

TESTS D'EVALUATION DE LA PUISSANCE MAXIMALE AEROBIE ET ANAEROBIE

Le 08 Février 1999

{LICENCE 98-99. H. VANDEWALLE et F. FRIEMEL. Sport et Vie, 1989}

| | |
|--|-----------|
| RESUME..... | 3 |
| INTRODUCTION..... | 3 |
| 1. MESURE DE LA PUISSANCE MAXIMALE ANAEROBIE..... | 4 |
| <u>1.1. Méthodes indirectes.....</u> | <u>4</u> |
| <u>1.2. Méthodes indirectes.....</u> | <u>4</u> |
| 1.2.1. Mesure d'une puissance mécanique maximale..... | 5 |
| 1.2.2. Interprétation des courbes de puissance mécanique en fonction du temps..... | 5 |
| <u>1.3. Description des tests.....</u> | <u>6</u> |
| 1.3.1. Tests de détente..... | 6 |
| 1.3.2. Test de l'escalier de Margaria..... | 7 |
| 1.3.3. Test de puissance explosive sur ergocycle..... | 7 |
| 1.3.3.1. Relations force-vitesse..... | 8 |
| 1.3.4. Wingate test..... | 8 |
| <u>1.4. Mesure de la puissance maximale anaérobie lactique.....</u> | <u>10</u> |
| 1.4.1. Comparaison des puissances maximales obtenues avec différents protocoles..... | 11 |
| 2. MESURE DE LA PUISSANCE MAXIMALE DU METABOLISME AEROBIE..... | 11 |
| <u>2.1. Méthodes directes.....</u> | <u>11</u> |
| 2.1.1. Epreuves triangulaires et rectangulaires..... | 13 |
| 2.1.2. Effet du volume musculaire actif sur la valeur de la consommation maximale d'oxygène..... | 13 |
| <u>2.2. Mesure indirecte de la consommation maximale d'oxygène.....</u> | <u>14</u> |
| 2.2.1. Epreuves indirectes sous-maximales..... | 14 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.2. Epreuves indirectes sur ergocycle..... | 15 |
| 2.2.2.1. Epreuve d'Astrand-Ryhming (1954)..... | 15 |
| 2.2.2.2. Epreuve de Fox..... | 16 |
| 2.2.2.3. Détermination de la relation puissance-fréquence cardiaque..... | 17 |
| 2.2.2.4. Step-test..... | 17 |
| 2.2.3. Epreuves indirectes maximales..... | 18 |
| 2.2.3.1. Tests de performance en course à pied (Cooper, 1968)..... | 18 |
| 2.2.3.2. Tests d'intensité progressive..... | 19 |
| 2.2.3.3. Tests progressifs sur ergocycle..... | 19 |
| 2.2.3.4. Test progressif de course de l'université de Montréal (Léger & Boucher, 1980).... | 20 |
| 2.2.3.5. Test progressif de course navette (Léger, 1981; Léger & Gadoury, 1989)..... | 21 |
| CONCLUSION..... | 22 |

RESUME

Une revue critique des différents tests d'évaluation de la puissance maximale des métabolismes aérobie et anaérobie a été réalisée. La question de la mesure des capacités aérobie et anaérobie n'a pas été envisagée. La description des mesures directes précède celle des textes indirects, réalisés en laboratoire ou sur le terrain. La validité et reproductibilité du Wingate test fût l'objet d'un chapitre plus détaillé, car celui-ci est probablement le test anaérobie le plus utilisé actuellement. Cette revue est précédée d'un bref rappel des conditions biomécaniques nécessaires à la mesure d'une puissance mécanique maximale.

INTRODUCTION

L'ATP est la seule source d'énergie chimique directement transformable en énergie mécanique au niveau des protéines contractiles constituant les sarcomères. A elle seule, la faible réserve d'ATP ne permettrait probablement qu'une durée d'exercice maximale de l'ordre de la seconde. D'autre part, une baisse importante de la concentration d'ATP (non observée à l'exercice) serait probablement préjudiciable au fonctionnement des cellules musculaires. Par conséquent, une resynthèse de l'ATP est nécessaire dès le début de l'exercice. On connaît actuellement trois voies métaboliques permettant cette resynthèse de l'ATP : le métabolisme anaérobie alactique, le métabolisme anaérobie lactique, le métabolisme aérobie. Chacun de ces trois métabolismes énergétiques peut être caractérisé par son inertie, sa puissance maximale et sa capacité. Dans l'article présent, nous n'envisagerons que le problème de la mesure de la puissance maximale de ces métabolismes.

Appliquée aux différents métabolismes énergétiques, la notion de puissance correspond à la quantité d'énergie chimique produite ou consommée par unité de temps. L'ATP étant la seule source d'énergie directement utilisable par les sarcomères, on peut définir la puissance des différents métabolismes énergétiques par le débit d'ATP resynthétisé.

La puissance correspond donc à la vitesse des réactions biochimiques, vitesse qui dépend non seulement des concentrations en substrats mais aussi des concentrations et des états d'activité (activation ou inhibition) des différentes enzymes intervenant dans les processus. La transformation d'une énergie chimique en travail nécessite l'intervention d'une chaîne de réactions enzymatiques. La puissance maximale du métabolisme considéré est limitée par la puissance du maillon le plus faible de cette chaîne.

Les tests d'exploration du métabolisme énergétique peuvent être subdivisés en tests directs et tests indirects. Comme pour tout test, il convient de considérer la validité de ceux que nous décrirons. La validité est la qualité d'un test à mesurer réellement ce qu'il est supposé mesurer. La validité d'un test est jugée soit à partir d'arguments théoriques soit en comparant les résultats du test avec ceux d'un autre test antérieurement reconnu comme valide.

Les tests directs sont souvent (parfois hâtivement) considérés comme valides par définition. La validité des tests indirects est donc souvent appréciée en comparant leurs résultats avec ceux d'un test direct.

1. MESURE DE LA PUISSANCE MAXIMALE ANAEROBIE

1.1. Méthodes indirectes

Les ponctions biopsies musculaires effectuées chez des athlètes pratiquant diverses disciplines sportives ont montré une prépondérance de fibres musculaires de type rapide chez les pratiquants des sports de puissance et de vitesse (sprint, sauteurs, lanceurs, haltérophiles). Les fibres musculaires de type rapide possèdent des activités enzymatiques élevées en ce qui concerne autant les enzymes du métabolisme anaérobie alactique que lactique. Il est donc tentant de considérer la ponction biopsie musculaire comme une approche directe de la puissance des métabolismes anaérobies alactique et lactique et comme un 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 prépondérance de fibres rapides ont généralement des performances anaérobies supérieures à celles des sujets présentant une prépondérance de fibres lentes. Si les coefficients de corrélation entre les performances aux tests anaérobies et la typologie musculaire sont en moyenne statistiquement significatifs, ils ne sont généralement pas très bons. Il ne faut cependant pas en déduire hâtivement que la validité des tests anaérobies actuels est mauvaise.

En effet, la validité de la biopsie musculaire comme une approche directe de la puissance maximale anaérobie alactique ou lactique est contestable. Les 20 à 40 mg du muscle prélevé ne sont pas forcément représentatifs du muscle entier et a fortiori des différents groupes musculaires agonistes et antagonistes. De plus, il faut émettre une hypothèse sur la masse musculaire active. De même, il convient de rappeler qu'en dehors de toutes considérations techniques et psychomotrices, des sujets possédant la même composition en fibres musculaires lentes et rapides peuvent avoir des performances différentes. Il faut en effet tenir compte de la dimension des bras de levier musculaires et osseux ainsi que de l'angle de pennation des fibres musculaires à l'intérieur des muscles.

Si la biopsie musculaire reste un examen intéressant dans le domaine de la recherche et dans celui de l'orientation sportive, elle ne permet en fait qu'une estimation actuellement indirecte des propriétés musculaires en montrant une éventuelle prépondérance d'un type de fibres musculaires.

1.2. Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisées actuellement consistent en la détermination de la valeur maximale de la puissance mécanique externe que le sujet est capable de produire. La mesure de la puissance maximale anaérobie pose trois types de problème :

- la durée de l'exercice doit être très courte afin que la puissance mesurée soit réellement maximale : la puissance maximale décroît rapidement lorsque l'exercice se prolonge (Wilkie, 1960 ; Davies, 1971 ; Kyle & Caizzo, 1986) ;

- la production d'une puissance réellement maximale nécessite des conditions optimales de force et de vitesse ;
- plus la durée de l'exercice est brève plus la participation des métabolismes anaérobie lactique et aérobie est limitée. La production d'acide lactique commence dès les premières secondes d'exercice et seuls les exercices très brefs (1 sec et moins) sollicitent uniquement le métabolisme anaérobie alactique.

Avant de décrire les principales méthodes indirectes de détermination de la puissance maximale anaérobie il convient de faire un rappel sur les conditions d'obtention d'une puissance mécanique maximale.

1.2.1. Mesure d'une puissance mécanique maximale

La puissance est égale au produit d'une force et d'une vitesse. Depuis les travaux de Fenn & Marsh (1935) et de Hill (1938), il est connu que la vitesse de raccourcissement musculaire dépend de la force qui s'oppose au déplacement et que, réciproquement, la force que peut exercer un muscle dépend de la vitesse du raccourcissement. D'après Hill (1938), la relation liant la vitesse de raccourcissement V et la force F est :

$$(F+a) (V+b) = b(F_0+a) = a(V_0+b)$$

où :

F_0 est la force maximale isométrique,

V_0 la vitesse maximale de raccourcissement,

a et b des paramètres ayant respectivement la dimension d'une force et d'une vitesse.

La puissance produite lors d'une contraction est égale au produit $F.V$ et dépend donc de la vitesse et de la force selon les relations suivantes:

$$P = a.V(V_0 - V)/(V + b) = b.F(F_0 - F)/(F + a)$$

La puissance maximale correspond à des valeurs optimales de force et de vitesse.

Ces résultats, obtenus sur le muscle isolé, ont été retrouvés par la suite chez l'homme (Wilkie, 1950 ; Pertuzon & Bouisset, 1971 et 1973 ; Binkhorst et al., 1977) pour des mouvements mono-articulaires.

1.2.2. Interprétation des courbes de puissance mécanique en fonction du temps

Dans la chaîne de réactions enzymatiques intervenant en série, on peut distinguer deux types de réactions :

1. la réaction d'hydrolyse de l'ATP au niveau des ponts actine-myosine et,
2. les réactions de resynthèse de l'ATP.

Dans le cas du métabolisme anaérobie alactique, la créatine-phosphate-kinase (CPK) est la seule enzyme assurant la resynthèse de l'ATP. La puissance mécanique maximale d'un exercice où le métabolisme anaérobie alactique assure la quasi totalité de la dépense énergétique dépend donc de l'activité la plus faible de ces deux réactions. Même dans ce cas simple, il n'est pas facile de discerner quelle est la réaction qui représente le facteur limitant à un instant donné. L'activité myosine ATPase et celle de la CPK sont toutes deux élevées au niveau du muscle squelettique au début de l'exercice. La diminution de la resynthèse

d'ATP par les différents métabolismes énergétiques n'est vraisemblablement pas la seule explication de la diminution de puissance observée lors d'un exercice maximal de brève durée. D'autres mécanismes interviennent probablement : diminution du nombre de ponts d'actine-myosine, baisse de la vitesse de formation des ponts d'actine-myosine, etc. Dans l'état actuel de nos connaissances, il est donc trop tôt pour décider du facteur limitant la puissance mécanique produite à un instant donné. Par exemple, une valeur élevée de la puissance produite entre la 5^{ème} et la 10^{ème} secondes d'un exercice maximal peut être interprétée comme l'indice soit d'une capacité alactique importante, soit d'une puissance lactique élevée, soit d'une résistance à la fatigue. Il est donc actuellement préférable d'éviter les termes de puissance maximale anaérobie alactique et lactique dans la dénomination des tests fondés sur la mesure d'une puissance mécanique ou d'un travail produits lors d'un exercice de brève durée.

1.3. Description des tests

1.3.1. Tests de détente

La détente verticale a été proposée par D.A. Sargent (1921) et son homonyme L.W. Sargent (1924) comme test de puissance musculaire générale. Sur le plan théorique la détente verticale a plutôt la dimension d'un travail que celle d'une puissance. Cependant, des études récentes relancent l'intérêt de la détente verticale pour les considérations suivantes :

- les sujets qui présentent les détentes verticales les plus élevées possèdent statistiquement un plus grand pourcentage de fibres rapides ;
- une étude réalisée sur plate-forme de force (Davies & Young 1984) montre que la hauteur atteinte lors d'une détente verticale est corrélée avec le pic de puissance produit pendant la phase d'impulsion. Cette même étude montre une excellente corrélation entre ce pic de puissance et la puissance maximale sur bicyclette ergométrique ;
- il existe une assez bonne corrélation entre détente verticale et puissance maximale sur ergocycle (Vandewalle et al., 1987).

Le test de détente verticale conserve donc certainement un intérêt dans la surveillance de l'entraînement des athlètes des sports de force, de puissance et de vitesse.

La valeur de la détente verticale diffère selon le protocole utilisé. Par exemple, les détentes mesurées sur plate-forme sont nettement inférieures à celles obtenues avec les autres protocoles (Vandewalle et al., 1987). Il est donc nécessaire d'employer toujours le même protocole si on désire faire des comparaisons. A notre avis, les protocoles utilisant la hauteur maximale atteinte avec la main devraient être réservés aux sportifs habitués à ce type d'exercice (volleyeurs, handballeurs et basketteurs). La reproductibilité de la densité verticale est bonne, à condition d'autoriser les sujets à répéter ce test plus de trois fois par séance de mesure et de ne conserver que la meilleure valeur.

1.3.2. Test de l'escalier de Margaria

En 1966, Margaria a proposé un test de mesure de la puissance maximale anaérobie consistant en la montée à vitesse maximale d'un escalier. La vitesse de montée est mesurée au moyen de cellules photoélectriques disposées selon les protocoles soit sur les 4^{ème} et 8^{ème} marches, soit sur les 6^{ème} et 12^{ème} marches.

Une course d'élan sur le palier horizontal précède cette montée qui est réalisée 2 marches par 2 ou 3 par 3 selon le protocole. Compte tenu de la phase d'élan avant la 6^{ème} marche, on suppose que la vitesse du sujet est constante entre la 6^{ème} et la 12^{ème} marche et que par conséquent le seul travail réalisé pendant ce temps est celui réalisé contre la force de pesanteur. La puissance fournie est donc égale à :

$$P = mgh/t$$

où

m est la masse corporelle (kg),

g l'accélération de la pesanteur (9,81 m.s⁻²),

h la différence de niveau (en mètres) entre la 6^{ème} et la 12^{ème} marche et le temps de monté (en secondes).

Ce test qui a été très utilisé dans les années qui suivirent sa publication a été abandonné par la suite pour les raisons suivantes :

1. les forces mises en jeu dans ce test sont inférieures à celles permettant de produire la puissance maximale. L'utilisation de surcharge (par exemple un gilet lesté) permet généralement de produire une puissance supérieure lors de cette épreuve ;
2. des problèmes de coordination chez certains sujets qui éprouvent des difficultés à monter l'escalier à vitesse maximale tout en posant les pieds à un endroit déterminé (6^{ème} et 12^{ème} marches, par exemple). Des modifications de protocole (utilisation d'un gilet lesté, d'autres capteurs de déplacement, d'un plan incliné au lieu d'un escalier...) devraient améliorer la validité de cette épreuve ; aussi le désengouement pour ce test n'est peut-être que temporaire.

1.3.3. Test de puissance explosive sur ergocycle

Ayalon et al. (1974) ont proposé de mesurer un indice de puissance explosive sur bicyclette ergométrique. Une charge indépendante (test de puissance explosive absolue ; 2,9 kg pour un ergocycle de Fleish) ou dépendante de la masse corporelle du sujet (test de puissance explosive relative ; 0,040 kg.kg⁻¹ pour un ergomètre de Fleish) est utilisée. Le sujet effectue une extension maximale du membre inférieur et le temps nécessaire pour un déplacement angulaire de la pédale égal à 120° est mesuré avec une précision du centième de seconde. Trois essais sont effectués et la valeur moyenne des temps est utilisée dans le calcul de la puissance produite. Ces auteurs ne tiennent pas compte des forces d'inertie (membre inférieur et volant de l'ergocycle) qui représentent probablement une part importante de l'énergie dépensée, ce qui diminue la validité du test.

D'autre part ils supposent que la force de freinage correspond (à un facteur près) à la charge, ce qui n'est vrai que quand la charge est stabilisée. Or la charge n'est pas stabilisée dans ce test. Un exercice

d'extension contre la simple inertie de la roue est à priori plus intéressant et correspond en fait au test décrit par Hill (1922, 1924) il y a plus de 60 ans.

1.3.3.1. Relations force-vitesse

La détermination de la relation force-vitesse d'un groupe musculaire est une méthode d'étude de ses propriétés contractiles.

Cependant, l'obtention d'une relation force-vitesse qui exprime réellement les propriétés mécaniques d'un groupe musculaire nécessite l'observation de certaines conditions qui alourdissent le protocole et sont donc rarement remplies. Cependant, les relations force-vitesse obtenues chez l'homme lors de mouvements mono ou poly-articulaires, lors de mouvements balistiques ou cycliques, restent généralement intéressantes en pratique, même si leur protocole n'est pas toujours satisfaisant sur le plan biomécanique.

A partir des travaux antérieurs sur la relation force-vitesse et les protocoles préexistants concernant la mesure de la puissance maximale sur bicyclette ergométrique (Ayalon et al., 1974 ; Pimay & Crielaard 1977), un test force-vitesse sur ergocycle Monark réalisable avec les membres inférieurs ou supérieurs a été mis au point (Pérès et al., 1981 ; Vandewalle et al., 1983 et 1987). Pour les pics de vitesse compris entre 1 W et 2 W tours par minute, la relation force-vitesse peut être écrite sous la forme suivante:

$$V = V_0(1 - F/F_0)$$

où

V est le pic de vitesse correspondant à la force F,

V_0 l'intersection de la droite représentative de la relation force-vitesse avec l'axe des vitesses et F_0 l'intersection de cette même droite avec l'axe des forces,

V_0 et F_0 ont la dimension respectivement d'une fréquence maximale de pédalage et d'une force maximale.

La puissance maximale W max est obtenue pour un pic de vitesse égal à $0,5 V_0$ et une force égale à $0,5 F_0$. W max est donc égal à $0,25 V_0 F_0$.

1.3.4. Wingate test

Parmi les nombreux tests anaérobies qui ont été proposés, le Wingate test, et ses dérivés, est probablement celui qui est le plus utilisé dans le monde actuellement. Ce test consiste en un exercice de pédalage à vitesse maximale pendant 30 secondes contre une force de freinage constante établie en fonction du poids corporel : 75 g par kg de poids corporel dans l'étude princeps (Ayalon et al., 1974), puis environ 87 g par kg dans une étude plus récente (Dotan & Bar-Or, 1983). Trois indices sont mesurés :

1. la valeur du pic de vitesse,
2. la quantité de travail effectuée pendant les 30 secondes,
3. la baisse de puissance au cours de l'épreuve.

La valeur du pic de vitesse multipliée par la force de freinage donne la valeur du pic de puissance pendant l'épreuve et est présentée comme une estimation de la puissance maximale anaérobie. La quantité de travail

réalisée pendant l'épreuve est présentée comme une estimation de la capacité maximale anaérobie. La baisse de puissance (différence entre le pic de puissance et la valeur la plus basse de la puissance pendant l'épreuve, divisée par le temps écoulé entre le pic et le moment où la valeur la plus basse est atteinte) est un indice de fatigabilité dont l'intérêt est qu'une corrélation positive a été trouvée entre cet indice et le degré d'hypertrophie des fibres musculaires de type rapide. Cet indice de fatigue aurait donc pu être un test d'évaluation indirecte de la typologie musculaire.

Les études les plus récentes remettent en question l'intérêt du Wingate test dans l'exploration fonctionnelle du métabolisme anaérobie. Comme pour tout test, les critiques portent sur sa reproductibilité et sa validité. La reproductibilité de la mesure du pic de puissance est très bonne dans toutes les études ($r > 0,90$ pour Bar-Or et al., 1977 et Patton et al., 1985). Celle de la quantité de travail réalisée en 30 sec est aussi bonne ($0,90 < r < 0,93$).

Par contre, la reproductibilité de l'indice de fatigue est mauvaise ($0,43 < r < 0,74$).

Le Wingate test mesure-t-il réellement ce qu'il est supposé mesurer ? Autrement dit,

1. le pic de puissance est-il une bonne estimation de la puissance maximale anaérobie,
2. la quantité de travail réalisée pendant l'épreuve est-elle une estimation de la capacité anaérobie,
3. l'indice de fatigue est-il un bon reflet de la typologie musculaire ?

La critique essentielle de la validité du pic de puissance comme estimation de la puissance maximale est d'ordre biomécanique. Il n'est pas possible de déterminer la force de freinage d'un Wingate test qui soit a priori optimale pour tous les sujets (Vandewalle et al., 1987). Compte tenu du caractère très éprouvant de ce test, il n'est pas possible de recommencer l'épreuve dans le cas où la force de freinage utilisée s'avérerait a posteriori trop différente de la force optimale. L'estimation de la puissance maximale anaérobie au moyen du Wingate test est donc a priori moins précise que celles obtenues au moyen d'exercices plus brefs qu'il est alors possible de répéter plusieurs fois dans une même séance contre différentes forces de freinage (Pirnay & Crielaard, 1979 ; Pérès et al., 1981 ; Sargeant et al., 1981, Vandewalle et al., 1983 et 1987).

La validité de la quantité de travail réalisé pendant le Wingate test comme indice de capacité maximale anaérobie est discutable. La durée du Wingate test est trop courte pour épuiser les réserves énergétiques anaérobies mais cependant encore trop longue pour que le métabolisme aérobie soit négligeable. A la 30^{ème} secondes de l'épreuve, la puissance fournie est généralement encore nettement supérieure à la valeur de la puissance maximale aérobie et par conséquent, a fortiori, à la puissance de métabolisme aérobie à cet instant. Dans les études où l'exercice est prolongé au-delà de 30 secondes, la puissance produite diminue de façon exponentielle et n'est équivalente à la puissance maximale aérobie qu'au bout d'environ 1 min (Katch, 1973). La capacité anaérobie n'est donc pas épuisée à la 30^{ème} secondes. D'autre part, la durée de l'exercice est suffisamment importante pour qu'il ne soit plus possible de négliger la participation du métabolisme aérobie. Le pourcentage de l'énergie provenant du métabolisme aérobie a été estimée comprise entre 13 et 28%. Ce pourcentage devrait être plus élevé chez les athlètes ayant une valeur élevée de consommation maximale d'oxygène et une faible constante de temps d'adaptation du métabolisme aérobie que chez des athlètes de puissance ayant une faible consommation maximale d'oxygène. A ce sujet

il est intéressant de citer les travaux récents effectués à Clermont Ferrand montrant que chez les enfants qui ont une constante de temps d'adaptation du métabolisme aérobie et une puissance maximale anaérobie généralement faibles, ce pourcentage de participation du métabolisme aérobie semble plus élevé que chez l'adulte moyen (Bedu et al., 1988).

S'il a été trouvé une corrélation positive significative entre l'indice de fatigue et le degré d'hypertrophie des fibres musculaires rapides, il convient de rappeler que, dans cette même étude, les corrélations entre l'indice de fatigue et le pourcentage de fibres rapides (en nombre ou en surface) n'étaient pas significatives. Dans une étude plus récente (Froese & Houston, 1987), la corrélation la plus significative entre typologie musculaire et résultats au Wingate test était observée avec la valeur du pic de puissance et non pas avec l'indice de fatigue. De plus il existe des arguments suggérant que l'indice de fatigue dépend aussi du métabolisme aérobie. La consommation d'oxygène à la 30^{ème} secondes d'exercice est élevée, aux environs de 75% de la consommation maximale. Un sujet ayant une faible puissance maximale anaérobie mais une consommation maximale d'oxygène élevée avec une brève constante de temps devrait avoir un indice de fatigue plus faible qu'un sujet très puissant mais ayant une consommation maximale d'oxygène peu élevée. Ceci pourrait expliquer pourquoi il a été trouvé dans certaines études des corrélations significatives entre consommation maximale d'oxygène et indice de fatigue : plus la consommation maximale d'oxygène est élevée plus l'indice de fatigue est faible. D'autre part, dans une étude récente réalisée à Saint-Etienne (C. Denis, communication personnelle), la confrontation des résultats du Wingate test avec ceux d'une biopsie musculaire montre que l'indice de fatigue est corrélé avec les activités enzymatiques mitochondriales, c'est-à-dire des enzymes intervenant dans le métabolisme aérobie.

1.4. Mesure de la puissance maximale anaérobie lactique

Compte tenu de la mise en jeu des métabolismes aérobie et anaérobie plus rapide que ce qui était classiquement admis, il est difficile de concevoir un test ergométrique simple qui permette une évaluation précise de la puissance maximale anaérobie lactique. Margaria et al, 1964) ont étudié la puissance maximale du métabolisme anaérobie lactique avec le protocole expérimental suivant.

Le sujet réalise des exercices à différentes puissances. Pour chaque puissance d'exercice, il réalise plusieurs répétitions de différentes durées. Pour chaque puissance, la concentration d'acide lactique est mesurée à un moment donné de la récupération et la relation entre lactatémie et durée d'exercice est ensuite établie. On constate alors que, pour une puissance d'exercice donnée, la relation lactatémie durée d'exercice peut être assez bien décrite par une relation linéaire ($Y = a + bX$ où Y est la lactatémie et X la durée d'exercice). Dans l'expérience de Margaria la pente de ces droites est quasiment identique et maximale pour des puissances d'exercice élevées. Seule l'intersection avec l'axe des durées (paramètre a) varie avec la puissance d'exercice : plus la puissance est élevée, plus le paramètre a est faible.

Si on admet que le volume de dilution des lactates est le même quelles que soient la puissance et la durée de l'exercice, la lactatémie reflète la quantité de lactate produite et par conséquent la pente de ces droites, quotient d'une quantité de lactate par une durée, a la dimension d'un débit de lactate. Il est alors tentant de considérer

que la valeur maximale de b corresponde au débit maximal de lactate, c'est-à-dire la puissance maximale du métabolisme anaérobie lactique.

Un certain nombre de critiques doivent être faites :

1. quelle que soit sa validité, une telle méthode est difficilement réalisable en pratique médico-sportive car elle nécessite de nombreuses séances de mesure ;
2. cette interprétation des résultats suppose:
 - que les lactatémies sont proportionnelles aux quantités de lactate produites. Ceci suppose que le volume de dilution et la cinétique des lactates sont indépendants de la durée et de la puissance des exercices supra-maximaux ;
 - qu'au début de l'exercice, le débit de lactate est constant dans le temps pour une puissance donnée. Ceci est probablement vrai à condition d'exclure les exercices très brefs.

1.4.1. Comparaison des puissances maximales obtenues avec différents protocoles

Les études ayant comparé les valeurs des puissances maximales obtenues avec différents protocoles de mesure ont généralement trouvé des coefficients de corrélation significatifs (Davies, 1971 ; Pérès et al., 1988) mais des valeurs moyennes statistiquement différentes. Les différences entre les puissances maximales obtenues selon différents protocoles ont de nombreuses origines : la puissance calculée est une puissance maximale instantanée ou une valeur maximale de puissance moyenne, l'exercice est mono ou poly-articulaire, la puissance est produite par 1 ou 2 membres inférieurs mis en jeu simultanément ou successivement, la durée d'exercice est plus ou moins longue, l'inertie des segments corporels est ou n'est pas prise en compte ...

Quels que soient les tests utilisés, ceux-ci montrent :

des valeurs de puissance maximale anaérobie supérieures chez les athlètes pratiquant des sports de puissance et de vitesse (Komi et al., 1977 ; Vandewalle et al., 1987 ; Seresse et al., 1989) ;

des valeurs nettement plus faibles chez l'enfant que chez l'adulte même lorsque les résultats sont rapportés à la masse corporelle (Crielaard & Pirnay, 1985 ; Bedu et al., 1989 ; Vandewalle et al., 1989) contrairement à ce qui est observé en ce qui concerne le métabolisme aérobie.

2. MESURE DE LA PUISSANCE MAXIMALE DU METABOLISME AEROBIE

2.1. Méthodes directes

En fait, c'est le prélèvement maximal d'oxygène (maximal oxygen uptake des anglophones) qui est mesuré et non pas la consommation maximale d'oxygène. En pratique cette distinction n'est pas fondamentale lorsque les mesures sont réalisées en état stable car il existe peu de réserve d'oxygène dans l'organisme et la quasi-

totalité de l'oxygène prélevé par l'organisme est utilisée dans des réactions de combustion (les peroxydations importantes sur le plan fonctionnel sont quantitativement négligeables).

La validité de la mesure du prélèvement maximal d'oxygène comme méthode d'évaluation de la puissance maximale de resynthèse aérobie de l'ATP n'est pas discutée. Bien que le nombre de molécules d'ATP synthétisées par molécule d'oxygène consommée soit sensiblement différent pour la combustion des glucides et celle des lipides (6,5 pour les glucides et 5,7 pour les lipides), cette différence peut être négligée en pratique. En effet, lors de l'atteinte de la consommation maximale d'oxygène les glucides représentent la presque totalité des substrats oxydés.

Il est évidemment nécessaire que la consommation d'oxygène mesurée soit maximale. Le meilleur critère d'atteinte de la consommation maximale d'oxygène est l'observation d'un plateau de consommation (Shephard et al., 1968 ; Astrand & Rodahl, 1973) lorsque la puissance d'exercice est augmentée.

Cependant, un plateau de consommation d'oxygène n'est souvent pas observé (Noakes, 1988) en particulier chez l'enfant. La valeur la plus élevée de consommation d'oxygène mesurée devrait alors être dénommée pic de consommation au lieu de consommation maximale. Toutefois, dans de nombreux cas, le pic de consommation est considéré comme proche de la consommation maximale quand d'autres critères sont respectés : fréquence cardiaque proche de la fréquence cardiaque maximale réelle ou théorique, quotient respiratoire supérieur ou égal à 1,1, lactatémie supérieure à 8 mmol.l⁻¹ (Lacour & Flandrois, 1977). Chez l'enfant les critères d'atteinte d'une consommation d'oxygène proche de la consommation maximale d'oxygène sont moins exigeants : quotient respiratoire égal ou supérieur à 1 et lactatémie supérieure à 6 mmol.l⁻¹ (Sheehan et al., 1987).

Un plateau de consommation d'oxygène est rarement observé dans les exercices réalisés avec des masses musculaires peu importantes comme ceux réalisés avec les membres supérieurs, un seul membre inférieur et les exercices mono-articulaires (Davies & Sargeant 1974 a et b ; Lewis et al., 1983 ; Shephard et al., 1988 ; Hartling et al., 1989).

L'absence de plateau peut s'expliquer :

1. par l'importance des cocontractions des muscles ne participant pas directement à la production du travail ;
2. par une fatigue musculaire provoquée par l'accumulation de métabolites.

Si la première explication de l'absence de plateau est la bonne, le pic de consommation d'oxygène est supérieur à la consommation maximale d'oxygène du groupe musculaire considéré. Au contraire, si une fatigue musculaire explique l'absence de plateau dans les exercices locaux et généraux, on doit en tirer les conclusions suivantes :

- le facteur limitant la VO₂ max pourrait être l'hydrolyse de l'ATP et non pas les facteurs limitant la resynthèses aérobie de l'ATP ;
- la validité du pic de VO₂ comme mesure de la puissance maximale de resynthèse aérobie serait donc contestable ;
- le pic de VO₂ mesuré est inférieur à la consommation maximale d'oxygène du groupe musculaire étudié.

Lors de la surveillance de l'entraînement d'un sportif, il faut se méfier des variations trompeuses de VO_2 max entre 2 séances, de mesure :

- comparaison d'un pic de VO_2 (absence de plateau de consommation d'oxygène) avec une véritable VO_2 max ;
- confiance excessive dans la précision des mesures réalisées avec certains appareil automatisés. En pratique courante la marge d'erreur avoisine probablement plus ou moins 5% avec ce type de matériel.

Cette marge d'erreur, acceptable pour une mesure physiologique, est malheureusement aussi importante que les faibles progrès observés chez les athlètes de haut niveau.

2.1.1. Epreuves triangulaires et rectangulaires

Les protocoles de mesure de VO_2 max peuvent être subdivisés en protocoles triangulaires et rectangulaires. Dans les protocoles triangulaires, la puissance d'exercice croît par paliers de 1 à 4 min sans repos entre les différents paliers jusqu'à l'atteinte d'un plateau de VO_2 ou jusqu'à l'épuisement du sujet. VO_2 est mesurée en continu ou à la dernière minute des paliers. Dans les protocoles rectangulaires, le sujet réalise une série d'exercices de 5 à 6 min. Des intervalles de récupération de 3 à 10 min séparent généralement les différents exercices mais, dans le cadre d'études expérimentales, cet intervalle peut dépasser la journée. La puissance des paliers croît de 20 à 50 W sur ergocycle ; sur tapis roulant soit la vitesse est augmentée de 1 ou 2 $km.h^{-1}$, soit la pente est accentuée de 2 ou 3%. Si le plateau de consommation d'oxygène semble plus net dans les protocoles rectangulaires, les différences de VO_2 max mesurées avec les protocoles rectangulaires et triangulaires sont peu importantes (Taylor et al., 1955 ; Maksud & Coutts, 1971; McArdle et al., 1973 ; Fardy & Hellerstein, 1978). Aussi, les épreuves triangulaires sont généralement utilisées pour des raisons de commodité.

2.1.2. Effet du volume musculaire actif sur la valeur de la consommation maximale d'oxygène

La valeur de la consommation maximale d'oxygène dépend fortement du volume musculaire mis en jeu dans l'exercice (Bouhlef, 1988 ; Shephard et al., 1988). Plus de volume musculaire actif est important plus la consommation maximale d'oxygène est élevée. La consommation maximale d'oxygène dépend donc du type d'exercice pendant lequel elle est mesurée. Chez des sujets non spécialisés en cyclisme, les consommations maximales d'oxygène mesurées sur tapis roulant avec pente d'au moins 3% sont généralement supérieures (5 à 10%) à celles mesurées sur bicyclette ergométrique (Astrand & Saltin, 1961 ; Herrnansen & Saltin, 1969 ; Bergh et al., 1976). Cependant, chez des cyclistes de haut niveau, les valeurs de VO_2 max mesurées sur ergocycle sont supérieures à celles mesurées sur tapis roulant avec 3% de pente (Stromme et al., 1977).

En l'absence de pente, la consommation mesurée sur tapis roulant peut ne pas être supérieure à celle mesurée sur bicyclette ergométrique (Astrand & Saltin, 1961). Ces différences sont parfois interprétées comme la mise en jeu d'une masse musculaire plus importante dans les exercices sur tapis roulant avec pente que dans ceux sur bicyclette ergométrique.

Il est possible qu'une fréquence de pédalage trop basse explique aussi en partie les valeurs inférieures sur bicyclette ergométrique (Pérès et al., 1987), car la fréquence cardiaque maximale mesurée à 60 tours par min est inférieure à celle mesurée à 90 et 120 tours par min.

Cependant, il n'existe pas une proportionnalité entre consommation d'oxygène et volume musculaire (Bouhler, 1988 ; Shephard et al., 1988). Ainsi, la consommation d'oxygène mesurée pendant un exercice réalisé avec les 2 jambes est inférieure au double de celle mesurée lors d'un exercice réalisé avec une seule jambe (Gleser, 1973 ; Davies & Sargeant, 1974 a et b ; Neary & Wenger, 1986 ; Bouhler, 1988 ; Shephard et al., 1988). De même, le fait d'ajouter un exercice de bras à un exercice des membres inférieurs n'augmente que peu (5 à 10% pour Secher et al., 1974 ; Reybrouk et al., 1975) ou pas (Astrand & Saltin, 1961 ; Stenberg et al., 1967) la consommation maximale d'oxygène. Holmer (1974) a observé que chez une nageuse atteignant $2,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ en nage avec les bras et $3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ avec les jambes la consommation maximale d'oxygène pendant la nage bras + jambes était de $3,6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. L'augmentation de la VO_2^{max} lors d'un exercice bras + jambes par rapport à un exercice jambes seules serait plus marquée et plus fréquente chez les sujets entraînés avec les bras (Secher et al., 1974). Autrement dit, la consommation maximale d'oxygène rapportée au volume musculaire actif est d'autant plus élevée que ce volume est faible. Les effets de l'entraînement sur les facteurs locaux limitant la VO_2^{max} (Rieu, 1988) et les variations interindividuelles dans le développement des différents groupes musculaires pourraient expliquer la spécificité de VO_2^{max} (Holmer & Astrand, 1972 ; Roberts & Alspaugh, 1972 ; Magel et al., 1975 ; Vrijens et al., 1975 ; Stromme et al., 1977 ; Bouchard et al., 1979). Idéalement, la mesure de VO_2^{max} devrait donc être réalisée pendant le même type d'exercice que celui ou ceux réalisés à l'entraînement pour mettre en évidence les effets éventuels de celui-ci sur la puissance maximale aérobie.

2.2. Mesure indirecte de la consommation maximale d'oxygène

Les épreuves destinées à l'estimation indirecte de VO_2^{max} peuvent être subdivisées en épreuves maximales et épreuves sous-maximales. Toutes ces épreuves possèdent à des degrés divers les mêmes sources d'imprécision :

- l'incertitude sur le coût énergétique individuel de l'exercice est la principale source d'erreur ;
- la participation plus ou moins importante du métabolisme anaérobie est une deuxième source d'imprécision de la prédiction de VO_2^{max} dans les tests où le sujet réalise un exercice maximal ;
- l'incertitude sur la fréquence cardiaque maximale dans le cas des tests sous-maximaux ;
- l'incertitude sur le caractère maximal de l'exercice chez des sujets peu motivés dans le cas des épreuves indirectes maximales.

2.2.1. Epreuves indirectes sous-maximales

Les épreuves indirectes sont fondées sur la mesure d'une fréquence cardiaque à l'état stable d'un exercice sous-maximal. Ces exercices sous-maximaux consistent généralement soit en un exercice de pédalage sur

ergocycle, soit en la montée d'une marche (step-test). La durée de ces exercices est suffisante (5 min et plus) pour qu'un état relativement stable se soit installé. La puissance d'exercice doit être suffisamment sous-maximale pour que le métabolisme aérobie assure la quasi-totalité de la demande énergétique.

2.2.2. Epreuves indirectes sur ergocycle

2.2.2.1. Epreuve d'Astrand-Ryhming (1954)

Cette méthode d'estimation indirecte de VO_2 max est la plus connue de toutes. Elle est fondée sur les deux hypothèses suivantes :

- il existe une relation linéaire entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène pour les exercices sous-maximaux. Statistiquement, à un pourcentage donné de la consommation maximale d'oxygène correspond, à l'état stable, une fréquence cardiaque. Ainsi, chez l'homme adulte, 128 battements par minute à l'état stable correspondent à 50% de VO_2 max et 154 battements par minute à 70% de VO_2 max. Ceci peut être présenté sous la forme d'une équation :

$$\% \text{VO}_2 \text{ max} = 0,77 \text{ Fc} - 48,6$$

- pour une même puissance d'exercice, le rendement mécanique est supposé peu différent d'un sujet à l'autre (23%) et, par conséquent, il est possible d'exprimer la puissance d'exercice en équivalent oxygène. Connaissant la puissance d'exercice, la consommation d'oxygène pendant l'épreuve peut être supposée. Par exemple, si le sujet effectue un exercice de 150 W, la valeur la plus probable de sa consommation d'oxygène à l'état stable de cet exercice est de 2,1 L.min⁻¹.

L'épreuve consiste donc à faire pédaler le sujet pendant 6 min à une puissance constante (pour des sujets moyens, 150 W pour les hommes et 100 W pour les femmes). La fréquence cardiaque est mesurée pendant la dernière minute quand l'état est considéré comme stable. La fréquence cardiaque doit être au minimum de 130 bpm. Un nomogramme (Astrand & Ryhming, 1954 ; Astrand & Rodahl, 1973) dispense l'utilisateur des calculs de dépense énergétique et de pourcentage de VO_2 max et donne rapidement la VO_2 max prédite.

L'incertitude sur le coût énergétique est une cause d'erreur importante. L'écart type du rendement est de plus ou moins 6%. En pratique, une source d'imprécision supplémentaire est la non-observation de la fréquence de pédalage. La relation entre fréquence cardiaque et pourcentage de VO_2 max est médiocre. Il existe un écart type d'environ 9 battements pour un même pourcentage de VO_2 max chez l'adulte (Astrand & Rodahl, 1973). Ceci signifie que 68% des sujets travaillant à 50% de VO_2 max ont une fréquence cardiaque comprise entre 119 et 137 bpm.

De plus, la relation entre fréquence cardiaque et pourcentage de VO_2 max est différente chez l'enfant et chez l'adulte (Bedu et al., 1985 ; Vidalin et al., 1989) :

$$\text{Fc} = 1,126\% \text{VO}_2 \text{ max} + 90,3 \text{ (enfant de 10-12 ans)}$$

La variabilité des fréquences cardiaques maximales est une des causes de variation de la relation fréquence cardiaque-pourcentage de VO_2 max. Dans l'étude d'Astrand & Ryhming (1954) la fréquence cardiaque maximale était de 195 bpm. Cette fréquence est nettement supérieure à celles observées chez les sujets âgés. C'est pourquoi, Astrand Ryhming proposa une table de facteurs de correction qui tient compte de la fréquence cardiaque maximale réelle ou théorique selon l'âge (Astrand & Rodahl, 1973).

Il existe une corrélation significative entre la prédiction et la valeur réelle de VO_2 max (Astrand & Rodahl, 1973 ; Flandrois et al., 1962). L'écart type de la prédiction de VO_2 max à partir du nomogramme est de 15%, même en tenant compte du facteur de correction (Astrand & Rodahl, 1973). Ainsi 95% des sujets sont théoriquement évalués avec une marge d'erreur de plus ou moins 30%. La précision de la méthode est donc limitée. Dans l'étude de Vidalin et al. (1989), les valeurs prédites à partir du nomogramme d'Astrand sont sous-estimées pour toutes les catégories d'âge.

La reproductibilité est bonne lorsque l'épreuve est reproduite dans les mêmes conditions d'horaire, de climat, d'entraînement et de fatigue et lorsque la fréquence de pédalage est vérifiée au tour près.

En pratique courante la reproductibilité est probablement moins bonne car on se contente généralement de respecter les recommandations d'Astrand et Ryhming (1973) : absence de tout exercice physique et abstinence du tabac et d'excitants (café) dans les heures qui précèdent, délai de 2 à 3 h après un repas copieux, mesure de la fréquence cardiaque pendant l'état stable de l'exercice et non pendant la récupération.

2.2.2.2. Epreuve de Fox

Fox (1973) a proposé une méthode simple de prédiction de la VO_2 max fondée sur une équation linéaire entre la VO_2 max directe et la fréquence cardiaque mesurée à la 5^{ème} minutes de pédalage à la puissance unique de 150 W. L'équation est la suivante:

$$\text{VO}_2 \text{ max prédite} = 6,3 - 0,0193.Fc$$

Cette méthode donne des valeurs prédites inférieures à celles du nomogramme d'Astrand Ryhming pour les fréquences cardiaques inférieures à 139 bpm à la 5^{ème} min d'exercice et des VO_2 max prédites plus élevées pour les fréquences cardiaques supérieures à 139 bpm. Cette formule ne semble avoir été validée que pour des VO_2 max comprises entre 2,4 l et 4,35 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. Pour des sujets ayant une VO_2 max supérieure à 4,5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, la valeur prédite devrait être systématiquement sous-estimée. En effet, un sujet ayant une VO_2 max de 5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ devrait avoir une fréquence cardiaque de 67 bpm à la 5^{ème} min d'un exercice de 150 W. Fox conseille d'utiliser le facteur de correction pour l'âge de 1. Astrand Ryhming pour les sujets âgés de plus de 25 ans.

2.2.2.3. Détermination de la relation puissance-fréquence cardiaque

Au lieu d'émettre une hypothèse concernant la relation entre la fréquence cardiaque et la puissance d'exercice, il est facile de la déterminer au moyen d'une épreuve par paliers progressifs, en choisissant les puissances de façon à obtenir des fréquences cardiaques comprises entre 125 et 170 bpm.

Il est alors possible d'extrapoler la relation (supposée linéaire) entre fréquence cardiaque et puissance jusqu'à la valeur de la fréquence cardiaque maximale théorique ou réelle (mesurée lors d'une épreuve précédente). La valeur de puissance ainsi obtenue est supposée égale à la puissance maximale aérobie (PMA) ; une prédiction de VO_2 max peut être faite en émettant une hypothèse sur le rendement net R (0,23, par exemple) et la consommation d'oxygène de repos (environ $3,5 \text{ ml.kg}^{-1}$) :

$$\text{VO}_2 \text{ max} = \text{VO}_2 \text{ repos} + 0,003.\text{PMA}/\text{R}$$

où

VO_2 max est exprimée en litres par minute et PMA en watts,

VO_2 repos est la consommation d'oxygène de repos (litres par minute),

la valeur 0,003 correspond au quotient de 60 (1 min) par la valeur énergétique de l'oxygène (20000 J par litre d'oxygène).

2.2.2.4. Step-test

Lors de la montée d'une marche, le travail mécanique externe W (en joules) réalisé est donné par la formule :

$$\mathbf{W = h.m.g}$$

où

m est la masse corporelle du sujet (kg),

h la hauteur de la marche (m),

g l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

Si le sujet monte n fois la marche en 1 min, la puissance mécanique externe P (en watts) est donnée par la formule:

$$\mathbf{P = n.h.m.g./60}$$

Il existe une dépense d'énergie supplémentaire due au travail de freinage pendant la descente de la marche. Cette dépense d'énergie supplémentaire est généralement estimée égale au tiers de celle de la montée. Le calcul de la dépense énergétique n'est pas nécessaire car il a été préalablement réalisé pour différentes hauteurs de marche, différentes fréquences de montées et des sujets d'âge, de morphologie et de sexe différents. Pour un sujet de poids donné, la puissance d'exercice est proportionnelle à la fréquence des montées et à la hauteur de la marche.

Un exercice de montée d'une marche est donc un moyen facile de faire exécuter une quantité de travail. Cet ergomètre est le moins coûteux et ne nécessite pas de calibration. Il est cependant nécessaire de

faire respecter la cadence des montées et de vérifier que le sujet élève bien tout son corps à chaque montée (même posture corporelle en haut et en bas de la marche).

Les méthodes indirectes fondées sur la mesure de la fréquence cardiaque lors de la montée d'une marche (step-tests) partent des mêmes hypothèses que celles des tests sous-maximaux sur ergocycles, décrits ci-dessus. Le nomogramme d'Astrand Ryhming peut être utilisé lors d'un step-test. Le step-test d'Astrand consiste à monter une marche à la fréquence de 22,5 fois par min. La hauteur de la marche est de 40 cm pour les hommes et de 33 cm pour les femmes. La précision de la prédiction de VO_2 max au moyen du step-test d'Astrand est médiocre (Camus et al., 1974 ; Barrault, 1976) et probablement la moins bonne de toutes les épreuves indirectes.

Par la suite, d'autres auteurs (Margaria et al., 1965) ont proposé d'autres nomogrammes ou formules pour des step-tests fondés sur un principe légèrement différent : montée d'une marche de 40 cm à deux fréquences imposées (15 et 25 montées par min). Les fréquences cardiaques correspondant aux 2 fréquences de montée sont reportées sur une abaque. La valeur prédite dépend de la fréquence cardiaque maximale. L'abaque propose une prédiction de VO_2 max pour 3 fréquences cardiaques maximales (200, 180, 160) théoriques ou réelles.

Pour les enfants, la hauteur de marche est de 30 cm et les fréquences de montée sont de 15 et 27 par min. Ces mêmes auteurs ont proposé dans le même article une deuxième abaque adaptée à ce protocole particulier. D'après Margaria et al. (1965), la précision de la prédiction par cette méthode est meilleure que celle obtenue avec le step-test d'Astrand.

Plusieurs études préconisent d'adapter la hauteur de la marche à la taille des sujets. Par exemple, Francis et Cuippeper (1988) proposent l'équation suivante:

$$\text{hauteur} = 0,187 \cdot \text{Taille}$$

2.2.3. Epreuves indirectes maximales

La plupart de ces épreuves sont réalisées sur le terrain et consistent généralement soit en tests de performance maximale en course à pied sur une distance imposée ou une durée donnée, soit en tests d'intensité progressive menés jusqu'à épuisement.

L'incertitude sur la fréquence cardiaque maximale des épreuves indirectes sous-maximales est remplacée par l'incertitude sur le caractère maximal de l'épreuve. A la différence des épreuves sous-maximales, une motivation suffisante est indispensable dans ces épreuves maximales. Le risque pour la santé de ces épreuves est théoriquement non négligeable lorsqu'elles sont imposées à une population non sélectionnée.

2.2.3.1. Tests de performance en course à pied (Cooper, 1968)

Le test le plus couramment utilisé est le test de Cooper (1968) qui consiste à parcourir la distance la plus longue en 12 min. Les sujets peuvent courir et marcher pendant l'épreuve, seule compte la distance maximale parcourue. La valeur de VO_2 max (en ml/kg.min) prédite à partir de la distance (en mètres) est donnée par l'équation suivante:

$$\text{VO}_2 \text{ max} = 0,022 \text{ distance} - 10,39$$

Les résultats de cette épreuve sont significativement et positivement corrélés avec les valeurs de (VO_2 max mesurées sur tapis roulant avec pente (Cooper, 1968 ; Barrault, 1976; Fouillot et al., 1976).

Cependant, les études qui corrélèrent par la suite les performances lors du test de Cooper avec (VO_2 max directe proposent des équations différentes selon la population étudiée. Ainsi pour la population d'athlètes entraînés de l'étude de Barrault (1976), l'équation proposée est la suivante :

$$\text{VO}_2 \text{ max} = 0,011 \text{ D} + 21,90 \text{ (r} = 0,76\text{)}$$

L'hypothèse à l'origine de ce test est que la durée de 12 min correspond au temps de maintien maximal de la puissance maximale aérobie. Ceci n'est probablement vrai que pour les athlètes de haut niveau très entraînés en endurance. Dans l'étude de Barrault (1976), la dépense énergétique pendant le test de Cooper a été estimée à partir de l'abaque de Margaria. Le pourcentage de VO_2 max correspondant à la vitesse du test de Cooper était compris entre 70 et 99% selon les sujets.

En plus de celles concernant les épreuves indirectes maximales, les critiques concernant plus particulièrement le test de Cooper et les tests de performance sont les suivantes :

- le coût énergétique de la marche est inférieur à celui de la course pour les vitesses inférieures à 7 km.h^{-1} . Une même distance parcourue correspond donc à des dépenses énergétiques différentes selon qu'elle est réalisée uniquement en courant ou que le sujet a alterné course et marche ;
- la capacité maximale anaérobie doit influencer la performance ;
- la meilleure performance possible sur la distance ou encore la durée imposée correspond à une vitesse optimale de course. Cette vitesse optimale est a priori inconnue chez le sujet qui n'a jamais été testé ;
- il est indispensable que les sujets soient très motivés pour que la performance soit valide. L'épreuve peut rapidement devenir psychologiquement très difficile ;
- des décès sont survenus au décours de l'épreuve.

2.2.3.2. Tests d'intensité progressive

Les tests progressifs de prédiction indirecte de VO_2 max ont été mis au point pour pallier les limites du test de Cooper et assimilés. Ces tests progressifs sont réalisés soit en laboratoire sur bicyclette ergométrique soit sur le terrain en course à pied et en natation.

2.2.3.3. Tests progressifs sur ergocycle

Patton et al. (1982) ont proposé le protocole suivant : le sujet pédale sur ergocycle Monark à 75 tours par min pendant 2 min à vide, puis contre une force de freinage qui est augmentée de 0,5 kg toutes les minutes, c'est-à-dire augmentée de 37,5 W par minute. La force de freinage est augmentée jusqu'à ce que le sujet soit incapable de pédaler au-dessus de 70 tours par minute pendant au moins 10 sec. Si une force de freinage ne peut être maintenue pendant la minute entière, la puissance correspondant au palier précédent est retenue comme puissance maximale aérobie. La puissance maximale aérobie (P en

watts) déterminée pour ce protocole a été corrélée avec les valeurs de VO_2 max ($L \cdot \text{min}^{-1}$) sur tapis roulant et sur ergocycle.

$$\begin{aligned} VO_2 \text{ max TR} &= 0,014 P - 0,145 \text{ (hommes)} \\ &= 0,009 + 0,707 \text{ (femmes)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} VO_2 \text{ max Erg} &= 0,012 P - 0,099 \text{ (hommes)} \\ &= 0,008 P - 0,732 \text{ (femmes)} \end{aligned}$$

Par la suite, Brue et al. (1985) ont proposé une version de ce test adaptée à un autre type d'ergocycle.

2.2.3.4. Test progressif de course de l'université de Montréal (Léger & Boucher, 1980)

Ce test consiste à courir le plus longtemps possible autour d'une piste à vitesse imposée. La vitesse qui augmente toutes les 2 min est imposée par des signaux sonores émis à intervalles réguliers. A chaque signal, le sujet doit se trouver à proximité d'une des bornes disposées à intervalles réguliers à la corde de la piste.

L'épreuve est terminée quand le sujet est incapable de suivre la vitesse imposée. La valeur prédite de VO_2 max ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) à partir de la vitesse de course du dernier palier V ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) est donnée par l'équation suivante :

$$VO_2 \text{ max} = 14,49 + 2,143 V + 0,0324 V^2$$

L'originalité de cette équation est qu'elle n'a pas été obtenue en corrélant les résultats de VO_2 max de laboratoire avec les performances d'une population expérimentale contrairement à la plupart des tests de terrain antérieurs. Ses concepteurs ont rassemblé les données d'études sur le coût énergétique de la course à pied en fonction de la vitesse et émis l'hypothèse que la dépense énergétique du dernier palier était assurée par le métabolisme aérobie. La validité de cette formule a été vérifiée en comparant la VO_2 max prédite avec la VO_2 max mesurée sur tapis roulant. Dans l'étude originale (Léger, 1981a), les valeurs moyennes des VO_2 max prédites et mesurées étaient identiques. Dans d'autres études (par exemple Lacour et al., 1989), il existe une surestimation systématique. L'erreur type de l'estimation était de $2,8 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, c'est à dire que 95% des sujets étaient estimés avec une erreur inférieure à $5,6 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ dans l'étude originale. Si cette précision est meilleure que celle des autres méthodes indirectes, elle n'est pas cependant suffisante pour classer les sujets d'une population homogène de bon niveau (Léger, 1981 a ; Lacour et al., 1989). Chez les sujets spécifiquement entraînés en course à pied et de haut niveau, c'est à dire chez des sujets où le coût énergétique de la course est probablement inférieur, la VO_2 max prédite semble surestimer la VO_2 max mesurée sur tapis roulant (Lacour et al., 1989).

Par la suite, Léger & Mercier (1983), reprenant leurs données et celles de la littérature, ont proposé une formule simplifiée de l'estimation de la dépense énergétique en course à pied :

$$VO_2 \text{ (ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) = 3,5 V \text{ (km} \cdot \text{h}^{-1})$$

Le coût énergétique de la course à pied dépend du sexe et de l'âge, probablement en partie à cause de l'effet de la taille sur l'économie de course. Une adaptation de la cotation du test de Léger-Boucher en fonction de l'âge chez l'enfant est actuellement en cours (Léger, communication personnelle).

Brue et al. (1989), ont adapté le protocole initial de Léger & Boucher (1980) en faisant précéder les sujets d'un cycliste qui impose la vitesse de course au lieu des signaux émis par haut-parleur. Le cycliste régule cette vitesse de course en pédalant à des fréquences imposées par des signaux enregistrés sur cassette et émis par un magnétophone qu'il transporte. Cette modification a été proposée dans le but de pallier l'absence éventuelle de sonorisation suffisamment puissante pour couvrir une piste de 400 m. Cependant, dans notre pratique, ce protocole ne s'est pas montré supérieur à celui de Léger & Boucher dans le cas de l'utilisation d'une bicyclette avec roue libre.

Récemment, Bolter et Coutts (1987) ont proposé un test progressif sur tapis roulant où la vitesse est constante (9 miles.h⁻¹), mais la pente augmentée de 1 degré régulièrement. Il existe une bonne corrélation entre la durée de l'épreuve et VO₂ max. Sa réalisation en laboratoire est le seul intérêt de ce test qui nécessite un matériel coûteux, permet de passer moins de sujets, est probablement moins reproductible que les tests sur le terrain (le sujet abandonne pour éviter la chute sur le tapis roulant) et qui ne permet pas une détermination de la vitesse maximale aérobie.

2.2.3.5. Test progressif de course navette (Léger, 1981; Léger & Gadoury, 1989)

Deux lignes parallèles sont tracées à 20 m l'une de l'autre. Le test consiste à effectuer le plus longtemps possible des allers et retours de 20 m à vitesse imposée. La vitesse est imposée au moyen de signaux sonores enregistrés sur bande magnétique et émis à intervalles réguliers.

A chaque signal le sujet doit se trouver légèrement au-delà de l'une des lignes parallèles. La vitesse est augmentée toutes les 2 min. La valeur de la VO₂ max prédite (ml.kg⁻¹.min⁻¹) à partir de la vitesse de course (V en km.h⁻¹) est donnée par la formule :

$$\text{VO}_2 \text{ max} = 5,86 V - 19,46 \quad (r = 0,84, n = 91)$$

L'erreur type de l'estimation est supérieure à celle du test sur piste et vaut 5,4 ml.kg⁻¹.min⁻¹.

Une épreuve de navette avec des paliers d'une minute été proposée par la suite dans le but de rendre l'épreuve plus supportable par les sujets peu motivés (Léger et al., 1984 ; Léger & Gadoury, 1989).

Les tests progressifs en course à pied présentent trois intérêts essentiels par rapport au test de Cooper :

1. le sujet n'a pas besoin de connaître sa vitesse de course optimale car la vitesse est imposée ;
2. l'exercice est probablement psychologiquement mieux supporté car il n'est réellement difficile que dans les dernières minutes précédant l'épuisement et les sujets les plus faibles ne sont lâchés qu'à la fin de l'épreuve ;
3. ces épreuves permettraient de connaître la vitesse maximale aérobie (vitesse correspondant à la VO₂ max) qui est supposée correspondre à la vitesse du dernier palier de ces épreuves. La connaissance de cette vitesse permettrait de mieux orienter l'entraînement que la connaissance de la valeur réelle de la VO₂ max mesurée en laboratoire. En effet, la prédiction de la vitesse maximale aérobie à partir de

la VO_2 max nécessite des hypothèses sur le coût énergétique comparé de la course en laboratoire et sur le terrain.

CONCLUSION

En théorie, les épreuves de mesure directe des puissances maximales aérobie et anaérobie devraient être les seules utilisées. Cependant, il n'existe pas de méthode directe de mesure de la puissance maximale anaérobie. D'autre part, le coût des épreuves directes et le temps nécessaire à leur passation font que les épreuves indirectes conservent un intérêt certain. Les tests indirects aérobie et anaérobie partagent certaines causes d'imprécision et parfois d'invalidité :

1. une méconnaissance du rapport exact entre la quantité de travail réalisé et la quantité d'ATP dégradé, c'est à dire le rendement mécanique de l'exercice ;
2. une incertitude sur l'importance de la participation des métabolismes autres que celui qui est supposé être étudié par le test ;
3. une incertitude sur le caractère maximal de l'épreuve dans ces tests qui nécessitent généralement une motivation importante. Les tests progressifs de détermination de la VO_2 max comme le test de Léger & Boucher présentent l'avantage de donner la vitesse maximale aérobie sans qu'il soit nécessaire d'émettre une hypothèse sur le coût énergétique de l'exercice.