indépendant du SA ne signifie pas son abandon lors des épreuves. Pour Brooks et Fahey (25), le seuil ventilatoire est probablement un meilleur critère d'entraînement que le niveau du lactate sanguin ou que le seuil anaérobie.

Chapitre 4

Capacité anaérobie

- 4.1. GENERALITES**
 - 4.1.1 INTRODUCTION
 - 4.1.2 PERTINENCE DE L'EVALUATION DE LA CAPACITE ANAEROBIE
 - 4.1.3 FACTEURS AFFECTANT LA CAPACITE ANAEROBIE
 - 4.1.4 MESURE DE LA CAPACITE ANAEROBIE
 - 4.1.4.1 Méthode directe
 - 4.1.4.2 Méthodes indirectes
 - 4.1.4.3 Protocoles
 - 4.1.4.4 Durées optimales des épreuves d'évaluation
 - 4.1.5 CHOIX DES ERGOMETRES
 - 4.1.6 OBJECTIFS

- 4.2. MATERIEL ET METHODES**
 - 4.2.1 POPULATION
 - 4.2.2 MATERIEL
 - 4.2.3 VARIABLES ETUDIEES
 - 4.2.4 PROTOCOLE EXPERIMENTAL
 - 4.2.5 TECHNIQUES STATISTIQUES

- 4.3. RESULTATS**
 - 4.3.1 EPREUVE DE Debruyn-Prévost
 - 4.3.2 DONNEES ENREGISTREES CHEZ DES COUREURS
 - 4.3.3 CAPACITE ANAEROBIE ET SEUIL ANAEROBIE, ENREGISTRES SUR LE TERRAIN SELON LA TECHNIQUE DE MOGNONI
 - 4.3.4 RELATIONS ENTRE LA CAPACITE ANAEROBIE ET LES AUTRES PARAMETRES ETUDIES

- 4.4. DISCUSSION**
 - 4.4.1 ANALYSE CRITIQUE DE L'EPREUVE DE Debruyn-Prévost
 - 4.4.2 CAPACITE ANAEROBIE DETERMINEE SELON LA TECHNIQUE DE MORITANI et al. (1981)
 - 4.4.3 CAPACITE ANAEROBIE DETERMINEE A PARTIR DE LA TECHNIQUE DE MOGNONI (1988)

- 4.5. CONCLUSION**

Capacité anaérobie

4.1. GENERALITES

4.1.1 INTRODUCTION

L'activité physique requiert la consommation d'ATP dans les muscles. Du fait que son stock musculaire soit très réduit, l'ATP consommé doit être constamment resynthétisé au fur et à mesure de son utilisation.

Pour une intensité modérée, la resynthèse s'effectue essentiellement par les processus aérobie. Lors d'un exercice à intensité élevée, le turnover de l'ATP dépasse la puissance maximale du système de production énergétique aérobie. La reconstitution de l'ATP nécessaire au travail, est suppléée dans ce cas par les processus anaérobies.

La production d'ATP par le processus anaérobie est étroitement liée à la production de lactate et à la dégradation de la créatine phosphate (CP). La quantité de CP disponible et le taux de lactate pouvant s'accumuler dans le muscle et dans le sang sont limités. Il doit donc y avoir une quantité limite d'énergie d'origine anaérobie qui peut être libérée pendant l'exercice. Cette quantité limite ou maximale est appelée capacité anaérobie. Alors que les voies métaboliques qui sous-tendent la production anaérobie d'ATP sont connues depuis des années, il demeure difficile de quantifier cette libération d'énergie à l'exercice.

Les processus énergétiques anaérobies, au nombre de deux (alactique et lactique) sont sollicités de façons fréquentes dans diverses activités sportives telles que les sports collectifs et les sports qui requièrent une intensité maximale pendant une brève durée. Ces processus régénèrent l'énergie par deux voies distinctes:

- à partir de l'ATP et de la créatine phosphate (CP), sans formation d'acide lactique: processus anaérobie alactique,
- par catabolisme anaérobie du glycogène, avec formation d'acide lactique: processus anaérobie lactique.

Le processus anaérobie alactique permet la réalisation d'exercices très intenses et très brefs, en l'absence d'oxygène (anaérobie), et sans production de lactate (alactique). C'est un véritable réservoir d'énergie immédiatement disponible, sous forme de composés chimiques particuliers que sont l'ATP et la créatine phosphate (CP), appelés communément les phosphagènes à cause de leur liaison phosphate riche en énergie.

CAPACITE ANAEROBIE

La littérature spécialisée rapporte plusieurs durées d'intervention maximale de cette filière énergétique. Ces durées sont généralement comprises entre 3 et 15 s (181). La durée de 5s est généralement la plus indiquée pour l'évaluation de la puissance anaérobie alactique, la durée comprise entre 10 et 15s pour l'évaluation de la capacité anaérobie alactique (56, 189).

Le processus anaérobie lactique ou glycolyse anaérobie permet à l'organisme d'obtenir de l'énergie en l'absence d'O₂ (anaérobie), avec formation de lactate (lactique). La quantité totale d'énergie produite par cette filière est plus importante que celle fournie par les phosphagènes, mais demeure très réduite par rapport à celle fournie par la filière aérobie. Par contre, la puissance développée par ce processus est moins importante que celle développée par les phosphagènes et beaucoup plus grande que celle de la filière aérobie (fig.1.4).

Le processus énergétique anaérobie lactique est sollicité d'une manière préférentielle dans diverses activités sportives particulièrement dans celles qui requièrent une grande intensité pendant une durée comprises entre 30 et 90 secondes telles que les courses de 400 et 800 mètres en athlétisme, et de 100 et 200 mètres en natation.

La régénération de l'ATP musculaire par les mécanismes anaérobies est un fait essentiel en physiologie et en biochimie de l'effort. Ce domaine a été caractérisé par des progrès remarquables pendant les 50 dernières années (88, 134). La mise au point, à la fin des années 60, de la technique de biopsie musculaire appliquée au travail et à la performance sportive a aidé à clarifier plusieurs mécanismes impliqués dans la production d'énergie anaérobie.

En dépit des progrès réalisés dans ce domaine, il y a peu d'informations disponibles sur la contribution réelle du métabolisme anaérobie au succès sportif. L'évaluation des processus d'énergie anaérobie chez les athlètes n'est pas encore une pratique routinière dans les laboratoires de physiologie de l'effort. Des progrès continuels sont observés aussi bien dans les fondements théoriques que dans les techniques d'évaluation de ces qualités.

4.1.2 PERTINENCE DE L'EVALUATION DES QUALITES ANAEROBIES

La pertinence de l'évaluation des qualités anaérobies, pour une activité sportive donnée, est essentiellement liée au degré de participation de ces qualités, dans la libération de l'énergie totale requise par la pratique de cette activité sportive. Le tableau 1.1 de Thoden et al. (187) présentant les taux de participation des différents processus énergétiques lors d'épreuves maximales de différentes durées, fournit un critère d'appréciation de la pertinence de l'évaluation de ces processus.

CAPACITE ANAEROBIE

Les mesures de la performance anaérobie sont pertinentes particulièrement pour les athlètes dont la discipline sportive nécessite une mise en jeu effective des processus anaérobies lactique et/ou alactique. Elles peuvent être d'une grande utilité pour les athlètes de la plupart des sports collectifs et les sports de combats et pour ceux dont la spécialité requiert une intensité maximale pendant une durée variant approximativement entre 5 secondes et 6 minutes (tab. 1.1).

Les épreuves d'appréciation de la capacité anaérobie sont d'une grande importance pour les athlètes lorsqu'elles simulent le mode réel d'entraînement et lorsqu'elles impliquent les groupes musculaires spécifiques à la pratique de la spécialité sportive considérée.

4.1.3 FACTEURS AFFECTANT LA CAPACITE ANAEROBIE

Différents facteurs sont susceptibles de limiter la production et l'utilisation de l'énergie anaérobie (83, 111, 189) parmi lesquels :

- le taux de production d'ATP dans la fibre musculaire,
- les niveaux initiaux de glycogène musculaire,
- la capacité à tolérer un haut niveau d'acide lactique. Des valeurs extrêmement élevées de 25-26 mmol/l dans le sang artériel et 20-30 mmol/l dans le muscle ont été observées,
- la capacité à tolérer un pH intramusculaire bas. Les valeurs extrêmes de 6,8 dans le sang artériel et de 6,4 dans le muscle ont été observées par Kinderman et Keul (111).

On peut ajouter à ces facteurs:

- le niveau d'entraînement des sujets: Saltin et Karlsson (173) ont observé, pour une dépense énergétique donnée, une utilisation dégressive de phosphagènes et d'hydrates de carbone et une production diminuée d'acide lactique, chez des athlètes ayant subi un programme d'entraînement impliquant prioritairement les processus anaérobies. En outre, les sujets entraînés étaient capables de tolérer des niveaux plus élevés de lactate sanguin et musculaire,
- la distribution des divers types de fibres musculaires squelettiques et les activités enzymatiques des diverses voies métaboliques, peuvent constituer également une limitation importante du travail anaérobie (6, 125, 127).

4.1.4 L'EVALUATION DE LA CAPACITE ANAEROBIE

L'évaluation des processus anaérobies demeure complexe (189) et peu précise (44). Autant il est aisé d'évaluer la quantité d'énergie fournie par les voies aérobie à partir de la consommation d'oxygène et de l'équivalent énergétique de l'oxygène, autant il est difficile d'avoir une idée précise sur la quantité d'énergie fournie par les voies anaérobies.

CAPACITE ANAEROBIE

Depuis longtemps, les physiologistes cherchent à évaluer la capacité anaérobie du sportif. L'épreuve idéale à rechercher doit être suffisamment sensible pour apprécier, entre autres, l'efficacité d'un programme d'entraînement de type anaérobie et pour distinguer les athlètes présentant des capacités anaérobies différentes.

Nous ne connaissons que peu d'études portant sur la capacité anaérobie et sur l'évolution des paramètres physiologiques pour des épreuves intenses et de courte durée. Pour Vandewalle et al. (189), il n'existe pas de test valable qui permette d'apprécier cette capacité de travail anaérobie avec une précision satisfaisante. Les recherches sur le terrain sont encore plus rares.

En attendant le développement de techniques plus fiables et moins contraignantes de mesure directe de ce processus, la plupart des auteurs s'accorde à estimer les différentes composantes du système de production d'énergie anaérobie, essentiellement à partir de la durée maximale pour réaliser un travail à intensité donnée ou à partir de la quantité maximale de travail mécanique développée en un temps défini (127).

Pour évaluer les processus énergétiques anaérobies, il est important d'établir la distinction entre la capacité et la puissance du système.

La quantité totale d'énergie disponible pour réaliser un travail dans un système énergétique donné est appelée la **capacité** énergétique de ce système.

La quantité maximale d'énergie qui peut être développée pendant un exercice, par unité de temps, est appelée **puissance** énergétique de ce système.

Ceci signifie que le système de production d'énergie anaérobie peut être défini comme un système à quatre composantes: capacité et puissance alactiques, capacité et puissance lactiques. Ces quatre composantes présentent des caractéristiques métaboliques (durées et intensités) définies. Cependant, compte tenu de ses limites, l'appareillage actuellement disponible ne permet pas l'émergence de tests précis d'évaluation de chacune de ces quatre composantes (189).

Des études expérimentales (101) et des simulations par ordinateurs (132), ont permis de montrer que le métabolisme glycolytique est déjà impliqué dans les premières secondes d'exercice. Les métabolismes alactique et lactique agissent de façon simultanée dès le début de l'exercice. Par conséquent, il est difficile de distinguer la puissance anaérobie lactique de la capacité anaérobie alactique.

Partant de ces difficultés, les études récentes (140, 189), suggèrent de considérer la "capacité anaérobie" comme étant la résultante de l'action simultanée des processus anaérobies alactique et lactiques. Elle peut être appréciée à partir de sa puissance ou de sa capacité.

Dans le but d'évaluer la puissance et la capacité anaérobies en laboratoire et sur le terrain, plusieurs approches ont été proposées, parmi lesquelles on peut citer :

- l'évaluation directe à partir de la biopsie musculaire,
- l'évaluation indirecte à partir de la mesure de la dette d'oxygène, du déficit d'oxygène ou d'autres indices physiologiques dans le sang ou dans les muscles squelettiques impliqués pendant le travail,
- l'évaluation indirecte à partir d'épreuves très intenses (supramaximales), réalisées en laboratoire sur différents types d'ergomètres, et sur le terrain en situation spécifique.

4.1.4.1 Méthode directe

Les ponctions de biopsies musculaires, effectuées chez des athlètes pratiquant diverses disciplines sportives, ont montré des différences de typologie musculaire en fonction du sport pratiqué. C'est ainsi qu'une prédominance de fibres musculaires de type rapide, est observée chez les athlètes pratiquant des sports très brefs et très intenses tels que les courses de vitesse, les sauts, et les lancers.

Les fibres musculaires de type rapide possèdent des activités enzymatiques élevées en ce qui concerne les enzymes du métabolisme lactique et alactique. Il est donc tentant de considérer la ponction biopsie musculaire comme une approche directe de la capacité anaérobie et comme moyen de validation des tests anaérobies. Ainsi, les résultats des tests anaérobies ont été confrontés à plusieurs reprises à ceux de la biopsie musculaire. Les sujets possédant une prédominance de fibres rapides réalisent généralement de meilleures performances anaérobies que les sujets à prédominance de fibres lentes.

Si les coefficients de corrélation entre les performances aux tests anaérobies et la typologie musculaire sont en moyenne statistiquement significatifs, il ne sont généralement pas très bons. Il ne faut cependant pas en déduire que la validité des tests anaérobies actuels est mauvaise. En effet, la validité de la biopsie musculaire comme une approche directe de la capacité anaérobie est contestable vu que les 20 à 40 mg de muscle prélevé ne sont pas forcément représentatifs du muscle entier. De même, il convient de rappeler qu'en dehors de toutes considérations techniques, des sujets possédant la même composition en fibres musculaires lentes et rapides peuvent avoir des performances différentes, en raison de leurs caractéristiques anthropométriques et biomécaniques qui peuvent différer.

Si la technique de biopsie musculaire demeure un examen intéressant sur le plan scientifique et utile dans le domaine de l'orientation sportive, elle ne permet en fait qu'une estimation actuellement indirecte des propriétés musculaires, en montrant une éventuelle prédominance de fibres musculaires (188).

4.1.4.2 Mesures indirectes

Dettes d'oxygène et déficit d'oxygène

L'équivalent en oxygène de l'énergie non couverte par le métabolisme aérobie, pendant un exercice, est appelé déficit d'oxygène. L'oxygène consommé en plus du niveau basal pendant la période de récupération est dite dette d'oxygène.

La théorie de la dette d'oxygène, issue des travaux de Hill et al. (88) et développée par Margaria (134), a fait de l'accumulation de l'acide lactique pendant l'exercice, une cause de l'élévation de la consommation d'oxygène post-exercice survenant pour éliminer, entre autres, cet acide lactique de l'organisme. De ce fait, la dette d'oxygène a été prise comme critère d'appréciation de la capacité anaérobie. Or, selon la théorie actuelle, développée par Brooks (24) et présentée plus en détail au chapitre 1 (1.2.4.6), l'exercice provoque des perturbations au niveau de la mitochondrie et de la membrane cellulaire qui augmentent les besoins de l'organisme en énergie entraînant une consommation en oxygène pour libérer cette énergie. Par conséquent, la consommation d'oxygène post-exercice est augmentée au-dessus des valeurs normales. Les hasards de la physiologie font qu'au même moment une grande quantité d'acide lactique est disponible dans l'organisme. Cet acide lactique, qui constitue un carburant pour la plupart des tissus (cerveau, coeur, foie, reins et muscles) est oxydé et disparaît progressivement par cette voie, mais non transformé en glycogène comme le soutenait la théorie classique.

La dette d'oxygène n'est donc pas liée à l'accumulation d'acide lactique, on en déduit, par conséquent, qu'elle n'est pas une mesure valide et fiable de la capacité anaérobie. C'est principalement pour ces raisons que de nombreux auteurs (140), préfèrent apprécier la capacité anaérobie à partir de la mesure du déficit d'oxygène plutôt que de la dette d'oxygène. D'après ces auteurs, le déficit cumulé en oxygène est une mesure valable de la libération d'énergie anaérobie pendant un exercice intense d'une durée de deux à trois minutes. Le choix de ces durées est liée au fait que l'accumulation maximale du déficit en oxygène s'effectue dans cette zone.

Le déficit en oxygène est évalué à partir d'un exercice à charge maximale constante jusqu'à épuisement du sujet, il correspond à la différence entre le coût global d'oxygène requis et la quantité d'oxygène consommée durant cet exercice. On part

alors du principe que l'efficacité mécanique est la même pour des charges supra et submaximales. Le coût d'oxygène peut être calculé par extrapolation de la relation VO₂-Puissance.

Lactate sanguin et capacité anaérobie

La concentration sanguine de lactate (AL sanguin), mesurée après exercice, est souvent utilisée au laboratoire et sur le terrain, pour évaluer la participation du métabolisme anaérobie (99). L'AL sanguin après un exercice supramaximal est parfois utilisé comme mesure de la capacité anaérobie. Il est admis qu'une importante production de lactate musculaire entraînait une élévation parallèle de lactate sanguin.

La valeur maximale (pic) de AL sanguin, après les épreuves de courte durée, n'est pas obtenue à la fin de l'exercice mais après environ 7 min de récupération (17, 45).

Le coefficient de variation du lactate sanguin post-exercice a été étudié par plusieurs auteurs, il varie de 7 à 14 % pour certains (33, 71) et atteint 21 % pour d'autres (73), pour des épreuves maximales à charge constante réalisées sur bicyclette ergométrique.

En plus de ces différents inconvénients, l'appréciation de la capacité anaérobie par la mesure de la concentration sanguine du lactate ou par la concentration métabolique musculaire (biopsie musculaire), est invasive et onéreuse.

Compte tenu des différentes contraintes liées à la mesure de la dette et du déficit d'oxygène et à la mesure du lactate sanguin, les méthodes indirectes de mesure du travail mécanique sont plus répandues.

4.1.4.3 Protocoles d'évaluation de la capacité anaérobie

Les épreuves de capacité anaérobie peuvent être divisées en tests à charge constante et tests à charge maximale de durée constante. Plus récemment, Moritani et al. (146) et Mognoni (cité par Dal Monte, 1988), ont mis au point, un autre type de méthodes, permettant d'estimer la capacité anaérobie, respectivement en laboratoire et sur le terrain.

Tests à charge maximale de durée constante

Les tests à charge maximale sont des épreuves au cours desquelles le sujet exerce un effort maximal pendant une durée déterminée. Le test de Wingate est le plus fréquemment utilisé et a été étudié par de nombreux auteurs depuis sa première description (8).

La durée des épreuves de mesure de la capacité anaérobie à charge maximale varie entre 30 secondes (épreuve de Wingate, 8) et deux minutes (épreuve de Katch et al., 104). D'après Simoneau et al. (175), le test de Wingate est trop court pour épuiser les stocks énergétiques anaérobies d'où le choix par ces auteurs d'un exercice de durée de 90 s.

Tests à charge constante

Des tests à charge constante ont été proposés sur tapis roulant et sur cycloergomètre. Ces épreuves consistent à courir ou pédaler à une puissance donnée jusqu'à épuisement. Il est admis que plus la durée de cette épreuve est longue, plus la capacité anaérobie est importante.

Pour les épreuves de capacité anaérobie sur cycloergomètres, la charge est soit la même pour tous les sujets (400 watts), c'est le cas de l'épreuve de Debruyne-Prévost (55), soit relative au poids corporel, c'est le cas des épreuves de Crielaard et al. (45) et de Katch (104). L'inaptitude à maintenir la vitesse de pédalage donnée, est retenue comme critère d'épuisement.

Techniques de Moritani et al. (1981) et de Mognoni (1988)

La puissance mécanique du muscle humain est définie comme étant la quantité de travail externe réalisée par le muscle par unité de temps. La performance du muscle résulte de deux facteurs essentiels: aérobie et anaérobie, pouvant être évalués respectivement par la consommation maximale d'oxygène (chap. 2) et par le déficit d'oxygène (140).

Lors d'expériences, durant lesquelles seul un petit groupe musculaire est impliqué, à différentes intensités, Monod et Scherrer (143), ont montré l'existence d'une relation linéaire entre la quantité totale de travail fourni et sa durée. Cette relation est du type : $W_{lim} = a + b \times t_{lim}$

D'après cette équation, le travail maximal (W_{lim}) semble résulter de l'utilisation d'une réserve d'énergie "a", et de la reconstitution de l'énergie, dont la puissance critique est représentée par la pente de l'équation "b".

"a" représente la réserve énergétique disponible dans le muscle lui-même, rapidement mobilisable, correspondant aussi bien à l'énergie contenue dans les composés phosphorés (ATP et CP) qu'à celle provenant de la dégradation anaérobie du glycogène ou de l'utilisation de ce substrat dans les réactions aérobies au contact de la myoglobine (144). Le coefficient de la pente "b" ou puissance critique est interprété comme la vitesse de l'apport énergétique d'origine aérobie, dont l'importance détermine la puissance maximale de travail du muscle en dehors de la fatigue (143).

CAPACITE ANAEROBIE

Moritani et al. (146), ont étendu ce concept à un travail plus global sur ergocycle. Ils ont étudié, à l'échelon global de l'organisme, l'évolution du temps limite, soutenable pour des puissances comprises entre 275 et 400 watts, jusqu'à l'apparition de la fatigue.

Cette méthode consiste en une épreuve à trois paliers discontinus. Chaque palier est caractérisé par une résistance, un rythme de pédalage et par une durée déterminés. A partir des caractéristiques des trois paliers, il est possible de calculer la capacité anaérobie et la puissance critique du sujet à partir de la relation : $W \text{ limite} = a + b \times \text{temps limite}$

La valeur "a" de l'équation constitue, d'après l'auteur, un indicateur de la capacité anaérobie.

La pente "b" de l'équation, caractérise le seuil anaérobie.

Cette technique a été modifiée et adaptée par Mognoni (1988) cité par Dal-Monte (47), pour l'estimation sur le terrain de la capacité anaérobie et du seuil anaérobie.

Sur le terrain, ce test consiste en la réalisation de trois paliers à vitesses maximales différentes. Ces vitesses sont choisies de façon à ce que la durée des paliers se situe entre 40 et 300 secondes. De la même façon que pour la technique précédente, la vitesse et la durée des paliers sont portées sur un diagramme respectivement en ordonnées et en abscisses. La droite ainsi formée par les couples de points fournit la capacité aérobie et le seuil anaérobie représentés respectivement par a et b de l'équation de la droite.

La description détaillée de chacune de ces deux techniques est présentée au chapitre des méthodes (4.2).

4.1.4.4 Durées optimales des épreuves d'évaluation de la capacité anaérobie

La durée des épreuves de capacité anaérobie, jugée généralement optimale, pour épuiser complètement les réserves anaérobies et pour atteindre la concentration maximale de lactate sanguin, est très variable d'une étude à une autre. Elle varie de 30 s (8) à 120 s (104). D'après Simoneau et al. (175), le test de 30 s est trop court pour épuiser les stocks énergétiques anaérobies, et suggèrent une durée de 90 s. Cependant, lors de travaux plus récents, Medbo et Tabata (140), constatent qu'une épreuve d'une telle durée implique une contribution importante de la capacité aérobie (plus de 50%) dans la libération de l'énergie totale, ce qui remet en cause l'hypothèse de Simoneau et al..

CAPACITE ANAEROBIE

D'après Katch et al. (1978), il n'est pas nécessaire que la durée des épreuves maximales dépasse 40 s. En effet, la quantité de travail réalisé en 40 s est hautement corrélée à celle réalisée en 2 min. D'après ces mêmes auteurs, pour une réserve énergétique donnée, la puissance glycolytique la plus élevée et la déplétion la plus complète de la CAn se situent à la fin d'un test maximal de 30 à 40 s.

Raveneau (1986) a montré pour sa part, que les quantités totales de travail effectué à la 20e et 30e s d'une épreuve maximale, sont hautement corrélées, il a suggéré, de ce fait, de diminuer la durée des tests. D'après cet auteur, une durée de 15 à 20 s serait plus spécifique du métabolisme anaérobie et plus facile à réaliser que des tests de durées plus importantes.

Les divergences dans le choix de la durée optimale des épreuves d'évaluation de la capacité anaérobie rendent bien compte des difficultés liées à l'évaluation de cette qualité.

4.1.5 CHOIX DES ERGOMETRES

L'évaluation, en laboratoire, de la capacité anaérobie nécessite des dispositifs ergométriques appropriés, impliquant prioritairement des groupes musculaires précis. Ceci signifie que les équipements ergométriques doivent être disponibles. Les épreuves peuvent être réalisées, avec des degrés divers de complexité, sur un ergocycle, sur un ergomètre à aviron, sur un tapis roulant etc.. impliquant la mise en jeu de groupes musculaires donnés.

Malgré le degré de sophistication peu élevé de leurs techniques par rapport à celles de laboratoire, les épreuves de terrain sont de plus en plus utilisées pour l'évaluation des processus anaérobies, car elles sont plus proches des conditions de l'entraînement et de la compétition (Mognoni, 1988).

4.1.6 OBJECTIFS

Nous tenterons dans cette étude, réalisée sur le terrain et en laboratoire :

- de mesurer et de comparer quelques paramètres de l'aptitude anaérobie, chez des coureurs de haut niveau, de différentes spécialités,
- de mettre en évidence la nature des sources énergétiques, impliquées dans les épreuves de détermination de la capacité anaérobie proposées par De Bruyn-Prévost (1975), Moritani et al. (1981) et de Mognoni (1988),
- de vérifier la fiabilité et la validité de chacune d'elles pour l'estimation de la capacité anaérobie.

4.2. MATERIEL ET METHODES

4.2.1 POPULATION

45 coureurs, de sexe masculin, appartenant à l'élite sportive sont examinés. Ils sont répartis en cinq groupes conformément à leurs spécialités de courses : 6 coureurs de 5000-10 000 m, 13 de 1500 m, 7 de 400-800 m, 6 de 200-400 m et 13 de 100-200 m. Les valeurs moyennes de leurs âge, poids et taille figurent au tableau 4.1.

Tableau 4.1: Caractéristiques morphologiques des coureurs

	âge (ans)	poids (kg)	taille (cm)
coureurs (n=45)	22,4 ± 4,3	64,3 ± 5,6	173,1 ± 4,9

4.2.2 LE MATERIEL utilisé comprend :

- une bicyclette ergométrique à freinage électromagnétique,
- un dispositif d'enregistrement à distance de la fréquence cardiaque,
- un dispositif de recueil et d'analyse automatiques des gaz respiratoires,
- un appareil d'analyse automatique du lactate sanguin.

4.2.3 METHODES

Les variables étudiées concernent les aspects morphologiques et énergétiques.

Le développement morphologique est apprécié au travers le poids (kg) et la taille (m).

Les qualités énergétiques étudiées concernent la capacité aérobie et la capacité anaérobie appréciées à partir d'épreuves réalisées en laboratoire et sur le terrain.

4.2.3.1 Epreuves de laboratoire

En laboratoire, les qualités énergétiques sont appréciées à partir de la consommation maximale d'oxygène, exprimant la capacité aérobie et à partir de la quantité totale de travail réalisée lors de l'épreuve de Debruyne-Prévost exprimant, selon l'auteur, la capacité anaérobie.

L'utilisation simultanée des résultats de ces deux épreuves, permettra d'apprécier la capacité anaérobie selon la technique de Moritani et al. (1981), qui sera décrite plus loin,

La capacité aérobie est appréciée au travers du VO₂ max. L'épreuve utilisée, à intensité maximale progressivement croissante, est décrite au chapitre 2. (2.2.4.2).

Epreuve d'estimation de la capacité anaérobie de Debruyn-Prévost

La capacité anaérobie est appréciée d'une manière indirecte à partir de l'épreuve de Debruyn-Prévost (1975).

L'épreuve consiste à mesurer la quantité maximale de travail, réalisée sur bicyclette ergométrique, dont la force de freinage et la fréquence de pédalage sont fixées respectivement à 400 watts et 120 rpm.

Sans échauffement préalable, l'épreuve impose au sujet une charge qui est augmentée de 50 à 400 watts au cours des cinq premières secondes. Pendant ce temps le sujet est invité à accélérer sa vitesse pour atteindre le plus rapidement possible la cadence imposée (110 à 120 rpm).

Le chronomètre est enclenché lorsque la charge et le rythme de pédalage prescrits sont atteints. Le sujet doit pédaler à cette intensité le plus longtemps possible, en position assise. L'épreuve est interrompue lorsque le sujet ne peut plus supporter la charge imposée et/ou lorsque la fréquence de pédalage s'abaisse à un niveau inférieur à 80 rpm, ce qui est le signe que le seuil de "l'épuisement" est atteint. Le temps est communiqué aux sujets régulièrement à voix haute; de puissants encouragements lui sont fournis pendant toute la durée de l'effort.

Au cours de l'épreuve, est recueillie la durée (tmax) pendant laquelle le sujet a maintenu la charge prescrite.

A partir de la charge imposée et de la durée de travail, la capacité anaérobie (WAn) est calculée en kgm à partir de la formule suivante :

$$\begin{aligned} \text{WAn (kgm)} &= \text{tmax (min)} \times 400 \times 6,12 = \frac{\text{tmax (s)}}{60} \times 400 \times 6,12 \\ &= 40,80 \text{ t (s)} \end{aligned}$$

où : tmax représente la durée de l'épreuve; 400: puissance imposée en watts; et 6,12: l'équivalent en kgm d'un watt.

WAn est exprimée en kgm, et également rapportée au kilogramme de poids corporel (kgm/kg).

Chez 16 coureurs, un échantillon sanguin est prélevé au niveau du lobe de l'oreille, immédiatement après chacune des deux épreuves de laboratoire, en vue de doser le taux du lactate sanguin atteint en fin d'épreuves.

Technique d'évaluation de la capacité anaérobie proposée par Moritani et al. (1981)

A partir de trois épreuves impliquant différentes sources d'énergie, Moritani et al. proposent une technique permettant d'apprécier simultanément la capacité anaérobie et le seuil anaérobie. Cette technique consiste à placer sur un diagramme, la durée de chacune des trois épreuves en abscisses et la quantité de travail correspondante en ordonnées. Ces trois couples de points déterminent une équation du type :

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

W_{lim} représente le travail maximal, exprimé en kgm, développé lors de l'épreuve,

t_{lim} : durée maximale (s) pendant laquelle le travail W_{lim} pouvant être maintenu,

a : représente la réserve d'énergie disponible dans le muscle (exprimée en kgm), elle correspond à l'énergie contenue dans les phosphagènes et à celle provenant de la glycolyse anaérobie,

b : représente le seuil anaérobie exprimé en kgm/s, il correspond à l'intensité maximale pouvant être soutenue sans accumulation du lactate dans le sang.

Lors de cette étude, nous avons expérimenté cette technique, en utilisant les deux épreuves décrites précédemment, au lieu de trois suggérées par les auteurs. Compte tenu de la linéarité de la relation, deux couples de valeurs suffisent à la déterminer, pourvu que les deux épreuves soient différentes et qu'elles impliquent des processus énergétiques différents, conformément aux recommandations des auteurs.

La droite ainsi tracée, coupe l'axe des y en un point supérieur à zéro, valeur a de l'équation, qui constituerait, d'après les auteurs, un indicateur de la capacité anaérobie.

La pente b de l'équation, caractériserait le seuil anaérobie, qui correspond à l'intensité maximale de l'exercice, pouvant être supportée sans accumulation d'acide lactique.

4.2.3.2 Epreuves de terrain

En plus des deux épreuves de laboratoire décrites précédemment, les sujets sont soumis à quatre épreuves de course, réalisées à vitesse maximale, il s'agit de trois courses à distance fixe (100, 300 et 600 mètres) et d'une épreuve à durée fixe (course de 5 minutes). Si l'on se réfère au tableau 1.1 et compte tenu de la diversité de leurs durées et de leurs intensités, ces épreuves impliquent la mise en jeu les différents processus énergétiques dans des proportions différentes. A cet effet, ces épreuves présentent un double intérêt, elles permettent de tester la validité des épreuves de capacité anaérobie effectuées en laboratoire et d'apprécier la capacité anaérobie en situation de terrain selon la technique de Mognoni (1988).

Les différentes courses se déroulent comme suit :

La course de 5 min, décrite au chapitre 2 (2.2.4.5), consiste à parcourir sur une piste d'athlétisme de 400 m, la plus longue distance possible pendant une durée de 5 min. La distance totale parcourue (mètres) et la durée de l'épreuve (300 secondes) sont prises en considération.

Les épreuves de 100, 300 et 600 mètres consistent à parcourir sur une piste d'athlétisme, des distances de 100, 300 et 600 m, le plus rapidement possible. Le départ étant effectué en position debout. La durée des épreuves est enregistrée au 1/10e de seconde par deux chronomètres. La moyenne des deux mesures est prise en considération.

Au cours de chacune des quatre épreuves de terrain, la fréquence cardiaque est enregistrée en continue, par télémétrie. Seules les valeurs atteintes en fin d'épreuves sont prises en considération.

La technique de Mognoni, adaptée de celle de Moritani et al., consiste à apprécier le seuil anaérobie et la capacité anaérobie, en situation de terrain, à partir de trois courses, réalisées à vitesse maximale, de distances ou de durées différentes.

Le principe de cette technique est semblable à celui de l'épreuve de Moritani et al., avec cependant les particularités suivantes :

- les épreuves se déroulent sur le terrain, elles sont choisies de façon à ce que leurs durées se situent entre 40 et 300 secondes (d'où le choix des courses de 300 m, 600 m et de 5 minutes),

- la technique offre des résultats exprimés en termes de distance et de vitesse.

CAPACITE ANAEROBIE

De la même façon que pour la technique de Moritani et al. les résultats des trois épreuves sont portés sur un diagramme, la distance en ordonnées et la durée en abscisses. La droite formée par les trois couples de points fournit la capacité anaérobie et le seuil anaérobie représentés respectivement par a et b de l'équation:

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

a représente la distance exprimée en mètres, que le sujet peut parcourir en utilisant uniquement sa capacité anaérobie,

b exprimé en m/s, correspond à la vitesse au seuil anaérobie, pouvant être soutenue pendant un temps prolongé, sans accumulation du lactate dans le sang.

L'ensemble des épreuves a été réalisé dans un espace de temps ne dépassant pas une semaine. Les courses de 100 et 300 m sont réalisées durant la même séance, à environ une heure d'intervalle. Les autres épreuves se sont déroulées à des intervalles de temps minimum de 24 heures. Les épreuves de laboratoire sont réalisées au Centre National de Médecine du Sport (Alger), les épreuves de courses au stade olympique d'Alger.

4.2.4 TECHNIQUES STATISTIQUES

D'un point de vue statistique, en plus de la moyenne (m) et de l'écart-type (s), le test t de Student, la comparaison des moyennes de deux séries pairées, l'analyse de la variance (ANOVA) et les corrélations simple et multiple sont utilisées.

Les différences et les corrélations sont jugées significatives si $p < 0,05$, et non significatives pour $p > 0,05$.

4.3. RESULTATS

4.3.1 COMPARAISON DES RESULTATS DE L'EPREUVE DE Debruyn-Prévost AVEC CEUX DE L'EPREUVE PROGRESSIVE DE VO₂ max

Le tableau 4.2 présente les valeurs moyennes de fréquences cardiaques (FC) et du lactate sanguin (AL) enregistrées, chez un échantillon de 16 coureurs, à la fin de deux épreuves maximales, l'une à intensité progressivement croissante et l'autre à charge supramaximale constante.

Les valeurs du lactate sanguin et de la fréquence cardiaque, enregistrées en fin de l'épreuve de Debruyn-Prévost ne diffèrent pas de celles enregistrées en fin de l'épreuve maximale progressive de VO₂ max. De plus, ces séries sont corrélées entre elles ($p < 0,01$), $r = 0,86$ pour la fréquence cardiaque et $r = 0,76$ pour le lactate sanguin.

Tableau 4.2: valeurs moyennes de la fréquence cardiaque (FC) et du lactate sanguin (AL) enregistrées en fin de l'épreuve de VO₂ max et de celle de Debruyn-Prévost.

	FC (bpm)	AL (mmol/l)
épreuve de VO ₂ max	168 ± 14	9,4 ± 2,0
épreuve anaérobie	164 ± 13	8,9 ± 2,7
test t (séries appariées)	$p > 0,05$	$p > 0,05$

4.3.2 DONNEES ENREGISTREES CHEZ LES COUREURS A PARTIR DES EPREUVES DE Debruyn-Prévost ET DE MORITANI

Lors de l'épreuve de Debruyn-Prévost, les cinq groupes de coureurs réalisent une durée moyenne de travail de 36 ± 18 s, correspondant à une quantité moyenne de travail (WAn) de 1475 ± 736 kgm.

Les résultats de cette épreuve sont très dispersés. Le coefficient de dispersion moyen est de 50 %, il se situe entre 16 % chez les coureurs de 200-400 m, et 64 % chez les coureurs de 400-800 m. La variabilité inter et intragroupe persiste lorsque le travail est rapporté au poids corporel.

La comparaison par l'ANOVA de WAn, exprimé en valeurs absolues et relatives, met en évidence une absence de différence significative entre les cinq groupes de coureurs.

La capacité anaérobie (CA_n) définie par la constante a de la relation $W_{lim} = a + b \times t_{lim}$ (Moritani et al.), fournit les mêmes observations que WAn déterminé à partir de l'épreuve de Debruyn-Prévost (tab. 4.3). Il existe, en outre, un lien très

CAPACITE ANAEROBIE

étroit ($r=0,99$) entre ces deux séries de valeurs. CAn est significativement plus basse, elle représente $64,3 \pm 4,4$ % de WAn.

La capacité anaérobie (CAn) telle que définie par Moritani, exprimée en pourcentage de WAn fournit les observations suivantes :

- Ce pourcentage diffère d'une manière significative entre les cinq groupes de coureurs ($p < 0,01$). Il tend à augmenter à mesure de la diminution de la distance de la spécialité. Les coureurs de plus de 1500 m présentent les pourcentages les plus bas (59 ± 3 %), les plus élevés (68 ± 3 %) se retrouvent chez les coureurs de distances comprises entre 100 et 400 m, soit une différence de + 15 %.

- la variabilité intragroupe est très réduite, elle est comprise entre 2 % (chez les coureurs de 200-400 m), et 5 % (5000-10.000 m), la variabilité intergroupe est également peu importante (6 %).

Tableau 4.3 : Données relatives à la capacité anaérobie, estimées à partir de l'épreuve de Debruyne-Prévost (WAn) et à partir de la technique de Moritani et al. (CAn)

spécialités sportives	WAn kgm	CAn kgm	(CAn/W)X100 %
5000-10000 m	1428 ± 704	841 ± 411	59 ± 3
1500 m	1572 ± 926	958 ± 564	61 ± 2
400 - 800 m	1271 ± 807	812 ± 505	65 ± 3
200 - 400 m	1414 ± 228	962 ± 155	68 ± 2
100 - 200 m	1536 ± 610	1049 ± 416	68 ± 3
ANOVA	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p < 0,05$

(CAn/WAn)X100 représente la capacité anaérobie estimée à partir de la technique de Moritani et al. (CAn), exprimée en pourcentages de la capacité anaérobie appréciée à partir de l'épreuve de Debruyne-Prévost (WAn).

Le seuil anaérobie "SA", exprimé par la pente b de l'équation $W_{lim} = a + b \times t_{lim}$, fournit les observations suivantes :

- "SA" diffère d'une manière significative ($p < 0,01$) entre les cinq groupes de coureurs. Ces résultats tendent à diminuer à mesure de la diminution de la distance de la spécialité. Les coureurs de plus de 1500 m présentent les valeurs les plus élevées ("SA" = 164 ± 11 watts), les plus basses se retrouvent chez les coureurs de distances comprises entre 100 et 400 m (SA = 127 ± 8 watts),

- il existe un lien très étroit ($r=0,90$, $p < 0,01$) entre PMA et "SA". "SA" représente 53 ± 3 % de PMA.

CAPACITE ANAEROBIE

Chez les 16 coureurs ayant été soumis au dosage du lactate sanguin, nous avons enregistré des puissances de 151 ± 33 et 225 ± 46 watts, à des taux respectifs de 2 et de 4 mmol/l du lactate sanguin. "SA" moyen déterminé par la technique de Moritani, correspond à 157 ± 14 watts, c'est-à-dire, proche de la puissance correspondant à 2 mmol/l de lactate.

L'analyse corrélationnelle permet de montrer une relation étroite entre "SA" et le seuil à 2 mmol/l de lactate ($r=0,77$), et entre "SA" et le seuil à 4 mmol/l ($r=0,91$).

4.3.3 CAPACITE (CAN₂) ET SEUIL (SA) ANAEROBIES, ENREGISTRES SUR LE TERRAIN A PARTIR DE L'EPREUVE DE Mognoni.

Le tableau 4.4 illustré par la figure 4.1, présente les résultats des épreuves de terrain, enregistrés chez des coureurs de demi fond (n=9) et chez des sprinters (n=9).

Tableau 4.4 : Résultats de l'épreuve de Mognoni, enregistrés chez les coureurs, à partir des épreuves de courses de 300, 600 m et de 5 min.

coureurs 1/2 fond		sprinters		ANOVA
temps (s)	distance (m)	temps (s)	distance (m)	
$39,6 \pm 1,5$	300	$36,5 \pm 0,5$	300	p<0,05
$87,1 \pm 2,6$	600	$89,2 \pm 4,6$	600	p>0,05
300	1793 ± 17	300	1596 ± 127	p<0,05
a	87.6 ± 12.2 mètres	a	144.1 ± 20.0 mètres	p<0,05
b	5.70 ± 0.06 m/s	b	4.86 ± 0.49 m/s	p<0,05

Pour l'ensemble des coureurs examinés, les trois couples de points fournissent l'équation suivante:

$$W_{lim} (m) = 5,28 t_{lim} (s) + 116 \quad r = 0,991$$

où 5,28 représente la vitesse (m/s), correspondant au seuil anaérobie et 116 la capacité anaérobie (CAN₂) exprimée en mètres

Pour les coureurs de demi-fond, l'équation fournit une CAN₂ moyenne de 88 ± 12 m, pour les sprinters CAN₂ est de 144 ± 20 m.

Les valeurs moyennes de fréquence cardiaque, atteintes en fin de chacune des quatre épreuves de course, correspondent à :

- 175 ± 8 bpm en course de 100 m,
- 181 ± 10 bpm en course de 300 m,
- 184 ± 10 bpm en course de 600 m,
- 184 ± 8 bpm en course de 5 minutes.

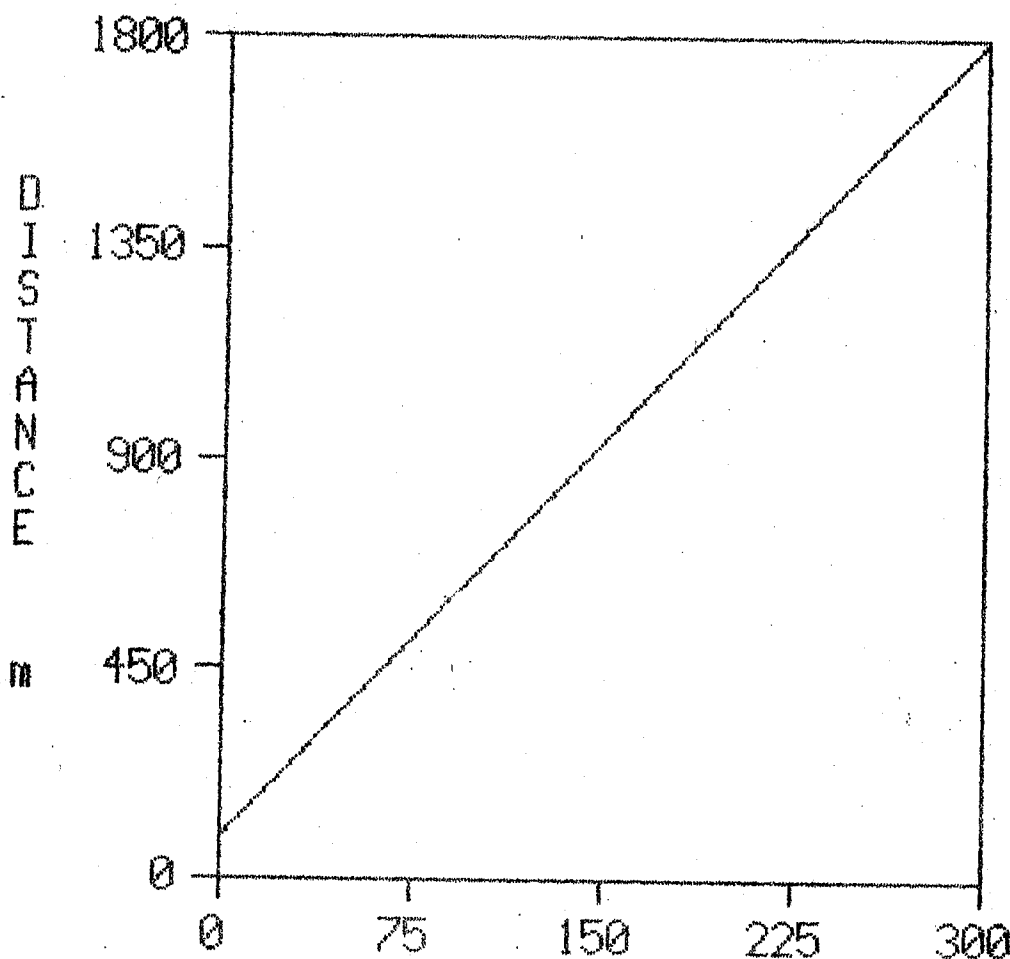


Figure 4.1 : Représentation graphique de la relation distance-durée, calculée chez des coureurs, à partir des courses de 300 et 600 mètres et de celle de 5 minutes.

La distance (en mètres) et la durée (en secondes) de chacune des trois courses sont portées sur le diagramme, respectivement en ordonnées et en abscisses. Ces trois couples de valeurs déterminent une droite du type : $W_{lim} = a + b \times t_{lim}$. La droite ainsi formée, fournit d'après Mognoni, la capacité anaérobie, représentée par la constante a de l'équation et le seuil anaérobie représenté par la pente b .

a représente le nombre de mètres que le sujet peut parcourir en utilisant uniquement sa capacité anaérobie.

b exprime la vitesse maximale de course (m/s), pouvant être soutenue pendant un temps prolongé, sans accumulation d'acide lactique dans le sang.

4.3.4. RELATIONS ENTRE LA CAPACITE ANAEROBIE ET LES AUTRES PARAMETRES ETUDIES

Le tableau 4.5 présente les coefficients de corrélation avec leur degré respectif de signification, entre d'une part, la capacité anaérobie déterminée à partir des méthodes de Debruyn-Prévost (WAN), de Moritani et al. (CAN₁) et de Mognoni (CAN₂) et d'autre part, les résultats des épreuves d'effort (les résultats des courses étant exprimés en vitesse).

Tableau 4.5: coefficients des corrélations calculées entre la capacité anaérobie, (WAN, CAN₁, CAN₂), et les résultats de différentes autres épreuves d'effort

	Debruyn-P. WAN (kgm) r	Moritani CAN ₁ (kgm) r	Mognoni CAN ₂ (m) r
100m	-0.20 (NS)	-0.08 (NS)	0.75 (S)
300m	-0.27 (NS)	-0.15 (NS)	0.84 (S)
600m	0.03 (NS)	-0.09 (NS)	-0.39 (NS)
5min	0.25 (NS)	0.11 (NS)	-0.91 (S)
VO ₂ max	0.27 (NS)	0.12 (NS)	-0.92 (S)
PMA	0.67 (S)	0.53 (S)	-0.80 (S)

Les résultats de épreuves de courses de 100, 300 et 600 m sont exprimés sur le tableau ci-dessus en secondes. Les valeurs de r suivies de NS indiquent l'absence de corrélation significative, celles suivies de S indique une corrélation significative ($p < 0,05$).

Les valeurs de la capacité anaérobie déterminées d'après Debruyn-Prévost (WAN) et d'après Moritani et al. (CAN₁), sont étroitement liées entre elles; elles fournissent les mêmes indications, quant à leurs relations avec les différents autres paramètres étudiés (tab. 4.5), c'est-à-dire :

- qu'elles sont corrélées positivement à la puissance maximale aérobie ($p < 0,05$).
- et qu'elles ne sont pas corrélées à VO₂ max, et aux résultats des épreuves de courses de 5 min, de 100, 300 et de 600 m.

La capacité anaérobie, estimée sur le terrain (CAN₂) à partir de la technique de Mognoni est :

- étroitement corrélée aux résultats des courses de 100 et 300 m ($p < 0,01$); la corrélation est positive,
- elle est également étroitement corrélée aux résultats de la course de 5 min, à VO₂ max et à PMA ($p < 0,01$); la corrélation est négative. Plus CAN₂ est petit et plus la vitesse de course au 5 min, VO₂ max et PMA sont importants et vice-versa.

CAPACITE ANAEROBIE

- CA_{n_2} n'est corrélée ni à WAn ni à CA_{n_1} ; elle n'est pas non plus corrélée à la vitesse de course au 600 m.

L'utilisation de la technique de corrélation partielle a permis de montrer la persistance de corrélations significatives entre CA_{n_2} d'une part et les vitesses développées lors des courses de 100 et 300 m d'autre part, lorsque $VO_2 \max$, PMA ou la vitesse de la course de 5 min sont maintenues constants. Cette même technique confirme l'absence de liaison significative entre CA_{n_2} et la vitesse de la course de 600 m, lorsque les variables précédentes sont maintenues constantes.

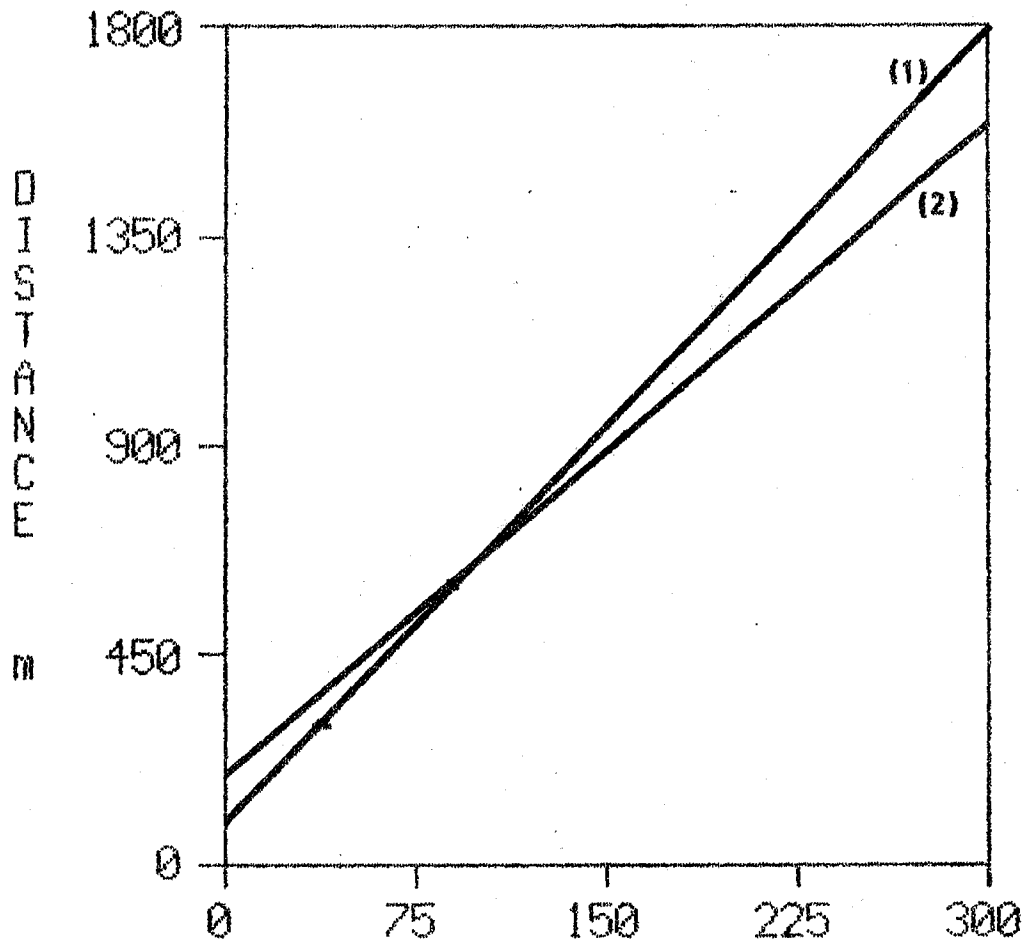


Figure 4.2 : Relation distance-durée, calculée chez des coureurs de demi-fond (1) et chez des sprinters (2), à partir des courses de 300 et 600 m et de celle de 5 min.

4.4. DISCUSSION

Durant ces dernières années, une variété de tests de laboratoire et de terrain a été introduite pour mesurer la capacité anaérobie, parmi lesquels celui de Debruyn-Prévost (55), de Moritani et al. (146), et celui de Mognoni (cité dans 47).

En vue de mettre en évidence la nature des sources énergétiques impliquées dans chacun de ces trois tests et de vérifier la validité de chacun d'eux dans l'évaluation de la capacité anaérobie, nous avons procédé comme suit :

1- Nous avons comparé dans un premier temps, les résultats enregistrés lors de l'épreuve de Debruyn-Prévost par rapport à ceux obtenus chez une même population, lors de l'épreuve de détermination de VO₂ max (tab. 4.2). Compte tenu de son intensité élevée, l'épreuve de Debruyn-Prévost devrait induire une production de lactate plus importante que celle provoquée par l'épreuve de capacité aérobie.

2- Nous avons comparé, ensuite, les résultats de la capacité anaérobie, enregistrés chez les coureurs par spécialité sportive (tab. 4.3). Il est admis, en effet, qu'une épreuve de capacité anaérobie valide, devrait discriminer les athlètes en fonction de leur niveau de développement énergétique anaérobie. Si l'on présume qu'un coureur de 400 m présente une meilleure capacité anaérobie lactique qu'un coureur de 100 ou de 200 m ou qu'un coureur de distances supérieures à 5000 m (87), le test proposé doit permettre une distinction entre des athlètes pratiquant des spécialités différentes. Inversement, dans les sports de longues durées tels que les courses de plus de 5000 m, la participation anaérobie est relativement faible; elle devrait, par conséquent, se manifester chez leurs pratiquants, dans une proportion relativement réduite.

3- Nous avons vérifié, dans un 3ème temps, la fiabilité de cette même épreuve à partir de différentes épreuves de course mettant chacune en jeu préférentiellement, une source énergétique définie (tab. 4.5). Les résultats de l'épreuve de Debruyn-Prévost, devraient être liés à ceux des épreuves sollicitant d'une manière prédominante la capacité anaérobie.

4- À partir des épreuves de laboratoire et de terrain, nous avons apprécié la capacité anaérobie en utilisant deux autres techniques préconisées, l'une par Moritani et al. et l'autre par Mognoni. Les résultats obtenus à partir de ces deux techniques seront comparés entre eux et avec ceux obtenus à partir de l'épreuve de Debruyn-Prévost (tableaux 4.3, 4.4, 4.5).

4.4.1 CAPACITE ANAEROBIE DETERMINEE A PARTIR DE L'EPREUVE DE Debruyn-Prévost

L'épreuve de Debruyn-Prévost permet, d'après son auteur, d'évaluer la capacité anaérobie lactique, par conséquent, la contribution des systèmes aérobie et anaérobie alactique doit être aussi minime que possible. Pour ce faire, un rapport judicieux entre la force, la fréquence et la durée de pédalage est indispensable.

Ce test exige un pédalage sur bicyclette ergométrique à vitesse constante (120 rpm), d'une durée maximale, contre une résistance constante (400 watts). La vitesse et la charge imposées doivent être atteintes en un minimum de temps (ne dépassant pas 5 s) et être maintenues aussi longtemps que possible. Debruyn-Prévost définit la capacité anaérobie lactique comme étant la quantité totale de travail fournie lors de cette épreuve. Compte tenu de sa durée moyenne 40 ± 13 s et de son intensité maximale, cette épreuve semble répondre aux normes et exigences d'un test d'évaluation des processus anaérobies (127).

La capacité anaérobie, déterminée à partir de l'épreuve de Debruyn-Prévost (WAN), exprimée en valeurs absolues et relatives, ne diffère pas significativement entre les cinq groupes de coureurs. Les résultats sont très dispersés, cette dispersion est observée aussi bien d'un groupe à un autre, que d'un sujet à un autre au sein d'un même groupe. De plus, contrairement à ce qui est attendu, les athlètes de longues distances (coureurs de plus de 1500 m) semblent présenter des valeurs moyennes plus élevées, que celles enregistrées chez les coureurs de 400-800 m (tab. 4.3).

La similitude entre les résultats de WAN des coureurs de différentes spécialités, semble être liée au fait que, lors de cette épreuve, les sujets puisent leur énergie aussi bien des processus aérobie qu'anaérobies, dans des proportions liées à leurs caractéristiques physiologiques et métaboliques. En effet, chez les coureurs de longues distances, à VO_2 max élevé et à CAN basse, le pourcentage d'intervention du métabolisme aérobie est probablement plus important que chez les coureurs de courtes distances, caractérisés par un faible VO_2 max et par une capacité anaérobie élevée. Ces observations tendent à souligner l'invalidité de l'épreuve de Debruyn-Prévost pour l'estimation de la capacité anaérobie.

La fiabilité de l'épreuve de Debruyn-Prévost est testée par rapport aux résultats de courses de différentes distances. Compte tenu de leur courte durée et de leur importante intensité, les épreuves de 100 m (d'une durée moyenne de $11,6 \pm 0,7$ s), de 300 m ($37,8 \pm 1,7$ s) et de 600 m ($90,4 \pm 4,6$ s) impliquent respectivement la contribution prédominante de la capacité anaérobie alactique, de la puissance et de la capacité anaérobies lactiques (175, 187).

CAPACITE ANAEROBIE

La corrélation entre WAN et la vitesse des courses de 100, 300 et 600 m (tab. 4.5) n'est pas significative. WAN n'est pas corrélé non plus aux performances des courses de distances comprises entre 100 et 800 m réalisées en compétition. Cette absence de corrélation témoigne du manque de spécificité de ce test et laisse supposer que l'épreuve de Debruyn-Prévost n'est pas un bon indicateur de la capacité anaérobie ni un bon critère prédictif de la performance en courses de courtes distances. Ce test semble être insuffisant pour refléter la capacité maximale du métabolisme anaérobie.

Les résultats absolus et relatifs de l'épreuve de Debruyn Prévost sont corrélés positivement à la puissance maximale aérobie (tab. 4.5). La technique de corrélation partielle confirme cette corrélation lorsque les autres variables (poids, taille, VO₂ max) sont maintenues constantes ($p < 0,01$). Ces observations semblent montrer que WAN tend à exprimer la PMA du sujet plutôt que la capacité anaérobie. Cette constatation est appuyée, d'une part par le fait que les valeurs du lactate sanguin et de fréquence cardiaque, enregistrées en fin de l'épreuve de Debruyn-Prévost sont voisines de celles atteintes en fin de l'épreuve de PMA (tab. 4.2) et que d'autre part, ces deux séries de valeurs sont étroitement corrélées entre elles ($p < 0,01$). Ces différentes observations montrent que l'épreuve de Debruyn-Prévost tend à évaluer la capacité aérobie; cependant, l'absence de relation entre WAN et VO₂ max ainsi que l'importante variabilité intra et intergroupe des résultats de WAN (CV = 50 %) remettent en cause cette hypothèse.

Les différences individuelles concernant PMA, influent sur la durée de l'épreuve de l'épreuve de Debruyn-Prévost et par conséquent sur WAN, du fait que les sujets à PMA élevée réalisent de meilleurs résultats que ceux dont PMA est basse. La spécificité de WAN comme indicateur de la capacité anaérobie se détériore de ce fait, au fur et à mesure que la durée de l'épreuve augmente, notamment par la participation progressive du processus aérobie.

Cette constatation est appuyée par plusieurs études dont celle de Medbo et Tabata (140), qui montre que le taux de participation du processus aérobie, dans la fourniture totale d'énergie, tend à augmenter avec la durée de l'épreuve. Le processus aérobie fournit, d'après ces auteurs, au moins 40 % de l'énergie libérée pour un exercice intense d'une durée de 30 s, ce taux passe de 50 à 65 %, pour des exercices de durées respectives de 1 et 2 min.

Compte tenu de l'importante étendue de la durée de l'épreuve de Debruyn-Prévost, comprise entre 5 et 95 s, il ne semble pas qu'il y ait, lors de cette épreuve, prédominance d'un processus énergétique déterminé. Etant donné l'importante

variabilité de sa durée, cette même épreuve peut impliquer préférentiellement, à tour de rôle, les trois sources de reconstitution de l'ATP (phosphagènes, glycolyse anaérobie ou processus aérobie). La nature de la principale source énergétique sollicitée est liée à la durée de l'épreuve maximale conformément au tableau 1.1 et à la figure 1.4.

La durée d'un test d'évaluation de la capacité anaérobie est un facteur critique. Pour assurer un degré élevé de spécificité et impliquer au maximum le processus anaérobie, un test de capacité anaérobie doit être intense et de durée brève, autrement on assisterait à une participation plus importante du processus aérobie, c'est ce qui semble se manifester lors de l'épreuve de Debruyne-Prévost chez les coureurs de longues distances.

En plus de la durée de l'épreuve, les caractéristiques morphologiques en particulier le poids corporel, semblent influencer la validité des résultats d'un test. En effet, les résultats de WAn exprimés en valeurs absolues et relatives sont corrélés positivement aux paramètres anthropométriques (poids, taille et pourcentage de graisse). La technique de corrélation partielle confirme le lien entre WAn exprimée en valeur absolue et le poids corporel lorsque les autres paramètres morphologiques sont maintenus constants ($p < 0,01$). Le poids corporel intervient à 31% de la capacité totale de travail ($p < 0,01$); l'influence du pourcentage de graisse (1,6%) et de la taille (1,8%) n'est pas significative. Ces données suggèrent que les sujets plus lourds, caractérisés dans cette étude par une masse musculaire importante, sont capables de produire une plus grande intensité de travail en un laps de temps court. Ces observations concordent avec celles rapportées par de nombreux auteurs dont Sharp et al. (186), qui notent de bonnes corrélations entre les données biométriques et la puissance anaérobie obtenue sur ergocycle.

Etant donné que le poids corporel intervient dans une large proportion dans les variations de la capacité anaérobie, l'épreuve de Debruyne-Prévost aurait été probablement un meilleur indicateur de la capacité anaérobie, si le poids était pris en compte lors de l'application de la charge. Cette recommandation a été également formulée par de nombreux auteurs (45, 104, 155), pour d'autres types d'épreuves de capacité anaérobie. La méthode basée sur l'application d'une charge fixée en fonction du poids corporel du sujet semble, selon cet auteur, plus valide que celle qui consiste à appliquer une charge standard puis à exprimer ensuite les résultats de ce test en valeurs relatives au poids corporel.

4.4.2 CAPACITE ANAEROBIE DETERMINEE A PARTIR DE LA
TECHNIQUE DE MORITANI et al.

Se basant sur des travaux antérieurs et notamment sur celui de Monod et Scherrer (143), Moritani et al. admettent que la libération totale d'énergie augmente de façon linéaire avec la durée de l'exercice, elle correspond à la somme de deux composantes, l'une d'origine aérobie, proportionnelle à la durée de l'exercice et l'autre constante, qui nous intéresse ici, d'origine anaérobie, indépendante du temps.

Cette constante représente, d'après les auteurs, la réserve énergétique disponible dans le muscle lui-même, rapidement mobilisable, correspondant aussi bien à l'énergie contenue dans les composés phosphorés (ATP et CP) qu'à celle provenant de la dégradation anaérobie du glycogène ou de l'utilisation de ce substrat dans les réactions aérobies au contact de la myoglobine (144).

Lors de cette étude nous avons tenté d'apprécier la capacité anaérobie à partir de cette technique, en utilisant le travail cumulé fourni lors de l'épreuve de VO₂ max et le travail total fourni lors de l'épreuve de Debruyn-Prévost.

La capacité anaérobie (CAN₁), déterminée à partir de cette technique, fournit les mêmes observations que celles résultant de la capacité anaérobie estimée à partir de l'épreuve de Debruyn-Prévost (WAN), à savoir :

- importante dispersion des résultats, au sein des spécialités de courses. Les coefficients de dispersion intragroupe sont de mêmes ordres de grandeurs que ceux de WAN,
- CAN₁ n'est pas une donnée discriminante des coureurs par spécialité.

De plus, CAN₁ est étroitement corrélée à WAN ($p < 0,01$), elle représente 64 ± 4 % de cette dernière.

Ceci semble montrer que la capacité anaérobie, estimée à partir de la technique de Moritani, est hautement influencée par les épreuves qui composent cette technique.

Compte tenu que l'épreuve de Debruyn-Prévost, telle qu'elle est pratiquée, s'est avérée un mauvais indicateur de la capacité anaérobie, CAN₁ ne peut, par conséquent, constituer une donnée fiable, lorsque la technique de Moritani se base sur cette épreuve.

L'épreuve de Moritani fournirait, probablement, des données satisfaisantes de capacité anaérobie, si l'épreuve de Debruyn-Prévost prenait en considération le facteur poids corporel, comme cela a été suggéré précédemment.

4.4.3 CAPACITE ANAEROBIE DETERMINEE A PARTIR DE LA TECHNIQUE DE Mognoni

Compte tenu des difficultés de mesure de la capacité anaérobie en laboratoire, liées notamment à la diversité et divergences des techniques utilisées, à l'importance des moyens requis non accompagnés des résultats escomptés et compte tenu des limites du matériel, actuellement disponible, les tests de terrain sont de plus en plus utilisés. Ces tests, qui ont l'avantage de se rapprocher des conditions de l'entraînement, ne requièrent pas d'appareillage particulier. Ces tests consistent généralement à courir le plus vite possible une distance donnée. Les distances sont choisies, sur la base du schéma de Howald 1978 (fig. 1.4) de façon à ce que la contribution des processus anaérobies dans la libération d'énergie soit prédominante. Ces épreuves, demeurent néanmoins relativement empiriques car ne tenant pas compte des caractéristiques énergétiques individuelles.

A partir de ces considérations et compte tenu de l'intérêt pratique des épreuves de terrain, Mognoni modifie la technique de Moritani pour l'adapter sur le terrain. Aussi, il nous a semblé utile d'expérimenter cette technique et de vérifier sa validité.

La capacité anaérobie (CA_{N_2}) est déterminée selon la technique de Mognoni à partir des épreuves de courses de 300 et 600 mètres et à partir de la course de 5 minutes, réalisées à vitesse maximale. Ces trois épreuves, de durées moyennes respectives de $38,0 \pm 2,0$; $88,2 \pm 4,0$ et 300 s, semblent répondre aux recommandations de l'auteur, qui portent notamment sur l'utilisation d'épreuves impliquant des processus énergétiques différents dont la durée se situe entre 40 et 300 s.

Les distances et durées correspondantes de ces épreuves forment une droite linéaire avec un coefficient de corrélation hautement significatif. L'équation de cette droite obtenue chez l'ensemble des coureurs est du type :

$$W_{lim} = 5,28 t_{lim} + 116 \quad r = 0,991$$

La capacité anaérobie (CA_{N_2}), correspond d'après Mognoni, à 116 ± 33 mètres avec des valeurs extrêmes de 78 et 171 m. Si l'on se réfère aux vitesses moyennes développées lors des courses de 100 et 300 m, la durée moyenne d'épuisement des processus anaérobies correspond à 14 s avec des valeurs extrêmes de 10 et 21 s. D'après le tableau 1.1, de telles durées impliquent une participation de près de 85 % des processus anaérobies dans la libération d'énergie. Les durées enregistrées par cette technique couvrent la durée optimale (15 à 20 s) suggérée par Raveneau (165) pour l'évaluation de la capacité anaérobie.

CAPACITE ANAEROBIE

CAN₂ obtenue chez les coureurs de courtes distances (144 ± 20 m) est significativement plus élevée que celle enregistrée chez les coureurs de moyennes distances (88 ± 12 m), ces distances correspondent à des durées moyennes respectives de 17 et de 11 s. Cela signifie que les coureurs de courtes distances sont capables de parcourir une distance moyenne de 144 mètres en utilisant exclusivement leurs processus anaérobies (phosphagènes et glycolyse anaérobie), contre 88 m pour les coureurs de moyennes distances, autrement dit, les réserves anaérobies permettent aux premiers d'assurer un exercice intense pendant une durée de 17 s, contre 11 s pour les seconds.

Contrairement à l'épreuve de Debruyn-Prévost et de celle de Moritani et al. (telle qu'elle a été réalisée dans cette étude), l'épreuve de Mognoni permet de distinguer les coureurs par spécialité de course. Les coureurs de courtes distances, caractérisés théoriquement, par une capacité anaérobie élevée, présentent une CAN₂ élevée par rapport aux coureurs de moyennes distances, dont la spécialité n'exige pas un niveau élevé de capacité anaérobie.

En outre, les coefficients de dispersion intragroupe de CAN₂ (14 %), relativement faibles par rapport à ceux observés pour WAn (50 %) et pour CAN₁ (50 %), témoignent en faveur de la validité de cette technique pour l'estimation de la capacité anaérobie. Compte tenu des faibles coefficients de dispersion, les valeurs extrêmes de CAN₂ ne sont pas affectées d'une manière significative par les processus aérobie, qui selon Medbo et Tabata (140), interviennent d'une manière relativement importante dès la quinzième seconde de l'exercice intense. L'importance des valeurs moyennes de la fréquence cardiaque enregistrée en fin des épreuves de course (95 % de FC max lors de la course de 100 m, 98,5 % lors du 300 m, et 100 % pour le 600 m) appuie cette hypothèse.

CAN₂ est liée positivement aux épreuves de type anaérobie (courses de 100 et 300 m), et négativement aux épreuves de type aérobie (course de 5 min, VO₂max et PMA). Ces corrélations suggèrent que CAN₂ et les résultats des courses de 100 et 300 m mesurent une même qualité métabolique. Compte tenu que les épreuves de 100 et 300 mètres impliquent la participation prédominante des processus anaérobies, ces observations sont en faveur de l'utilisation de CAN₂ comme indicateur de la capacité anaérobie.

Par ailleurs, il existe d'étroites interrelations entre CAN₂ et les résultats des courses de 100 et 300 m (p<0,01). Les degrés élevés de signification des corrélations entre CAN₂ d'une part et les résultats des courses de 100 et 300 m persistent, lorsque la capacité aérobie, exprimée par VO₂ max, par PMA ou

CAPACITE ANAEROBIE

par la vitesse de la course de l'épreuve de 5 min, est maintenue constante ($p < 0,01$). Ceci semble montrer d'une part, l'absence d'influence de la capacité aérobie sur CAN_2 , et que d'autre part, la capacité anaérobie peut être estimée, d'une manière indifférente, soit à partir de CAN_2 , soit à partir de la vitesse développée lors des épreuves de 100 ou de 300 m. Cependant, compte tenu de son double intérêt (mesures simultanées de la capacité anaérobie et du seuil anaérobie), la technique de Mognoni paraît plus utile.

CAN_2 est liée négativement aux résultats de la course de 5 minutes, à VO_2 max et à PMA ($p < 0,01$), autrement dit, une CAN_2 élevée d'un coureur, est associée à une faible capacité aérobie chez ce coureur. Ceci confirme l'antagonisme, présenté au chapitre 2., entre les processus anaérobies représentés par CAN_2 et les processus aérobie exprimés par la vitesse de course au 5 min, VO_2 max et par PMA.

CAN_2 n'est liée ni à WAN , ni à CAN_1 , ce qui confirme les réserves émises précédemment, quant à la validité de WAN et de CAN_1 pour l'appréciation de la capacité anaérobie.

Le fait que CAN_2 n'est pas corrélée aux résultats de la course de 600 m et que la fréquence cardiaque atteinte en fin de cette course soit voisine de celle atteinte en fin de la course de 5 min, signifie probablement que la course de 600 m met en jeu d'une manière préférentielle la capacité aérobie. Cette hypothèse est confirmée par l'existence de corrélations significatives entre la vitesse de cette course et la capacité aérobie.

La technique de Mognoni, présente l'avantage d'être une épreuve de terrain, s'effectuant dans des conditions proches de celles de l'entraînement et de la compétition des coureurs. Elle semble, en outre, fournir des résultats intéressants, répondant aux caractéristiques énergétiques des coureurs, par spécialité. Compte tenu de l'indisponibilité de techniques de mesures, plus directes et moins contestées, de la capacité anaérobie, la technique de Mognoni semble être une mesure valide et fiable de la capacité anaérobie et mérite d'être utilisée et enrichie par des références utiles.

4.5 CONCLUSION

Les épreuves étudiées dans ce chapitre, évaluent d'une manière indirecte la capacité anaérobie, au laboratoire et sur le terrain, à partir de la durée maximale que peut soutenir un sujet lorsqu'il effectue un exercice à intensité maximale (épreuve de Debruyn-Prévost), à partir de la vitesse maximale que peut développer le sujet lorsqu'il effectue une course intense d'une distance donnée (courses de 100 et 300 mètres), et à partir de la combinaison d'épreuves de différentes intensités et durées, réalisées en laboratoire (technique de Moritani et al.), ou sur le terrain (technique de Mognoni).

Des informations supplémentaires peuvent être enregistrées lors de la réalisation de ces épreuves telles que la mesure du déficit en oxygène et du lactate sanguin. Mais il faut conserver à l'esprit que ces paramètres ne sont pas des mesures directes de la capacité anaérobie, mais reflètent plutôt les conditions dans lesquelles ces mesures sont réalisées.

Les résultats enregistrés lors de ces épreuves indirectes ne sont pas satisfaisants. Ces épreuves comportent, en effet, certaines limites liées notamment à l'influence de la motivation des athlètes, à leurs caractéristiques morphologiques et à leur capacité aérobie.

La motivation du sujet peut influencer les données, particulièrement chez les sujets non motivés qui interrompent souvent l'épreuve avant l'épuisement de leur capacité anaérobie. Les rapports segmentaires et le poids du sujet peuvent également affecter l'efficacité du travail. La capacité aérobie joue un rôle de plus en plus important, dès les 15 premières secondes de l'exercice, au fur et à mesure de l'importance de la durée de l'exercice. Le métabolisme aérobie peut contribuer, selon des études récentes, à un taux de 50 % dans la libération d'énergie, lors d'un travail intense d'une durée de 60 secondes.

De cette étude, il semble difficile de situer la part relative des processus anaérobie et aérobie dans la libération de l'énergie requise pour l'épreuve intense, de même qu'il est difficile de connaître avec précision la part relative des phosphagènes et de la glycolyse anaérobie dans ce type d'épreuve. C'est cette difficulté de définir les limites des trois sources d'énergie qui rend complexe l'interprétation énergétique des résultats.

Ces inconvénients rendent difficiles les comparaisons interindividuelles. Cependant, les résultats issus de ces épreuves peuvent être utiles notamment pour apprécier l'influence d'un programme d'entraînement spécifique sur l'état de développement des qualités anaérobies sollicitées par la spécialité pratiquée, sans toutefois pouvoir identifier la nature précise de cette influence.

Conclusion

Cerner les exigences d'une spécialité sportive, déterminer le profil physiologique d'un athlète et suivre l'évolution de l'adaptation de ses fonctions, constituent une préoccupation importante de tout physiologiste de l'exercice.

Le profil physiologique des athlètes de haut niveau ainsi que les exigences de leurs spécialités sont appréciés, dans la présente étude, à partir de leurs qualités bioénergétiques (consommation maximale d'oxygène, seuil anaérobie, capacité anaérobie) et des différents paramètres physiologiques qui les sous-tendent.

L'aspect énergétique aérobie est apprécié à partir de la mesure de la consommation maximale d'oxygène (VO_2 max). Les données enregistrées montrent que l'ensemble des disciplines sportives étudiées sollicite d'une manière importante le métabolisme aérobie, mais à des degrés qui diffèrent selon le type de sport pratiqué et le niveau de performance atteint.

Les athlètes pratiquant des disciplines sportives qui requièrent un effort intense et soutenu pendant plus de deux minutes possèdent les capacités aérobies les plus élevées. C'est le cas des coureurs de distances supérieures ou égales à 800 m, des cyclistes sur route et des rameurs. Inversement, les athlètes pratiquant des disciplines de durées très brèves ou intermittentes, présentent des valeurs de VO_2 max plus basses, mais toujours supérieures à celles des sédentaires.

Au sein d'une même discipline sportive qu'est la course à pied, l'importance de la capacité aérobie diffère d'une spécialité à une autre. VO_2 max du coureur augmente au fur et à mesure de l'augmentation de la distance de sa course. Cependant, à partir de la distance de 5.000 m, la tendance à l'augmentation de VO_2 max ne se poursuit plus. Au delà de cette distance, un niveau élevé de VO_2 max ne suffit donc plus à assurer un apport suffisant d'énergie. D'autres indices, tels que le seuil anaérobie, témoignent d'un approvisionnement énergétique quasi exclusivement aérobie dans la réalisation d'épreuves de longues durées, avec une participation très modeste des processus anaérobies.

CONCLUSION

La consommation maximale d'oxygène peut permettre de prédire la performance chez les athlètes, dans les épreuves intenses et soutenues. Les athlètes qui présentent des valeurs de VO₂ max, très au-dessus de la moyenne, réussissent généralement mieux dans ce type d'épreuves.

VO₂ max peut être amélioré par l'entraînement, dans des proportions notables, même chez les athlètes de haut niveau. L'évaluation de VO₂ max, chez un groupe coureurs, à deux reprises, dans un intervalle de dix années, a permis de relever des améliorations moyennes de VO₂ max de 15 % .

Chez les athlètes très entraînés, VO₂ max peut, cependant, rester le même pendant plusieurs années successives, malgré un entraînement sévère et régulier. Chez des athlètes d'équipes nationales, VO₂ max est resté le même, pendant quatre années successives, alors que leurs performances se sont améliorées de 5 % en moyenne.

L'entraînement à ce niveau de performance, s'il n'améliore pas VO₂ max, permet en revanche, de le maintenir à un haut niveau, tout en améliorant, chez les athlètes, leur capacité d'en utiliser une plus grande fraction.

L'étude des aspects pratiques de VO₂ max offre également un intérêt certain. Lors d'une étude préliminaire, l'utilisation de l'épreuve classique de Petit et al. (1962) a permis de relever certains inconvénients liés, notamment, à sa longue durée.

En vue de réduire la durée de cette épreuve, nous avons élaboré et validé un protocole à accroissement progressif et continu de la charge (5 W/min) permettant la mesure de VO₂ max avec une durée deux à trois fois plus courte. En outre, compte tenu du nombre élevé de ses paliers, ce protocole, par l'obtention d'un plus grand nombre de valeurs, permet d'obtenir des courbes plus précises, exprimant l'évolution de paramètres physiologiques à l'effort.

Les techniques de mesure directe présentent certains inconvénients liés principalement à son coût élevé; aussi, une technique de mesure indirecte moins coûteuse, a-t-elle été mise au point. L'estimation de VO₂ max à partir de cette technique est fondée sur les relations observées entre VO₂ max, et d'autres variables plus aisément mesurables, telles que la fréquence cardiaque et la charge de travail.

Cette technique offre la possibilité d'estimer VO₂ max :
- soit, à partir d'une épreuve sous-maximale à charge progressivement croissante, utilisant dans ce cas le nomogramme (fig. 2.7), élaboré à partir des relations enregistrées entre

CONCLUSION

VO₂ max et l'allure des courbes de FC en fonction de la puissance,

- soit, à partir de cette même épreuve, poursuivie jusqu'à "épuiement" du sujet, utilisant la relation liant VO₂ max à la puissance (P) atteinte en fin de l'épreuve, exprimée par l'équation suivante :

$$\text{VO}_2 \text{ max (l/min)} = 0,0129 P \text{ (watts)} + 0,50, S_{xy} = \pm 5,1 \%$$

En vue de permettre aux "hommes de terrain" de prendre en charge, eux-mêmes et d'une manière régulière, l'évaluation de leurs athlètes, une technique de mesure, de terrain, est mise au point. Cette technique, simple, ne nécessitant aucun équipement, est fondée sur l'étroite relation observée, entre VO₂ max et la vitesse développée, lors d'une course d'une durée de 5 minutes. Cette relation du type :

$$\text{VO}_2 \text{ max (ml/kg.min)} = 340,6 - 34,14 v \text{ (km/h)} + 1,01 v^2$$

permet d'estimer VO₂ max avec une précision de $\pm 5,0 \%$, pour des vitesses de course comprises entre 16,5 et 22,7 km/h.

A un haut niveau de pratique sportive, VO₂ max présente une faible valeur discriminante, chez les athlètes d'endurance. A valeurs voisines de VO₂ max, les coureurs de fond se distinguent des coureurs de demi-fond, principalement par leur niveau plus élevé de seuil anaérobie.

Chez les athlètes d'endurance, l'amélioration de la performance peut être expliquée, entre autres, par l'importance de leur VO₂ max, de leur seuil anaérobie, ou des deux. Ceci souligne la nécessité de veiller au développement simultané de ces deux indices, chez les athlètes d'endurance, en tenant compte des particularités de leurs spécialités, de leurs niveaux de pratique et de leur période de préparation.

L'identification du seuil anaérobie se base généralement sur des techniques invasives; des méthodes non invasives sont actuellement de plus en plus utilisées.

La technique de mesure du seuil anaérobie qui se base sur la relation qui existe entre la fréquence cardiaque et la vitesse de course est contestée par de nombreux auteurs. Nos observations n'autorisent pas l'utilisation de cette méthode. Moyennant certaines améliorations d'ordre méthodologique, cette technique pourrait être utilisée avec profit dans le cadre de la surveillance physiologique de l'athlète.

CONCLUSION

Les variables respiratoires et d'échanges gazeux sont les indices non invasifs, les plus répandus pour repérer le seuil anaérobie (29, 76, 128), cependant, l'unanimité n'est pas observée quant au choix de la variable la plus sensible et la plus fiable pour l'estimation du seuil anaérobie.

Lors de cette étude, la cassure des courbes de VE, VCO₂, FR et de VC, en fonction de la charge ou de VO₂, s'effectue simultanément chez un même sujet. Ceci suggère que le seuil anaérobie, peut être apprécié d'une manière équivalente à partir de l'une de ces quatre variables.

L'identification précise du point "d'assaut" de ces variables, en fonction de la charge, requiert l'enregistrement d'un nombre suffisant de points, pour tracer une courbe aussi fine que possible. Aussi, l'utilisation du protocole à accroissement progressif et continu de la charge (5 W / 12 s), élaboré à l'occasion de cette étude, est appropriée.

Les équivalents respiratoires pour l'O₂ (VE/VO₂) et pour le CO₂ (VE/VCO₂) évoluent en trois phases. Chez un sujet donné, ces trois phases ne sont pas bien délimitées, ce qui rend difficile l'identification du seuil anaérobie à partir de l'une ou l'autre des deux variables, et montre, contrairement aux observations de certains auteurs (29, 52, 129), que ces deux indices sont moins sensibles que VE, VCO₂, VC ou FR pour la détermination du SA.

Pour de nombreuses disciplines sportives, la capacité aérobie et le seuil anaérobie, constituent les principaux indicateurs des possibilités compétitives des athlètes. Pour d'autres, ces qualités sont de moindre importance, et pour lesquelles la capacité anaérobie constitue la principale source d'approvisionnement énergétique.

La capacité anaérobie peut être évaluée d'une manière indirecte, à partir de la durée maximale que peut soutenir un sujet lorsqu'il effectue un exercice à intensité maximale (épreuve de Debruyne-Prévost, 1975), et à partir de la combinaison d'épreuves maximales de différentes durées, réalisées en laboratoire (technique de Moritani et al., 1981), ou sur le terrain (technique de Mogroni, 1988).

Nos données, en accord avec celles d'autres études (45, 140), mettent en évidence certaines insuffisances du test de Debruyne-Prévost le rendant inapproprié pour la mesure de la capacité anaérobie. La spécificité de cette épreuve, comme indicateur de la capacité anaérobie, se détériore au fur et à mesure de l'augmentation de la durée de l'épreuve, du fait de l'influence progressive de la capacité aérobie. Ce test manque de spécificité, et n'est pas un bon indicateur de la capacité anaérobie.

CONCLUSION

Une deuxième tentative d'évaluation de la capacité anaérobie, entreprise à partir de la technique de Moritani et al. (1981), fournit les mêmes observations que celles fournies par l'épreuve de Debruyn-Prévost (55). Ceci est probablement lié au fait que l'évaluation de la capacité anaérobie est hautement influencée par les épreuves utilisées. L'épreuve de Debruyn-Prévost, s'étant avérée un mauvais indicateur de la capacité anaérobie, la technique de Moritani ne peut, par conséquent, fournir des données fiables, lorsqu'elle utilise une telle épreuve.

Les résultats obtenus à partir de la technique de Mognoni, semblent refléter la capacité anaérobie. Différentes observations sont en faveur de la validité de cette technique et de la fiabilité de ses résultats, parmi lesquelles :

- les résultats permettent de distinguer les athlètes à potentiel énergétique différent.
- Les résultats sont liés positivement aux épreuves de type anaérobie, et négativement aux épreuves de type aérobie.

Etant donné sa validité, et sa fiabilité, la technique de Mognoni mériterait d'être étendue à de plus larges populations d'athlètes, et enrichie par des références utiles.

Compte tenu de l'importance de l'évaluation en milieu sportif, une grande partie du présent travail concerne la mise au point et/ou la validation de techniques de mesure des principales qualités physiologiques.

Outre leur validité, l'apport des techniques mises au point, réside notamment dans leur simplicité et leur coût peu élevé par rapport à celles existantes.

Ces techniques peuvent être utilisées pour définir l'état de l'athlète à un moment déterminé, pour apprécier son évolution les tests devraient être répétés. Nous savons, en effet, que tout entraînement répété et soutenu, améliore les performances d'une quantité x , par conséquent, chaque séance ou groupes de séances entraîne une amélioration (δx) qu'il convient d'apprécier afin d'optimiser l'efficacité de la préparation sportive. Tout comme le système pédagogique où chaque cours apporte des connaissances ou un savoir faire nouveau qui, en s'accumulant, formeront l'expert. Ces connaissances sont régulièrement appréciées à travers les différents types de contrôles de connaissances (contrôles continus, examens partiels, semestriels etc..).

Lors de l'évaluation physiologique des athlètes, il y a lieu de souligner que la répétition de mesures dans des conditions apparemment identiques, peut conduire à des résultats différents. Une variabilité d'origine biologique ou expérimentale peut être observée.

CONCLUSION

Avec Brooks et Fahey (25), on admet que, comparativement aux autres sciences, la physiologie de l'exercice et plus précisément l'évaluation, est encore au stade de l'enfance. A titre d'exemple, les tests ne permettent pas de déterminer les potentialités génétiques et pas voie de conséquence, les qualités à développer. En outre, une imprécision des techniques de mesure physiologique ($\pm 5\%$) est tout à fait admise, chez les athlètes de haut niveau, alors que la précision des records atteint $\pm 0,1\%$ sur une course de 100 m par exemple.

Avec l'affinement permanent des instruments de mesures, le développement de la technique de résonance magnétique nucléaire, et de celui d'autres techniques, l'espoir est fondé sur la possibilité d'une exploration physiologique plus fine et plus précise.

Par ailleurs, l'évaluation physiologique fait partie de l'évaluation globale de la préparation de l'athlète. Or, la performance, dans un sport donné, résulte de l'interaction optimale de plusieurs facteurs. Ainsi, les aspects physiologiques mesurés ne sont qu'un élément dans l'explication de la performance sportive. Ceci souligne les limites d'un pronostic basé sur une ou même plusieurs variables physiologiques, tout particulièrement dans les disciplines où les qualités énergétiques sont reléguées à un rôle secondaire telles que les sports impliquant prioritairement la technique et la coordination, comme par exemple, la gymnastique et le plongeon.

Avec le développement des connaissances physiologiques et leur enrichissement par les données d'autres sciences comme la biomécanique, ou la psychologie, des éléments variés et disparates viendront, comme dans une mosaïque, s'assembler pour fournir une explication globale de la performance.

Enfin, l'évaluation implique des aspects organisationnels et économiques. Quelque soit le système sportif du pays, la réalisation d'épreuves variées et complexes, répétées sur une population relativement nombreuse, a des incidences financières importantes et une immobilisation régulière des athlètes. Ces aspects imposent des choix entre l'utilisation exclusive ou partielle, par les athlètes de haut niveau, de la structure d'évaluation. Aussi, en vue de réduire le coût de l'évaluation chez les athlètes de haut niveau et d'élargir les mesures à de plus larges populations d'athlètes, les techniques indirectes, de laboratoire et de terrain, telles que celles mises au point, pourraient être utilisées. Ces techniques constitueraient les techniques de base pour les populations sportives générales, et des techniques d'appoint, complémentaires aux techniques de mesure directe, chez l'élite.

CONCLUSION

Chaque année, on observe des améliorations de la performance dans presque toutes les disciplines sportives. On explique généralement ce phénomène par l'accroissement des charges d'entraînement et du nombre de compétitions, de sorte que les individus qui possèdent un potentiel génétique et une préparation physique appropriés sont plus à même de se distinguer.

On s'interroge souvent jusqu'à quel point une qualité physiologique exceptionnellement élevée des athlètes est-elle déterminée par la pratique sportive ? De toute évidence un tel niveau de développement n'est pas le seul résultat de l'entraînement, l'hérédité pourrait expliquer une grande part des différences interindividuelles des qualités bioénergétiques.

Bien que l'on ne sache pas très clairement distinguer la part de l'inné de celle de l'acquis, on sait qu'il est possible d'améliorer ces qualités par l'entraînement. Cependant une bonne part, difficilement quantifiable, de cette amélioration semble être liée au génotype, probablement en raison de la constitution histologique et biochimique des fibres musculaires, elle-même étroitement liée au caractère héréditaire (113, 114).

La pratique sportive de haut niveau requiert généralement des qualités physiologiques de base, à un niveau déterminé, supérieur à la moyenne des sujets sédentaires. Ces qualités peuvent être développées par un entraînement spécifique et soutenu.

Les contrôles initiaux, réalisés dans le cadre de l'orientation et/ou de la sélection sportives, permettent d'apprécier le niveau de départ de populations "douées". L'évaluation, au cours de la préparation sportive, de ces qualités permet d'apprécier les possibilités de leur amélioration, d'où le principe qu'une sélection ne devrait être une action isolée, mais suivie dans le temps.

La pratique sportive de haut niveau est, à l'état initial, le produit d'une sélection. Ne viennent à un sport donné, que les sujets présentant les caractéristiques de base nécessaires à la pratique sportive d'une manière générale.

L'entraînement spécifique, effectué après incorporation dans une discipline sportive donnée, engendre des améliorations notables aussi bien de la technique gestuelle, de l'habileté que des caractéristiques physiologiques qui nous intéressent ici.

On considère, très schématiquement, qu'un athlète traverse trois phases importantes avant d'atteindre le haut niveau de performance, il s'agit de l'initiation sportive, de la pratique sportive compétitive, et de la pratique sportive de haut niveau.

CONCLUSION

Quelle que soit la spécialité sportive, on admet que les qualités de base d'un sujet sain, sont suffisantes pour passer du stade 1 au stade 2.

Au stade 2, les sujets se présentent avec un certain potentiel lié aussi bien aux aspects génétiques qu'à leurs activités physiques spontanées ou organisées.

Au cours de ce stade, on peut observer, chez l'athlète, une amélioration considérable des qualités physiologiques sollicitées par l'entraînement et par la compétition. De même qu'on peut observer des relations entre ces qualités et la performance sportive, toute chose étant égales par ailleurs. A ce stade de pratique sportive, l'entraînement vise l'amélioration des variables physiologiques et des autres qualités. A ce niveau de performance on peut observer des améliorations moyennes, des variables physiologiques, avoisinant 15 % et atteignant parfois 40 % (90, 160, 171).

Par contre, au stade 3, une fois le niveau maximal de ces qualités physiologiques atteint, probablement par la limite des variables physiologiques qui les sous-tendent, l'entraînement vise, le maintien de ces qualités à un niveau maximal, tout en développant d'autres facteurs tels que la technique et l'habileté.

Si deux coureurs de 1500 mètres, par exemple, présentent, au stade 2, des valeurs différentes de VO_2 max, on peut, avec un faible risque d'erreurs, prédire la performance de chacun d'eux et prévoir lequel des deux réalisera le meilleur résultat. En revanche, au stade 3, on ne peut pas dire lequel réalisera la meilleure performance. L'estimation de la performance à partir de la seule mesure de VO_2 max n'est pas réalisable, il est nécessaire d'introduire d'autres paramètres, tels que le seuil anaérobie et la capacité anaérobie. Ceci montre d'une part l'intérêt des variables physiologiques dans la prédiction de la performance, et souligne, d'autre part, leurs limites.

Ainsi, si la physiologie du sport a, durant ces deux dernières décennies, amélioré ses connaissances et ses instruments de mesure et, notamment, à propos de la capacité aérobie, il demeure encore des zones d'ombre, particulièrement dans l'intervention des processus anaérobie et dans les outils de mesure.

PRINCIPAUX SYMBOLES
ET
ABRÉVIATIONS UTILISÉS DANS LE TEXTE

VO ₂	: volume d'oxygène consommé par minute
VO ₂ max	: consommation maximale d'oxygène
FC	: fréquence cardiaque
FC max	: fréquence cardiaque maximale
bpm	: battements par minute
rpm	: révolutions par minute
PMA	: puissance maximale aérobie
PWC 170	: puissance pour une FC de 170 bpm
AL	: acide lactique
SA	: seuil anaérobie
SV	: seuil ventilatoire
VE	: débit ventilatoire
VCO ₂	: débit de gaz carbonique
VC	: volume courant
FR	: fréquence respiratoire
QR	: quotient respiratoire
VE/VO ₂	: équivalent respiratoire pour l'oxygène
VE/VCO ₂	: équivalent respiratoire pour le gaz carbonique
FIO ₂	: fraction de l'oxygène dans l'air inspiré
FEO ₂	: fraction de l'oxygène dans l'air expiré
FECO ₂	: fraction de CO ₂ dans l'air expiré
WAN	: capacité anaérobie estimée à partir de l'épreuve de Debruyne-Prévost
CAN ₁	: capacité anaérobie estimée à partir de la méthode de Moritani et al.
CAN ₂	: capacité anaérobie estimée à partir de la méthode de Mognoni
P	: puissance
W	: travail
V	: vitesse
n	: effectif
m	: moyenne arithmétique
s	: écart-type
p	: probabilité de l'erreur
S _{xy}	: erreur-type de l'estimation
r	: coefficient de corrélation
NS	: non significatif
S	: significatif à p < 0,05
S*	: significatif à p < 0,02
S**	: significatif à p < 0,01

INDEX DES TABLEAUX

1.1	Contribution relative des processus aérobie et anaérobies, dans la libération d'énergie, en fonction de la durée du travail	24
1.2	Données expérimentales, relatives aux facteurs de la capacité aérobie, enregistrées chez des sujets sédentaires, entraînés et chez des athlètes d'endurance	46
2.1a	Effectifs et valeurs moyennes de l'âge, du poids et de la taille des athlètes étudiés, par discipline	59
2.1b	Valeurs moyennes de l'âge, du poids, de la taille et des performances, des coureurs par spécialité	59
2.2	Protocole expérimental de détermination de VO ₂ max	65
2.3	Valeurs moyennes comparées de VO ₂ max et de PWC 170 des athlètes de différentes disciplines	73
2.4	Evolution de la fréquence cardiaque en fonction de la charge au cours d'un travail maximal, chez des coureurs de différentes spécialités	76
2.5	Interrelations entre les différents paramètres enregistrés lors de l'épreuve maximale progressive	78
2.6	Valeurs moyennes de VO ₂ max et de FC max, mesurées dans un intervalle de dix années, chez 7 coureurs à pied	79
2.7	Valeurs moyennes de FC max, PMA, VO ₂ max et de PWC 170, mesurées annuellement chez 28 athlètes de haut niveau, pendant une durée de quatre années	80
2.8	PMA, VO ₂ max et FC max mesurés dans un intervalle d'une semaine à partir de l'épreuve expérimentale et à partir de l'épreuve de Petit et al.	81
2.9	Comparaison de PMA, de FC max et de VO ₂ max mesurées, à partir de l'épreuve expérimentale, à deux reprises dans un intervalle d'une semaine	82
2.10	Comparaison entre VO ₂ max mesuré, et VO ₂ max calculé à partir d'équations établies par différents auteurs	84
2.11	Valeurs comparées de PMA, de a, b, et de VO ₂ max estimé à partir du nomogramme, mesurées à deux reprises dans un intervalle d'une semaine.	85

INDEX DES TABLEAUX

2.12	Valeurs moyennes de la vitesse développée à l'épreuve de 5 min, de VO ₂ max et du volume maximal d'O ₂ par km, pour différentes spécialités	86
2.13	Coût énergétique de la course sur tapis roulant, rapporté par différents auteurs	90
2.14	Relation entre la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 min, VO ₂ max et la performance sur différentes distances de courses	91
2.15	Normes d'appréciation de la capacité aérobie établies à partir de VO ₂ max et de PWC 170	97
3.1	Caractéristiques morphologiques et VO ₂ max des coureurs	122
3.2	Effectifs et valeurs moyennes de l'âge, du poids et de VO ₂ max des athlètes étudiés	122
3.3	Fréquence cardiaque et lactate sanguin en fonction de la charge, chez des coureurs à pied	126
3.4	Fréquence cardiaque et lactate sanguin en fonction de la charge, chez des coureurs à pied par spécialité	127
3.5	Seuil anaérobie enregistré chez 2 groupes de coureurs	128
3.6	Evolution des variables ventilatoires et métaboliques en fonction de la charge	130
4.1	Caractéristiques morphologiques de coureurs étudiés	161
4.2	Fréquence cardiaque et lactate sanguin enregistrés en fin de l'épreuve de VO ₂ max et de Debruyne-Prévost	166
4.3	Données relatives à la capacité anaérobie, estimées à partir de l'épreuve de Debruyne-Prévost et à partir de la technique de Moritani et al.	167
4.4	Résultats de l'épreuve de Mogroni enregistrés chez les coureurs, à partir des épreuves de course de 300, 600m et de 5 min	168
4.5	Corrélations entre la capacité anaérobie et les résultats de différentes autres épreuves d'effort	170

INDEX DES FIGURES

1.1	Production de l'adénosine triphosphate par le transfert d'énergie au cours de l'oxydation complète du glucose	15
1.2	Composition chimique de l'adésosine triphosphate	17
1.3	Schéma des mécanismes de reconstitution de l'énergie	21
1.4	Contribution relative des différentes sources d'énergie à la dépense énergétique totale, selon la durée de l'exercice maximal	25
1.5	Cheminement de l'oxygène depuis l'air ambiant jusqu'aux muscles et retour du CO ₂ au milieu extérieur	28
1.6	Evolution du débit ventilatoire en fonction de la charge	31
1.7	Gradients de pression favorables aux échanges gazeux	35
1.8	Pourcentage de saturation de l'hémoglobine en fonction de la pression de l'oxygène	38
1.9	Transport du CO ₂ dans le plasma et dans les globules rouges sous forme de CO ₂ en solution, de bicarbonate et de composé carbaminé	41
1.10	Principaux facteurs intervenant sur VO ₂ max	50
2.1	Charges utilisées dans les épreuves d'effort	61
2.2	Protocole utilisé pour la détermination de VO ₂ max	65
2.3	Détermination graphique de la PWC 170	66
2.4	Consommation maximale d'oxygène mesurée chez l'élite sportive algérienne de différentes spécialités	74
2.5	PWC 170 mesurée chez l'élite sportive algérienne de différentes spécialités	75
2.6	VO ₂ max mesuré chez des coureurs à pied de haut niveau, par spécialité de courses	77
2.7	Nomogramme de prédiction de VO ₂ max	83
2.8	Relation entre VO ₂ max et la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 min, chez des coureurs de différentes spécialités	87

INDEX DES FIGURES

- 2.9 Données de VO₂ max et des vitesses de course, ajustées sur différentes fonctions 88
- 2.10 Relation entre le volume maximal d'oxygène par km et la vitesse développée lors de l'épreuve de 5 min 89
- 2.11 Evolution de la consommation d'oxygène en fonction de la charge 99
- 2.12 Relation entre la fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène et la charge de l'exercice pour différents niveaux de capacité aérobie 102
- 3.1 Evolution de la fréquence cardiaque, de la consommation d'O₂ et du lactate sanguin en fonction de la charge 124
- 3.2 Détermination graphique du seuil ventilatoire 125
- 3.3 Evolution de la fréquence cardiaque et du lactate sanguin en fonction de la charge, chez des coureurs de demi-fond et chez des coureurs de fond 128
- 3.4 Evolution des paramètres respiratoires et métaboliques en fonction de la charge 131
- 3.5 Evolution du débit de gaz carbonique en fonction de la puissance et de la consommation d'oxygène 132
- 3.6 Relation entre le débit ventilatoire et le débit de gaz carbonique 132
- 3.7 Evolution des équivalents respiratoires pour l'oxygène et pour le CO₂, en fonction de la puissance 133
- 3.8 Schéma des phases du tamponnement du lactate sanguin durant un exercice à charge progressivement croissante 145
- 4.1 Représentation graphique de la relation distance-durée, calculée chez des coureurs, à partir des courses de 300 et 600 mètres et de celle de 5 minutes 169
- 4.2 relation distance-durée, calculée chez des coureurs de demi-fond et chez des sprinters à partir des courses de 300 et 600 mètres et de celle de 5 minutes 171

Bibliographie

- 1- Allan W.K., Seals D.R., Hurley B.F., Ehsani A.A., Hagberg J.M. Lactate threshold and distance-running performance in young and older endurance athletes. *J. Ap. Physiol.* 58(4), 1281-1284, 1985
- 2- Astrand I. Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta physiol. scand.*, 49, suppl., 69, 1960
- 3- Astrand P.-O., Experimental studies of physical working capacity in relation to sex and age. Copenhagen, Ejnar, Munksgaard, 1952
- 4- Astrand P.-O. Quantification of exercise capacity and evaluation of physical capacity in man. *Prog in Cardio-vascular Diseases*, 19, 51-67, 1976
- 5- Astrand P.-O. La chaîne de transport de l'oxygène, facteur limitant ? In *Facteurs limitant l'endurance humaine. Comptes rendus Coll St Etienne.* 15-17, 1977
- 6- Astrand P.-O, Rodahl K. Précis de physiologie de l'exercice musculaire. ed. Masson, 1980
- 7- Astrand P.-O, Ryhming I. A nomogram for calculation of aerobic capacity from pulse rate during sub-maximal work. *J. Ap. Physiol.*, 7, 218-221, 1954
- 8- Ayalon A., Inbar O., Bar-Or O. Relationships among measurements of explosive strength and anaerobic power. In RC Nelson and CA Morehouse (ed) *International series on sport sciences, Vol 1, Biomechanic IV*, 572-577, University Press, Baltimore, 1974
- 9- Balke B. Biodynamics: Human. In *Medical Physics (O. Glasser ed.)*, Chicago, Yearbook Publishers, 1960
- 10- Berg K., Bell W. Physiological and anthropometric determinants of mile run time. *J. Sp.. Med.*, 20, 390-396, 1980
- 11- Bergh U. Etude physiologique du ski de fond. traduit du suédois par M. Robin, éd. J.R. Lacour, 1978
- 12- Bhambhani Y., Singh M. Metabolic and cinematographic analysis of walking and running in men and women. *Med. Sci. in Sp. and Ex.*, 17:1, 131-137, 1985
- 13- Billat V. Puissance critique déterminée par la lactatémie en régime continu d'exercice musculaire pour la détermination d'une méthode d'évaluation de la capacité maximale aérobie. Thèse STAPS, Univers. de Limoges, 1987

BIBLIOGRAPHIE

- 14- Bonen A., Heyward V.H., Cureton K.J., Bosteau R.A. Predicting of maximal oxygen uptake in boy, ages 7-15 years. *Med. Sci. Sp.*, 11, 24-29, 1979
- 15- Bransford D.R., Howley E.T. Oxygen cost of running in trained and untrained men and women. *Med. Sci. in Sp.*, 9:1, 41-44, 1977
- 16- Brikci A. Etude des réactions physiologiques au cours de l'entraînement chez les coureurs de demi-fond et chez les rameurs. Thèse de Magister, Un d'Oran, 1978
- 17- Brikci A. Etude des réactions physiologiques au cours de l'effort sportif. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle. Univers. Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1979
- 18- Brikci A., Dekkar N. Validité de la course de 5 minutes pour l'estimation de VO2 max chez le coureur à pied. *Science et Motricité*, 8: 31-37, 1989
- 19- Brikci A., Dekkar N. Athlétisme: variables prédictives de la performance. *Med. Sp.*, 61:2, 64-69, 1987
- 20- Brikci A., Dekkar N. Courses à pied. Caractéristiques morphofonctionnelles et pronostic. *Med. Sp.*, 61, 174-179, 1987
- 21- Brikci A., Dibie C. Evolution de la fréquence cardiaque et de la lactacidémie des des coureurs de demi-fond lors de trois situations différentes. *méd sport*, 55, 396-401, 1981
- 22- Brikci A., Saidi D. Etude de la capacité aérobie chez des athlètes et chez des sédentaires. Mémoire de D.E.S, Univers. d'Oran, 1976
- 23- Brikci A., Saidi D., Belleville J., Helal H. Comparaison de 3 épreuves de détermination de VO2 max chez des rameurs. *méd sport*, 54, 227-231, 1980
- 24- Brooks G.A. Anaerobic threshold: reviews of the concept and directions for future research. *Med. Sci. Sp. Ex.*, 17, 1, 22-31, 1985
- 25- Brooks G.A., Fahey T.D. Exercise physiology. Human bioenergetics and its applications. John Wiley and Sons. New-York, 1984
- 26- Brooks G.A., Gaessar G.A. End points of lactate and glucose metabolism after exhausting exercise. *J. Ap. Physiol.*, 49, 1057-1069, 1980
- 27- Buick F.J., Gledhill N., Froese A.B., Spriet L., Meyer E.C. Effect of induced erythrocytemia on aerobic work capacity. *J. Ap. Physiol.* 48, 636, 1980
- 28- Bye R.T.P Ventilatory muscles during exercise in air and oxygen in normal men. *J. Ap. Physiol.*, 56, 464, 1984
- 29- Calozzo V.J., Davis, Ellis J.F., Azus J.L., Vandagriff R., Prietto C.A., McMaster W.C. a comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold. *J. Ap. Physiol.* 53(5), 1184-1189, 1982

BIBLIOGRAPHIE

- 30- Cazorla G., Léger L., Mirini J.F. Epreuves et mesures du potentiel anaérobie. In travaux et recherches en E.P.S. INSEP, Paris, 82-94, 1984
- 31- Clausen J.P. Circulatory adjustments to dynamic exercise and effect of physical training in normal subjects and patients with coronary artery disease. *Prig. Cardiovasc. Dis.*, 13, 459-495, 1976
- 32- Coast J.R., Welch H.G. Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *E. J. Ap. Physiol.*, 531, 333-342, 1985
- 33- Coggan A.R., Costill D.L. Biological and technological variability of three anaerobic ergometer tests. *Inter. J. Sp.. Med.*, 5, 142-145, 1984
- 34- Coleman A.E. Validity of distance runs with elementary school children. AAHPER, Norfolk, 1974
- 35- Conconi F., Ferrari M., Ziglio P.G., Droghetti P., Codeca L. Determination of the anaerobic threshold by a non invasive field test in runners. *J. Ap. Physiol.*, 52, 869-873, 1982
- 36- Conley D.L., Krahenbuhl G.S. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sc. Sp. Ex.*, 12(5), 357-360, 1980
- 37- Cooper K.H. A mean of assessing maximal oxygen intake. *J. Am. Med. Ass.*, 203, 201-204, 1968
- 38- Costill D.L. The relationship between selected physiological variables and distance running performance. *J. sp. Med. Phys. Fitn.*, 7, 61-66, 1967
- 39- Costill D.L. Metabolic responses during distance running. *J. Ap. Physiol.*, 26, 251-255, 1970
- 40- Costill D.L., Fink W.J., Pollock M.L. Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Med. Sci. Sp.*, 8, 96-100, 1976
- 41- Costill D.L., Thomason H., Roberts E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med. Sci. Sp.*, 5: 248-252, 1973
- 42- Costill D.L. La course de fond: approche scientifique. ed Vigot, 1981
- 43- Crielaard J.M., Pirnay F. Etude longitudinale des puissances aérobie et anaérobie alactique. *méd sport*, 59, 4-6, 1985
- 44- Crielaard J.M., Franchimont P. La mesure de la capacité anaérobie lactique: mise au point actuelle. *méd sport*, 59, 150-152, 1985
- 45- Crielaard JM., Ledent P, Grosjean M. Evaluation en laboratoire de la capacité anaérobie lactique. Mise au point d'un test. *méd sport*, 60, 66-71, 1986

BIBLIOGRAPHIE

- 46- Cureton K.J., Sparling P.B. Distance running performance and metabolic responses to running in men and women with excess weight experimentally equated. *Med. Sci. Sp. Exer.*, 12:4, 288-294, 1980
- 47- Dal Monte A. Exercise testing and ergometer. In the Olympic book of sports medicine, 121-150, Blackwell scientific publications, 1988
- 48- Davies C.T.M. Limitations to the predicting of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements. *J. Ap. Physiol.*, 24, 700-706, 1968
- 49- Davies C.T.M., Thompson M.W. Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon thou athletes. *Eur. J. Ap. Physiol.*, 41, 233-245, 1979
- 50- Davis J.A. The anaerobic threshold and lactate turnpoint. *Eur. J. Ap. Physiol.*, 50, 383-392, 1983
- 51- Davis J.A., Frank M.H., Whipp B.J., Wasserman K. Anaerobic threshold alteration caused by endurance training in middle aged men. *J. Ap. Physiol.*, 46, 1039-1046, 1979
- 52- Davis J.A., Vodak P., Wilmore J.H., Vodak J., Kurtz P. Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *J. Ap. Physiol.*, 41, 544-550, 1976
- 53- Davis J.A., Gass G.C. The anaerobic threshold as determined before and during lactic acidosis. *Eur J Appl Physiol.*, 47, 141-149, 1981
- 54- Davis J.A., Whipp B.J., Wasserman K. respiratory acidocis as a common feature of rapid incremental exercise testing in man. *Med. Sci. Sp. Ex.*, 16, 2, 1984.
- 55- Debruyne-Prévost P. Essai d'une mise au point d'une épreuve anaérobie sur bicyclette ergométrique. *Méd. sp.*, 49, 202-206, 1975
- 56- Dekkar N., Brikci A., Hanifi R. Technique d'évaluation physiologique des athlètes. C.O.A éd. (Alger), 1990
- 57- Dill D.B. Oxygen used in horizontal and grade walking and running on the treadmill. *J. Ap. Physiol.*, 20, 19-22, 1965
- 58- Dreezen E., Thisse M.N., Tournoy E., Thys H. Le point d'inflexion de la courbe FC-P est-il un substitut du seuil anaérobie ? Comptes rendus des IIIe Journées Internationales d'Automne de l'ACAPS, Poitiers, 1989
- 59- Dressendorfer R.H., Smith J.H., Merrill J., Catlin M.J., Carmichael F., Goodfliesh R., Borysyk L., Gordon S., Timmis G.C. Quantification of exercise responses at anaerobic threshold in healthy men. Relation to prescribed training heart rates. *Med. Sci. Sp.*, 13:79, 1981

BIBLIOGRAPHIE

- 60- Droghetti P., Borsetto C., Casoni R., Cellini M., Ferari M., Paolima A.R., Siglio P.G., Conconi F. Non invasive determination of the anaerobic threshold in canoeing, crosscountry-skiing, roller and iceskating, rowing and walking. *Eur. J. Ap. Physiol.*, 53, 299-303, 1985
- 61- Dwyer J., Bybee R. Cardiac indices of anaerobic threshold. *Med. Sci. Sp.* 13, 70, 1981
- 62- Eclache J.-P., Beaudy J., Quard S. La détermination de l'aptitude physique: principes méthodologiques. *méd sport*, 53, 213-218, 1979
- 63- Ekblom B., Gjessing E. Maximal oxygen uptake of the easter island population. *J. Ap. Physiol.*, 25, 124-129, 1968
- 64- Faina M., Sardella F., Mognoni P., Di Cave P., Dalmonté A. Validity of test for anaerobic threshold assessment in swimming. *Comptes Rendus du congrès international des sciences du sport. Séoul*, 1988
- 65- Faina M., Sardella F., Marini C. La soglia anaerobica. *Istituto dello Sport, CONI, Roma*, 37-59, 1987
- 66- Farrell P.A., Wilmore J.H., Coyle E.F., Billings J.E., Costill D.L. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med. Sci. Sp.*, 11, 338-344, 1979
- 67- Farrell P.A., Wilmore J.H., Coyle E.F. Exercise heart rate as predictor of running. *Res. Quart.*, 2, 417-421, 1980
- 68- Faulkner J.A., Roberts D.E., Elk R.L., Conway J. Cardiovascular responses to submax and maximum effort cycling and running. *J. Ap. Physiol.*, 30, 457-461, 1971
- 69- Folinsbee L.J. Exercise respiratory pattern in elite cyclists and sedentary subjects. *Med. Sci. Sp. Ex.*, 15, 503, 1983
- 70- Fox E.L. et Mathews D.K. Bases physiologiques de l'activité physique. *Vigot éd., Paris*, 1984
- 71- Fujitsuka N., Yamamoto T., Ohkuwa T., Santo M., Miyamura M. Peak blood lactate after short periods of maximal treadmill running. *Eur. J. of Ap. Physiol.*, 48, 289-296, 1982
- 72- Gardner J.B., Gerry Purdy J. *Computerized: Running Training Programs.* Tafnews Press, Los Altos, California, 1970
- 73- Graham T.E., Andrew G.M. The variability of repeated measurements of O₂ debt in man following a maximal treadmill exercise. *Med. and Sci. Sp.*, 5, 73-78, 1973
- 74- Grimby G. respiration and exercise. *Med. Sci. Sp.*, 1, 9, 1969

BIBLIOGRAPHIE

- 90- Hollman W., Hettinger T. Sportmedizin Arbeit und Trainingsgrundlagen. F.K. Schatattauer Verlag, Stuttgart, 1976
- 91- Holloszy E., Booth F.W. Biochemical adaptations to endurance exercise in muscle. *Ann. Rev. Physiol.* 38, 273, 1976
- 92- Holloszy E., Coyle E.F. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J. Ap. Physiol.*, 56:4, 831-838, 1984
- 93- Howald H., von Glutz G., Billetier R. Energy Stores and substrates utilization in muscle during exercise. In the third international symposium on biochemistry of exercise. F. Landry and W.A.R. Orban (eds.), Miami Symposia Specialists, 75-78, 1978
- 94- Howley E.T., Glover M.E. The caloric costs of running and walking on mile for men and women. *Med. Sci. Sp...*, 6:4, 235-237, 1974
- 95- Hughes E.F., Turner S.C., Brooks G.A. effects of glycogen depletion and pedaling speed on "anaerobic threshold". *J. Ap. Physiol.*, *J. Ap. Physiol.*, 52, 1598-1607, 1982
- 96- Information UNESCO. Working Group for ergometry ICSPE. Conditions conseillées pour mesurer la capacité de performance physique lors d'examens ergométriques. *méd sport*, 56, 132, 1982
- 97- Information UNESCO. Working Group for ergometry ICSPE. Révisions des propositions de standardisation pour les épreuves ergométriques. *méd sport*, 56, 133, 1982
- 98- Iwaoka K., Hatta H., Atomi Y., Miyashita M. Lactate, respiratory compensation thresholds, and distance running performance in runners of both sexes. *Int. J. Sp. Med.*, 9, 5, 306-309, 1988
- 99- Jacobs I. Blood lactate, implication fir training and sports performance. *Sp. Medecine*, 3, 10-25, 1986
- 100- Jones N.L., Ehram R.E. The anaerobic threshold. *Ex. Sp. Sci. Rev.* 10, 49-83, 1982
- 101- Jones N.L., McCartney N., Graham T., Spriet L., Kowalchuk J.M. Muscle performance and metabolism in maximal isokinetic cycling at slow and fast speeds. *J. of Ap. Physiol.*, 59, 132-136, 1985
- 102- Jousselin E., Handschuh R., Stephan H. Etude de la transition aérobie-anaérobie chez les coureurs de demi-fond français (hommes et femmes). *Cinésiologie*, 305-313, 1984
- 103- Karlsson J., Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation during muscular exercise and threshold. *Int. J. Sp. Med.*, 3, 190-201, 1981

BIBLIOGRAPHIE

- 104- Katch V.L. Body weight, leg volume, leg weight and leg density as determiners of short duration work performance on the bicycle ergometer. *Med. Sci. Sp.*, 6: 267-270, 1974
- 105- Katch V.L., Weltman A., Traeger L. All out versus steady-paced cycling strategy for maximal work output for short duration. *Res. Quart.*, 47, 164-168, 1976
- 106- Katch V.L., Weltman A., Martin R., Gray L. Optimal test characteristics for maximal anaerobic work on the bicycle ergometer. *Res. Quart.*, 48, 319-327, 1977
- 107- Katch V.L., Weltman A. Interrelationship between anaerobic power output, anaerobic capacity and aerobic power. *Ergonomics*, 22, 325-332, 1979
- 108- Kenney W.L., Hodgson J.L. Variables predictive of performance in elite middle-distance runners. *Brit. J. Sp. Med.*, 19:4, 207-209, 1985
- 109- Keul J., Haralambie G., Arnold T., schumann W. Heart rate and energy-yielding substrates in blood during long-lasting running. *Euro. J. Ap. Physiol.* 32, 279-289, 1974
- 110- Keul J., Kinderman W., Simon G. La transition aérobie-anaérobie lors de la pratique de certains sports. *Comptes rendus du Colloque international de Nice.* 37-67, 1978
- 111- Kinderman W, Keul J. Lactate acidosis with different forms of sports activities. *Canadien J. Ap. Sp. Sci.*, 2, 177-182, 1977
- 112- Kinderman W., Simon G., Keul J. The significance of the aerobic anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur. J. Ap. Physiol.*, 42, 25-34, 1979
- 113- Klissouras V. Heritability of adaptive variation. *J. Ap. Physiol.*, 31:3, 338-344, 1971
- 114- Klissouras V. Adaptation to maximal effort: genetics and age. *J. Ap. Physiol.*, 35, 288, 1973
- 115- Kumagai S., Tanaka K., Matsuura Y., Matsuzaka A., Hirakoba K., Asamo K. Relationships of the anaerobic threshold with 5 km, 10km and 10miles races. *Eur. J. Appl., Physiol.*, 49, 13-23, 1982
- 116- Lacour J.R., Montmayer A., Dormois D., Gacon G., Padilla S., Viale C. Validation de l'épreuve de mesure de la vitesse maximale aérobie (VMA) dans un groupe de coureurs de haut niveau. *Science et Motricité*, 7, 3-8, 1989
- 117- Lacour J.R., Flandrois R. Le rôle du métabolisme aérobie dans l'exercice intense de longue durée. *J. Physiol.*, 73, 89-130, 1977

BIBLIOGRAPHIE

- 118- Lacour J.R., Flandrois R., C. Denis Les tests d'effort. In Sports & Sciences, éd. Vigot (Paris), 1981
- 119- Lacour J.R., Padilla S., Denis C. L'inflexion de la courbe fréquence cardiaque - puissance n'est pas un témoin du seuil anaérobie. Science et Motricité, 1, 3-6, 1987
- 120- Lange Andersen K., Shephard R.J., Denolin H., Varnauskas E., Masironi R. Les épreuves d'effort: principes fondamentaux. Genève. OMS, 1971
- 121- Léger L., Boucher R. An indirect continuous running multistage field test: the université de Montréal Track Test. Can. J. Ap. Sp. Sci., 5, 77-84, 1980
- 122- Léger L., Mercier D. Coût énergétique de la course sur tapis roulant et sur piste. Une synthèse des courbes publiés. Motricité humaine, 2, 66-69, 1983
- 123- Legros P. Koraz-Reiss G., Gascard J.-P, Syrota A., Durand J. Effets de l'entraînement sur le métabolisme musculaire local évalué, in vivo, par spectrométrie RMN du phosphore. Science et Motricité, 6, 24-30, 1988
- 124- Lewis S.F., Taylor F.W., Graham R.M., Pettinger W.A., Schutte H.E., Blomqvist C.G. Cardiovascular responses to exercise as functions of absolute and relative work load. J. Ap. Physiol., 54, 1314-1323, 1983
- 125- Mac Ardle W.D, Katch F., Katch V. Physiologie de l'activité physique: énergie, nutrition et performance. Vigot & edisem éd., 2ème édition, 1987
- 126- Mac Dougall J.D. The anaerobic threshold: Its significance for the endurance athletes. J. Can. Sci. Sc. Ap. Sp., 2, 137-140, 1977
- 127- Mac Dougall J.D., Wenger H.A., Green H.J. Evaluation physiologique de l'athlète de haut niveau. Décarie & Vigot, 1988
- 128- Mac Lellan T.M. Ventilatory and plasma response with different exercise protocols: a comparison of methods. Int. J. Sp. Med., 6, 30-35, 1985
- 129- Mac Lellan T.M., Skinner J.S. The use of aerobic threshold as a basis for training. Can. J. Ap. Sp. Sci., 6, 197-201, 1980
- 130- Mac Miken D.F., Daniels J.T. Aerobic requirements and maximum aerobic power in treadmill and track running. Med. Sci. in Sp., 8:1, 14-17, 1976
- 131- Mader A., Liesen H., Heck H., Philippi H., Rost R., Schürch P., Hollman W. Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im labor. Sportarzt. Sportmed. 27, 80-88, 109-112, 1976

BIBLIOGRAPHIE

- 132- Mader A., Heck H., Liesen H., Hollmann W. Simulative Berechnungen der Dynamischen Änderungen von Phosphorylierungs potential, Laktatbildung und Lactatverteilung beim Sprint. Deutsche Zeitschrift Sportmedizin, 34, 14-22, 1983
- 133- Mahler D.A. Ventilatory responses at rest and during exercise in marathon runners, J. Ap. Physiol., 52, 388, 1982
- 134- Margaria R., Edwards H.T., Dill D.B. The possible mechanism of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactate acid in muscular contraction. Am. J. Physiol., 106, 689-714, 1933
- 135- Margaria R., Aghemo P., Rovelli E. Indirect determination of maximum O₂ consumption in man. J. Ap. Physiol., 20, 1070-1073, 1965
- 136- Margaria R., Cerretelli P., Mangili F. Balance and kinetics of anaerobic energy release during exercise in man. J. Ap. Physiol., 19, 623-628, 1964
- 137- Martin B.J. Anaerobic metabolism in the respiratory muscles during exercise. Med. Sci. Sp. Ex., 16, 82, 1984
- 138- Matveiev L.P. Aspects fondamentaux de l'entraînement. Vigot (Paris), 1983
- 139- Mayhew L.J. Oxygen cost and energy expenditure of running in trained runners. Brit. J. Sp. Med., 11:13, 116-121, 1977
- 140- Medbo J.I. et Tabata I. Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. J. Ap. Physiol., 67:5, 1881-1886, 1989
- 141- Menier R., Kiniffo F., Antonini M.T., Chassain A.P., Dalmay F., Lanusse Y., Lemaire F., Marquet P. Adaptation respiratoire et circulatoire aux activités physiques. médsport, 63:2, 59-96, 1989
- 142- Mercier D., Léger L. L'évaluation de la puissance aérobie maximale du coureur. track field J., 13, 15-18, 1982
- 143- Monod H., Scherrer J. The work capacity of synergic muscular groups. Ergonomics, 8, 329-338, 1965
- 144- Monod H. et Flandrois R. Physiologie du sport, Masson, 1985
- 145- Moore R.L. et Gollnick P.D. Response of ventilatory muscles of the rat to endurance training. Pflugers Arch., 392, 268, 1982
- 146- Moritani T., Nagata A., DeVries H.A. Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. Ergonomics, 24:5, 339-349, 1981

BIBLIOGRAPHIE

- 147- Murray T.D., Zinkgraf S.A., Shea C. The relationship of selected training variables on performance in marathon running. *Med. Sc. Sp. Ex.*, 12, 81, 1980
- 148- Nadeau M., Péronnet F. *Physiologie de l'activité physique*. Vigot & edisem éd., 1980
- 149- Nagata A., Mauro M., Moritani T., Yoshida T. Anaerobic threshold determination by blood lactate and myoelectric signals. *Jap. J. Physiol.*, 31, 585-597, 1981
- 150- Novack L.P., Woodward W.A., Bestit C., Mellerowicz H. Working capacity, body composition, and anthropometry of olympic female athletes. *J. Sp. Med. and Phys. Fitn.*, 17, 275-283, 1977
- 151- Owles W.N. Alterations in the lactic acid content of the blood as a result of light exercise, and associated changes in the CO₂ combining power of the blood and the alveolar CO₂ pressure. *J. of Physiol.*, 69, 214-237, 1930
- 152- Parizkova J. *Body fat and physical fitness*. Martinus Nijhof, 1977
- 153- Parkhouse W.S., McKenzie D.C., Rhodes E.C., Dunwoody D., Wiley P. Cardiac frequency and anaerobic threshold. Implications for prescriptive exercise programs. *Eur. J. Ap. Physiol.* 50, 117-123, 1982
- 154- Patton R.W., Heffner K., Baun W., Ayres J., Gettman H., Raven P. Heart rate as a predictor of anaerobic threshold in runners and non-runner. *Med Sci. Sp.*, 12, 94, 1979
- 155- Pérès G. surveillance médicale de l'entraînement. In Guillet & Génety (Eds.). *Abrégé de médecine du sport*. 4e ed. Masson, 1984
- 156- Péronnet F. La dette d'oxygène en 1985. *EPS*, 193, mai-juin, 16-18, 1985
- 157- Petit J.M., Delhez L., Damoineau J., Belge G., Collee G., Deroanne R. *Comm. Congrès Int. Ed. Phys. Liège*, 1962
- 158- Pirnay F. Facteurs limitatifs de la consommation maximale d'oxygène. Thèse d'agrégation. Université de Liège, 1978
- 159- Pirnay F., Crielaard J.M. Mesure de la puissance anaérobie alactique. *méd sport*, 53, 13-16, 1979
- 160- Pollock M.L. The quantification of endurance training programmes. *Ex. and Sp. Sci. Rev.*, ed. V.H. Wilmore, Academic Press Inc., 1, 155, 1973
- 161- Pollock M.L., Jackson A.S., Ayres J., Ward A., Linnerud A.C., Gettman L.R. Body composition of elite class distance runners. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 301, 361-370, 1977

BIBLIOGRAPHIE

- 162- Pollock M.L., Jackson A.S., Pate R.R. Discriminant analysis of physiological differences between good and elite distance runners. *Res. Quart. For Ex. and Spt*, 51:3, 521-532, 1980
- 163- Powers S.K., Dodd S., Garner R. Precision of ventilatory and gas exchange alterations as a predictor of the anaerobic threshold. *Eur. J. Ap. Physiol*, 52, 173-177, 1984
- 164- Pugh L.G.C. Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *J. Physiol.*, 207, 823-835, 1970
- 165- Raveneau S. Etude comparative de différents tests anaérobies sur ergocycle. Thèse de Médecine, Faculté de Médecine, Paris-Ouest, 1986
- 166- Ready A.E. Physiological characteristics of male and female middle distance runners. *Can J. Ap. Sp. Sci.*, 9:2, 700-707, 1984
- 167- Ribeiro J.P., Fielding R.A., Hughes V., Black A., Bochesse M.A, Knuttgen H.G. Heart rate break point may coincide with the anaerobic and not the aerobic threshold. *Int. J. Sp. Med.*, 6, 220-224, 1985
- 168- Robinson E.P. et Kjeldgaard, J.M. Improvement in ventilatory muscle function with running. *J. Ap. Physiol.*, 52, 1400, 1982
- 169- Sady S. Physiological characteristics of high-ability prepubescent wrestlers, *Med. Sci. Sp. Ex.*, 16, 72, 1984
- 170- Saltin B., Astrand P.-O. Maximal oxygen uptake in athletes. *J. Ap. Physiol.*, 23, 353-358, 1967
- 171- Saltin B., Blomquist B., Mitchell J.H., Johnson R.L., Wildenthal K., Chapman C.B. Response to submaximal and maximal exercise after bed rest and training. *Circulation*, 38 (suppl. 7), 1968
- 172- Saltin B., Henriksson J., Nygaard E., Andersen P., Jansson E. Fibre types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Annals of the New York Acad. Sci.*, 301, 3, 1977
- 173- Saltin B., Karlsson J. Muscle glycogen utilization during work of different intensities. In: *Muscle metabolism during exercise. Advances in experimental medicine and biology*. B. Pernow and B. Saltin (eds.). New York, Plenum Press, 289-305, 1971
- 174- Simon J.J., Young L., Gutin B., Blood D.K., Case R.B. Lactate accumulation relative to the anaerobic and respiratory compensation threshold. *J. Ap. Physiol.*, 54, 13-17, 1983
- 175- Simoneau J.A., Lortie G., Boulay M.R, Bouchard C. Tests of anaerobic alactacid and lactacid capacities: description and reliability. *Can. J. Ap. Sp. Sc.*, 8, 266-270, 1983

BIBLIOGRAPHIE

- 176- Sjödín B., Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int. J. Sp. Med.*, 2, 23-26, 1981
- 177- Skinner J.S., Mc Lellan T.H. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res. Quat.*, 51, 234-248, 1980
- 178- Slovic P. Empirical study of training and performance on the marathon. *Res. Quat.*, 48, 769-777, 1977
- 179- Sparling P.B. Physiological determinants of distance running Performance. *The Physician and Sportmedicine*, 12:2, 68-77, 1984
- 180- Sprynarova S., Parizkova J. Functional capacity and body composition in top weight lifters, swimmers, runners and skiers. *International Zeitschrift für angewandte Physiologie*, 24, 184-194, 1971
- 181- Sturbois X., De Saedeleer M., Fornaris E., Gasperini M. Approche de l'effort anaérobie dans le relais 4x400 m en athlétisme. *L.M.M. Médecine du Sud Est (France)*, T XVI (hors série), 2979-2989, 1980
- 182- Svendenhag J., Sjödín B. Maximal and submaximal oxygen uptakes and blood lactate levels in elite male middle and long distance runners. *Int. J. Sp. Med.*, 5, 255-261, 1984
- 183- Takano N. Effects of pedal rate on respiratory responses to incremental bicycle work. *J. Physiol.*, 396, 389-397, 1988
- 184- Tanaka K., Matsuura Y. Marathon performance anaerobic threshold and onset of blood lactate accumulation. *J. Ap. Physiol.*, 57, 640-643, 1984
- 185- Taylor H.L., Buskirk E., Henschel A. Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J. Ap. Physiol.*, 8, 73-80, 1955
- 186- Tharp G.D., Johnson G.O., Thorland G. Measurement of anaerobic power and capacity in elite young track athletes using the Wingate test. *J. Sp. Med.*, 24, 100-106, 1984
- 187- Thoden J.S., Wilson B.A., Mc Dougall J.D. Evaluation de la capacité aérobie. In *Evaluation physiologique de l'athlète de haut niveau*. Ed. Mc Dougall et al., Décarie - Vigot, 1988
- 188- Vandewalle H., Friemel F. Tests d'évaluation de la puissance maximale des métabolismes aérobie et anaérobie. *Science & Sports*, 4, 265-279, 1989
- 189- Vandewalle H., Pérès G., Monod H. Standard anaerobic exercise tests. *Sport Medicine*, 4, 268-289, 1987
- 190- Vogelaere P., S'Jongers J.J. Consommation maximale d'oxygène et techniques de mesures. *méd'sport*, 57, 16-19, 1983

BIBLIOGRAPHIE

- 191- Wahlund H. Determination of the physical working capacity. Acta Med. Scand., Suppl., 215, 1-78, 1948
- 192- Wasserman K. Coupling of external to internal respiration. Am. Rev. Respir. Dis. 129(suppl.), S21, 1984
- 193- Wasserman K. Determinants and detection of anaerobic threshold and consequences of exercise above it. Circulation, 76, supp.VI, 29-39, 1987
- 194- Wasserman K., Beaver W.L., Davis J.A., Heber J., Whipp B.L. Lactate-pyruvate ratio during exercise and recovery. J. Ap. Physiol., 59, 935-940, 1985
- 195- Wasserman K., Mac Ilroy M.B. Detecting the threshold of anaerobic metabolism. Am. J. Cardiol., 14, 844-852, 1964
- 196- Wasserman K., Whipp B.J., Koyal S.N., Beaver N.L. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. J. Ap. Physiol., 35, 236-243, 1973
- 197- Wasserman K., Whipp B.J., Davis J.A. Respiratory physiology of exercise: metabolism, gas exchange and ventilatory control. In: Respiratory Physiology III, Int. Rev. Physiol. Ser., 23, 149-211, 1981
- 198- Weber K.T., Janicki J.S. Lactate production during maximal and submaximal exercise in patients with chronic heart failure. J. Am. Cardiol., 6, 717, 1985
- 199- Weineck J. Manuel d'entrainement. éd. Vigot (Paris), 1983
- 200- Wyndham C.H., Strydom N.B., Van Rensburg A.J. Physiological requirements for world-class performances in endurance running. S. Afr. Med. J., 43, 996-1002, 1969
- 201- Yeh P.M. anaerobic threshold, problems of determination and validation. J. Ap. Physiol., 55:4, 1178-1186, 1983

Annexe

L'étude des caractéristiques physiologiques des athlètes implique le plus souvent l'évaluation de leurs réactions physiologiques à l'effort, laquelle implique la mise en oeuvre de ressources dont l'importance est liée à la nature de l'exploration et des objectifs visés.

L'étude des réactions physiologiques à l'effort, chez le sportif fait appel à des techniques de complexité très variable. Les tests utilisés peuvent avoir recours à des exercices simples tels que la flexion des genoux, la course sur place ou sur une distance déterminée, la montée et descente de marche... Ils nécessitent parfois des moyens plus importants et plus élaborés.

Pour une analyse correcte de la réponse du système cardio-vasculaire à l'effort, la charge de travail doit solliciter de grandes masses musculaires. De plus, et afin d'obtenir une évaluation objective, l'épreuve doit être facile à exécuter et ne faisant pas appel à la technique du mouvement et de l'habileté du sujet. Celui-ci doit être informé du déroulement de l'épreuve et mis à l'aise afin d'éviter une réaction d'anxiété qui fausserait quelque peu le processus d'évaluation.

Généralement l'évaluation de la capacité physique d'un sujet se base sur la mesure de la consommation d'oxygène, de la fréquence cardiaque lors d'un exercice standardisé. Cette évaluation peut faire appel à plusieurs types d'appareils comme, par exemple, la bicyclette ergométrique, le tapis roulant et les marches. Le choix du matériel varie en fonction du but recherché et des sujets examinés. Lors de cette étude, le choix est porté sur la bicyclette ergométrique, les réactions cardio-vasculaires et métaboliques sont évaluées au moyen d'un ergospiromètre, d'un analyseur de lactate sanguin et d'un télémètre.

LA BICYCLETTE ERGOMETRIQUE

C'est l'appareil le plus utilisé au laboratoire en raison des avantages qu'il offre. Il est peu encombrant, sécurisant par la position assise du sujet et permet, comme nous le verrons plus loin, la mesure concomittante de plusieurs paramètres.

Deux types de bicyclettes ergométriques sont commercialisés: la bicyclette mécanique et la bicyclette électromagnétique. C'est le deuxième type de bicyclette qui est utilisé lors de cette étude.

Pour la bicyclette électromagnétique, la force de freinage provient du déplacement d'un conducteur dans un champ électromagnétique.

Cet ergocycle permet d'introduire et de maintenir, contrairement, aux ergocycles à résistance mécanique, la puissance imposée, indépendamment de la fréquence de pédalage. La constance de la puissance est maintenue pour des vitesses de pédalage comprises entre 35 et 120 rpm.

Le cycloergomètre électromagnétique, s'il offre l'avantage de supprimer les défauts du modèle mécanique, présente néanmoins l'inconvénient d'être cher et d'entretien difficile.

La bicyclette ergométrique offre de nombreux d'avantages par rapport aux autres types d'ergomètres. En effet, outre une certaine sécurité qu'elle accorde au sujet examiné, par sa position assise, elle permet d'effectuer certains examens pendant l'effort tels que :

- les prélèvements sanguins pour le dosage du lactate,
- le recueil des gaz respiratoires,
- l'enregistrement de la fréquence cardiaque.

Le cycloergomètre présente, cependant, certains inconvénients qui peuvent gêner le déroulement de l'épreuve et l'interprétation des résultats. En effet, une fatigue musculaire au niveau des quadriceps, due à une position trop basse de la selle ou de l'inhabitude du sujet à pédaler, peut entraîner un arrêt prématuré de l'épreuve. De même, un défaut de pédalage peut fausser le déroulement du test, notamment chez les sujets éprouvant des difficultés de coordination. Dans ce dernier cas, les données enregistrées sont systématiquement exclus de l'étude.

On peut également remarquer, que le maintien d'une cadence régulière est parfois très difficile, notamment chez les sujets non habitués à la bicyclette.

Comme pour la majorité des appareils utilisés, l'étalonnage du cycloergomètre est effectué régulièrement, afin d'éviter des erreurs lors de l'interprétation des résultats.

La calibration de la charge s'effectue, grâce à une tige d'étalonnage accompagnant l'appareil.

La fréquence de pédalage est contrôlée à l'aide d'un métronome, en vérifiant si la cadence affichée sur le tachymètre, correspond bien au chiffre indiqué par le curseur du métronome.

MESURE DES GAZ RESPIRATOIRES

Les gaz expirés sont recueillis d'une façon continue et analysés automatiquement à l'aide d'un ergospiromètre à circuit ouvert du type SIREGNOST FD 88 (Siemens).

Le sujet respire dans un masque facial relié à l'ergospiromètre par un tuyau souple de 35 mm de diamètre. Le masque facial permet au sujet d'inspirer l'air ambiant grâce à des valves inspiratoires, et d'expirer dans l'ergospiromètre grâce à des valves expiratoires. Les résistances du circuit sont minimales et l'espace mort réduit.

Les techniques de mesures automatiques de la consommation d'oxygène et de gaz carbonique évitent les différentes étapes de recueil des gaz, de mesure du débit ventilatoire, et d'analyse des fractions d'oxygène et de gaz carbonique contenues dans l'air expiré.

Une chaîne d'appareils placés en série, permet de mesurer automatiquement et dans les conditions STPD, toutes les variables sus-citées, puis intègrent ces données pour calculer $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, QR. Les résultats sont fournis alternativement toutes les deux secondes sous forme graphique.

Cette technique nécessite un contrôle régulier et rigoureux de chacune des composantes de l'appareil, car une défaillance ou une erreur au niveau d'un seul élément de l'appareil peut entraîner des résultats erronés.

La teneur de l'air expiré en oxygène (FEO_2) et en gaz carbonique ($FECO_2$) est déterminée par polarographie pour l'oxygène (Oxymat-M) et par rayonnement infrarouge pour le gaz carbonique (Ultramat-M).

L'analyseur d'oxygène détermine, grâce à une électrode polarographique, la différence de concentration de O_2 , entre l'air inspiré et l'air expiré. Le signal du détecteur est amplifié et converti de façon à donner un affichage analogique et graphique de la concentration en oxygène.

L'analyse du gaz carbonique s'effectue par rayonnement infrarouge. Le rayonnement infrarouge perd, par absorption, une partie de son énergie lorsqu'il traverse un milieu gazeux contenant du CO_2 . Cette perte d'énergie est proportionnelle au nombre de molécules de CO_2 interposées, c'est-à-dire à la concentration de ce gaz.

A N N E X E

L'étalonnage des deux analyseurs est effectué avant chaque série d'analyses à l'aide d'un mélange ternaire dont la teneur en oxygène et en gaz carbonique est contrôlée par dosage chimique selon la méthode de micro-scholander.

L'évaluation de VO₂ demande la prise en considération des conditions ambiantes (température, pression barométrique, humidité) qui, du fait de leurs variations fréquentes, sont exprimées en valeurs standards, connues sous les initiales:

ATPS (Ambiant Temperature and Pressure, Saturated),
 STPD (Standard Temperature and Pressure Dry), c'est-à-dire à 0 degré Celcius ou 273 degrés Kelvin, 760 mmHg et sans pression de vapeur d'eau.

La conversion des volumes d'un système à l'autre s'effectue à partir de la formule suivante :

$$V \text{ (STPD)} = V \text{ (ATPS)} \times \frac{P_b - P_{H_2O}}{760 - 0} \times \frac{273 + 0}{T_a + 273}$$

P_{H2O} : pression en vapeur d'eau,
 P_b : pression barométrique,
 T_a : température ambiante.

La quantité d'oxygène consommé (VO₂) est donnée par la formule suivante:

$$VO_2 = VE(STPD) \times \frac{1 - FE_{O_2} - FE_{CO_2}}{1 - FI_{O_2} - FI_{CO_2}} \times FI_{O_2} - FE_{CO_2}$$

FE_{O2} et FE_{CO2} représentent respectivement la fraction d'oxygène et de gaz carbonique contenue dans l'air expiré.

FI_{O2} et FI_{CO2} représentent respectivement la fraction d'oxygène et de gaz carbonique contenue dans l'air inspiré. Dans l'air ambiant, ces fractions sont respectivement égales à 20,9 % et 0,03 %, de ce fait, l'équation précédente devient :

$$VO_2 = VE(STPD) \times (0,2648 (1 - FE_{O_2} - FE_{CO_2}) - FE_{CO_2})$$

MESURE DU LACTATE SANGUIN

Le dosage de l'acide lactique sanguin est souvent utilisé avec la mesure des paramètres fonctionnels tels que la fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène pour analyser la capacité physique d'un athlète. La concentration du lactate plasmatique permettrait d'estimer la contribution de la glycolyse anaérobie dans la réalisation d'un exercice physique. Cependant, les valeurs retrouvées de lactatémie ne reflètent que partiellement la production réelle du lactate cellulaire. Néanmoins, lorsqu'il s'agit de comparer le sujet à lui même sur un cycle de préparation, la mesure de l'acide lactique sanguin peut fournir des informations utiles sur les répercussions de la préparation physique sur le métabolisme glycolytique.

Lors de cette étude la concentration sanguine du lactate est mesurée au moyen d'un appareil à dosage automatique du type Analox. Cet appareil, à analyse instantanée, est spécifique à l'acide lactique. Il dispose d'un clavier à plusieurs touches qui permet la programmation de l'analyse à effectuer ; les résultats correspondant sont affichés sur un écran digital à cristaux liquides. L'appareil est également doté d'une imprimante qui permet de recueillir toutes les données et statistiques.

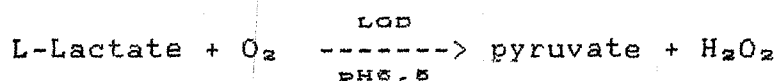
Prélèvement

La mesure de la lactatémie se fait sur un volume de 10 microlitres de sang capillaire prélevé au niveau du lobe de l'oreille. Afin de faciliter l'écoulement sanguin de cette zone richement vascularisée, une pommade révulsive du type "Finalgan" est appliquée, puis le sujet est piqué au moyen d'un vaccino-stylo. Le sang est récupéré dans des tubes capillaires héparinés.

Le volume de sang prélevé est injecté dans l'analyseur par le biais d'une micropipette. L'appareil effectue automatiquement toutes les opérations intermédiaires, en utilisant très peu de réactif. Le résultat correspondant est affiché sur l'écran de l'appareil et imprimé quelques secondes après.

Principe de la méthode

Le lactate sanguin est analysé par la méthode à lactate oxydo-réductase (LOD). Le principe de la méthode se base sur la réaction suivante :



MESURE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE

La fréquence cardiaque est mesurée à l'aide d'un système téléométrique du type Télécust 36 (Siemens). Ce système comporte un appareil émetteur et un appareil récepteur, tous deux autonomes (alimentation sur piles).

L'appareil émetteur est de faible dimension, il pèse 210 g. A partir d'électrodes fixées sur le sujet, il détecte l'électrocardiogramme, l'amplifie, le code (en modulation de fréquence) et l'émet avec une portée efficace de 1000 mètres.

L'appareil récepteur détecte, amplifie, décode les séquences électrocardiographiques et les transforme en une courbe de fréquence cardiaque. Il délivre ces signaux en temps réel.

L'enregistrement de la fréquence cardiaque s'effectue en continue pendant de longues durées, aussi bien au repos et qu'au cours de l'effort.

Pour obtenir un enregistrement utilisable, il est nécessaire d'obtenir le meilleur rapport signal-bruit à l'entrée. La détection de l'électrocardiogramme se fait entre deux électrodes. De plus, un potentiel de référence du circuit est fixé par une troisième électrode (la "neutre"). On choisit l'emplacement optimal des électrodes sous contrôle électrocardiographique. Généralement, une électrode est placée au bord droit du manubrium sternal, au niveau du 4ème espace intercostal. La "neutre" est fixée sur l'appendice xiphoïde.

Les électrodes doivent être fixées solidement sur la peau, traditionnellement dégraissée et parfois rasée, en y interposant une pâte conductrice. La fixation des électrodes est réalisée par une bande adhésive microporeuse, en raison de la pilosité et de la transpiration ainsi que des déplacements relatifs de la peau au cours de l'effort.

L'appareil émetteur est fixé en général à la ceinture, là où le sujet considère que la gêne occasionnée est la moindre.

L'établissement d'une courbe de fréquence cardiaque est obtenue à partir de la mesure d'intervalles entre les impulsions électriques. Le dispositif qui effectue cette opération doit discriminer des variations caractéristiques de l'électrocardiogramme. L'appareil ne comporte aucun réglage et doit craindre que des complexes de faibles amplitudes ne soient comptés, ou que des complexes amples soient comptés deux fois (R et T, par exemple). Il est donc indispensable de pouvoir contrôler la courbe de fréquence cardiaque à partir de la séquence électrocardiographique, pour s'assurer de la valeur de l'enregistrement.

**CONDITIONS CONSEILLEES POUR LA REALISATION D'EXAMENS
ERGOMETRIQUES**

(Séminaire international pour l'Ergométrie, Berlin, 1967,
in Information UNESCO, 1982)

1- MODIFIER AUSSI PEU QUE POSSIBLE le régime alimentaire du jour précédant l'examen.

Le jour même de l'examen, il est admis de prévoir l'ingestion au moins trois heures avant l'épreuve, d'un repas léger à base d'hydrates de carbone.

2- LE JOUR PRECEDANT L'EXAMEN: éviter tout effort exhaustif

Le jour même de l'examen : éviter tout effort physique, même léger, avant le début de l'épreuve afin de réduire l'incidence sur les résultats de l'examen.

3- AVANT L'EXAMEN, il convient d'exposer au sujet testé les modalités du déroulement de l'examen, de le rassurer dans la mesure du possible. Eviter tous facteurs de stress extérieurs : bruits, discussion, courant d'air, vue sur l'extérieur du bâtiment etc.. Toute personne non indispensable au bon déroulement de l'examen doit être écartée.

4- AVANT L'EPREUVE, le sujet doit pouvoir jouir d'une période de repos d'au moins dix minutes, soit en position assise, soit de préférence en décubitus dorsal.

5- LA TEMPERATURE AMBIANTE doit être comprise entre +18 et +22°C et ne peut s'éloigner de la fourchette +16 à +24°C. Lorsque le degré d'humidité est très élevé, il est conseillé de ne pas pratiquer dans la mesure du possible d'exercice ergométrique ou d'évaluer ce dernier sur la base des conditions ambiantes.

6- LORS DE L'EXAMEN, la surface cutanée du sujet doit être dans la mesure du possible libérée de tout vêtement, de manière à ne pas gêner les phénomènes de convection et de radiation de la chaleur, ainsi que la perspiration. L'usage d'un short conviendrait dans cette optique.

7- AUCUNE MEDICATION NI STIMULANT, tels que café, thé ou usage de tabac ne doivent être pris le jour de l'examen. En ce qui concerne les médicaments, dont la durée d'action est longue, il est conseillé d'en éviter l'usage le jour de l'examen.

8- L'HEURE DE L'EXAMEN doit être notée. Il y a lieu dans la mesure du possible, de la conserver lors d'une épreuve répliquative. Des variations dans la mesure ergométrique sont, en effet, enregistrées en fonction du moment de l'examen.

9- TOUTE CONDITION EXPERIMENTALE INHABITUELLE DOIT ETRE RAPPORTEE.

NOTIONS PHYSIQUES DE BASE, GRANDEURS, SYMBOLES, UNITES

La physiologie de l'exercice musculaire est construite sur des lois physiques.

Dans le langage courant, le terme de force est synonyme de vigueur physique. Pour le physicien, ce terme désigne toute cause capable de déformer un corps ou d'en modifier l'état de repos ou de mouvement. La force est le produit de la masse d'un mobile par son accélération. Le Newton (N) est l'unité SI, il correspond à la force nécessaire pour accélérer de 1 m/s^2 une masse de 1 kg ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m/s}^2$).

La propriété fondamentale de la fibre musculaire est de développer une force lors de son activité, force tendant à rapprocher entre elles les deux extrémités de la fibre.

Lors de cette étude, les mesures de force sont rarement utilisées. Les termes les plus usités sont le travail produit, l'énergie dépensée et la puissance développée.

Une force qui déplace son point d'application effectue un travail. Le travail W est le produit de cette force F par le déplacement L dans la direction de la force : $W = F \cdot L$

Un sujet soulevant un objet fournit un travail au sens physique du terme puisqu'il déplace un poids. Il s'agit dans ce cas d'un travail dynamique puisque le muscle se raccourcit.

Le Joule est l'unité SI du travail, de l'énergie et de la quantité de chaleur. Le Joule correspond au travail produit lorsqu'une force de 1 newton est déplacée de 1 mètre.

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

La puissance est définie comme la quantité d'énergie transmise dans un intervalle de temps donné, rapportée par la durée de cet intervalle de temps. L'unité SI de puissance est le watt (W), qui équivaut à 1 joule par seconde ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s}$). Le kilogrammètre par minute (kgm/min) est aussi utilisé en physiologie de l'exercice, il vaut environ 0,167 watts

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 6,118 \text{ kgm/min} = 0,01434 \text{ kcal/min}$$

L'énergie peut changer de forme et passer notamment de la forme chimique à la forme mécanique, puis thermique.

L'énergie dépensée (ou dépense énergétique) lors d'un travail s'exprime selon les conditions expérimentales (nature du protocole et du matériel utilisé) en calories, en joules, en

kilogrammètres ou en volumes d'oxygène consommé. L'unité SI d'énergie est le joule (J), qui est la quantité d'énergie dépensée pour déplacer une masse de 1 kg de 1 m avec une force de 1 newton. L'unité d'énergie employée dans les études de nutrition est la kilocalorie (kcal) qui équivaut à 4,185 kilojoules (kJ) et correspond à la consommation d'environ 200 ml d'oxygène.

La consommation d'oxygène (VO_2) est égale au volume d'oxygène absorbé par unité de temps. En régime constant, la prise d'oxygène et la consommation d'oxygène sont égales. L'équivalent calorique d'un litre d'oxygène varie suivant le mélange des nutriments métabolisés. Mais la variation est faible, et quand le quotient respiratoire est voisin de 0,90, chiffre courant pendant le travail, on peut exprimer la quantité d'énergie dépensée en unités d'oxygène consommé. Un litre d'oxygène équivaut à 5 kcal environ.

La consommation d'oxygène se mesure en général en litre/min, ou en ml/min par kg de poids corporel (ml/kg.min).

La fréquence cardiaque (FC), dite également rythme cardiaque ou encore pouls s'exprime en nombre de battements par minute (bpm) ou en pulsations/min.

L'unité SI de temps (t) est la seconde (s). Ses multiples comme la minute (min), l'heure (h), le jour (d, dies en latin) et l'année (a) sont également acceptés.

L'unité SI de volume (V) est le mètre cube (m^3), mais s'exprime le plus souvent en litre (l) ou en millilitres (ml).

L'unité SI de poids est le newton. La quantité que l'on désigne couramment sous le nom de poids, par exemple le poids corporel, devrait, dans un souci de précision, être désignée par le terme de masse, dont l'unité SI est le kilogramme (kg).

La pression (P) s'exprime en pascals (Pa), 1 Pa étant égal à 0,0075 mmHg. La pression atmosphérique de 760 mmHg, par exemple, équivaut à 101,3 Pa. Cependant la pression sanguine s'exprime encore en mmHg.

Le tableau A1 fournit les coefficients permettant de passer d'un système d'unités à un autre .

Tableau A1: Conversions des unités de puissance utilisées en physiologie de l'exercice musculaire

unités	abrévia- -tions	C O N V E R S I O N S			
		kcal/min	l d'O ₂	W	kgm/min
kilocalorie par minute	kcal/min	1	0,2083* 0,1981**	69,76	426,8
consommation d'oxygène	VO ₂ * **	4,801 5,047	1	334,9 352,1	2049 2154
watt	W	0,01434	2,986.10 ⁻³ 2,840.10 ⁻³	1	6,118
kilogramme mètre par min	kgm/min	2,343.10 ⁻³	4,880.10 ⁻⁴ 4,642.10 ⁻⁴	0,1634	1

* pour un quotient respiratoire de 0,80

** pour un quotient respiratoire de 1,00

Abderrahim BRIKCI

Thèse N°

**PROFIL PHYSIOLOGIQUE DES ATHLETES DE HAUT NIVEAU
(Description et Outils d'évaluation)**

RESUME : *L'entraînement sportif provoque chez les athlètes, des modifications physiologiques immédiates et à long terme, spécifiques, dont le niveau et la nature peuvent être appréciés à partir de la mesure de la capacité aérobie, du seuil anaérobie, et de la capacité anaérobie.*

Les techniques, actuellement disponibles, pour apprécier ces indices physiologiques, présentent des inconvénients liés, notamment, à l'importance des moyens mis en œuvre. Aussi, de nouvelles propositions sont apportées en vue de les adapter à des ressources plus modestes.

MOTS CLEFS : *Capacité aérobie, seuil anaérobie, capacité anaérobie, exercice musculaire, performance sportive, évaluation physiologique.*

TRAVAIL REALISE SOUS LA DIRECTION

DE
Professeur Jean René LACOUR
Université de Saint-Etienne

ET DE
Mlle Yasmina DAHMANI Maître de
conférence U.S.T.H.B. d'Alger

INSTITUTIONS D'ACCUEIL

Centre National de Médecine du Sport
BP 61, El-Biar, Alger

Comité Olympique Algérien
BP 64, El-Biar, Alger