



Association pour la Recherche et l'Évaluation en Activité Physique et en Sport

EVALUATION DES CAPACITES PHYSIOLOGIQUES ET PHYSIQUES

Cours licences masters UFR STAPS Université de Bordeaux 1997

- 1. Considérations générales**
- 2. Evaluation des capacités dites « Anaérobies »**
- 3. Evaluation des capacités aérobies**

Evaluation des capacités dites « Anaérobies »

Cours du Diplôme d'Université Médecine du Sport

Marrakech 19 – 21 décembre 2014

Georges CAZORLA

Courriel : areaps33@gmail.com

Web : www.areaps.org

2.I Evaluation des capacités dites « Anaérobies alactiques »

1 - EVALUATION DE L'APTITUDE DITE « ANAEROBIE ALACTIQUE »

Le processus anaérobie alactique permet de fournir l'énergie nécessaire aux exercices courts et intenses. L'ATP et la PCr constituent les sources énergétiques principales de ce type d'exercices.

L'aptitude anaérobie alactique peut être évaluée à partir de tests réalisés toujours à intensité maximale et de durées inférieures à 6 ou 7s pour la composante puissance mécanique développée et entre 8 et 20s pour la composante endurance. Cette durée est d'autant plus courte que l'intensité de l'épreuve est plus élevée. Plus la durée de ces épreuves se prolonge au delà de 7 ou 8s, plus la contribution de la glycolyse lactique devient importante. Au delà de 15s, la contribution de la glycolyse aérobie ne doit pas être négligée non-plus.

On peut donc distinguer deux types de tests :

- les premiers d'une durée inférieure ou égale à 5s, permettent d'évaluer la puissance mécanique des membres inférieurs. Il s'agit :
 - du saut vertical à partir d'une position fléchie à l'arrêt (demi-squat) sur une plate-forme de force à jauges de contrainte, sur un tapis électronique dit de *Bosco* ou ergo-jump, ou depuis une surface plane : test de Sargent,
 - du coup de pédale sur un cyclo-ergomètre adapté ou test d'Ayalon, Inbar et Bar-Or,
 - du nombre maximum de rotations des manivelles d'un pédalier d'un cycloergomètre en 5s,
 - de l'épreuve de l'escalier de Margaria-Kalamen,
 - du sprint lancé de 10 et 20m,
 - de l'épreuve sur tapis de sprint autotracté ;

- les seconds, de durées plus longues, permettent d'évaluer l'endurance du système alactique tant au niveau des membres inférieurs :
 - épreuve des sauts verticaux répétés de *Bosco*,
 - épreuve du nombre maximal de squats avec haltères pendant 15s,qu'au niveau des membres supérieurs :
 - épreuve du nombre maximum de traction à la barre en 15s,
 - épreuve du nombre maximum de pompes avec une charge de 20kg en 15s,
 - sprint lancé 100m.

Certaines de ces épreuves comme le saut vertical sur plateforme de force ou sur tapis de *Bosco*, le sprint sur tapis autotracté, le coup de pédale sur un cycloergomètre aménagé, et la montée de l'escalier de Margaria-Kalamen qui requièrent un matériel sophistiqué et coûteux peuvent être considérées comme des épreuves de laboratoire alors que les autres sont des tests de terrain facilement accessibles aux éducateurs sportifs.

Evaluation de la puissance mécanique anaérobie alactique.

a) Tests de terrain.

D'une façon générale, toutes les épreuves faisant intervenir une intensité maximale d'une durée inférieure à 5s peuvent être imaginées. Nous ne proposerons dans ce document que deux tests standardisés :

□ Test de détente verticale de Sargent modifié par Lewis (figure 1).

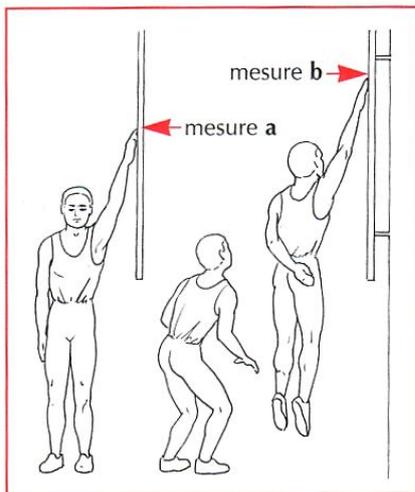


Figure 1 : Sargent test

Ce test consiste à mesurer la détente verticale d'un sujet. Placé debout de profil par rapport à une planche verticale graduée tous les centimètres, le sujet étire verticalement le plus haut possible le bras sur la planche. On note la hauteur de l'extrémité de son majeur (mesure a). Depuis une position accroupie et arrêtée, le bras opposé à la planche maintenu derrière son dos, il saute verticalement et touche le plus haut possible cette dernière avec sa main libre (mesure b). La détente verticale est la distance calculée entre les deux mesures extrêmes : $Dv (m) = b - a$.

Compte tenu de la nécessité d'élever sa masse à une certaine hauteur (h), il a été élaboré un nomogramme (nomogramme de Lewis) pour estimer la puissance développée. Il se formule de la façon suivante :

$$P (\text{en Watt}) = 21.7 \cdot p (\text{kg}) \sqrt{Dv (m)}$$

où p est le poids en kg et Dv la détente verticale en mètre. Le résultat représente la puissance moyenne développée au cours du test. Par exemple un sportif dont la masse corporelle est 80kg et dont la détente verticale est 65cm aurait développé au cours du Sargent-test : $21.7 \times 80 \sqrt{0.65\text{m}} = 1399.6 \text{ W}$ ou 17.5 W/kg

Le même test peut être réalisé depuis la position debout avec une flexion-extension préalable des membres inférieurs. Dans ce cas, outre la puissance mécanique, l'élasticité musculaire est aussi évaluée. La différence entre les deux protocoles rend compte de l'effet élastique ou pliométrique.

Un troisième protocole consiste à sauter depuis une hauteur inférieure ou égale à 40cm pour réaliser le même type de flexion-extension-saut. Dans ce cas les effets pliométriques et de coordination motrice sont aussi pris en compte.

D'autres épreuves du même type utilisent des appareils différents comme ceux respectivement mis au point par Sébert et coll (figure 7.2 A) ou Vandevale et coll (figure 7.2

B) ou encore le test d'Abalakov (figure 7.3) dans lequel la détente verticale est mesurée à partir d'un cordon étalonné qui, lors du saut, se déroule entre le sol et une ceinture portée par le sujet. Signalons que les erreurs aléatoires obtenues avec ce dernier sont trop importantes pour en conseiller sans réserves son utilisation. Concernant les autres épreuves de détente verticale, on observe une surestimation systématique de près de 16% des résultats par rapport à la mesure référence obtenue sur une plate-forme de force. De même, la puissance obtenue à partir de l'équation de Lewis est une valeur moyenne qui admet beaucoup d'approximations et qui est calculée en prenant en compte l'élévation du centre de gravité alors que celle mesurée directement au moment de l'impulsion sur la plate-forme de force est une puissance de crête dont les valeurs sont nettement supérieures.

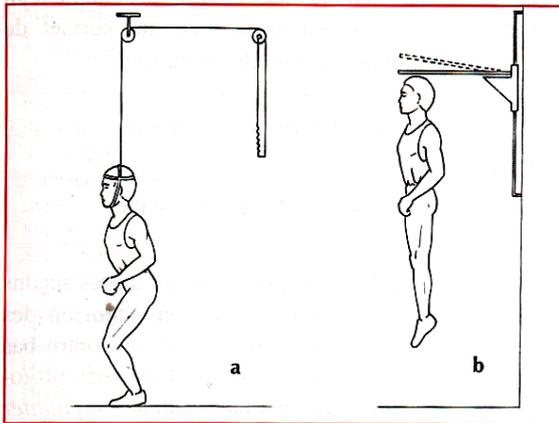


Figure 2 : Appareils de mesure de la détente Verticale. Sebert et al. (a) ; Vandewalle et al. (b)

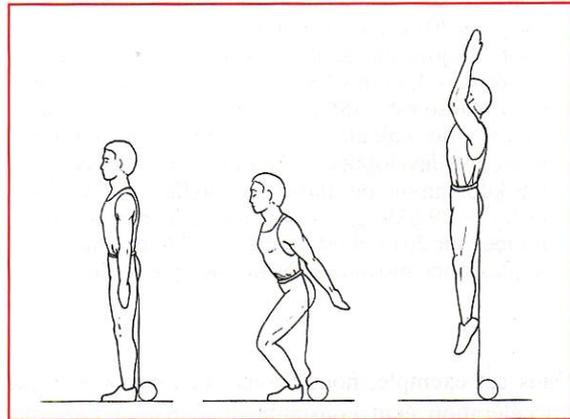


Figure 3 : Test d'Abalakov. La hauteur du saut est mesurée avec un mètre ruban

□ Test du sprint court lancé.

La course brève sur terrain plat est une épreuve classiquement employée. Cependant la performance chronométrique ne constitue pas une mesure de puissance. Elle en est uniquement un indice. En négligeant les déplacements latéraux et verticaux du centre de gravité qu'il faudrait filmer et mesurer pendant la course et en ne conservant que le seul déplacement horizontal dont on connaît la performance chronométrique sur une distance donnée (d), il est possible d'estimer l'accélération horizontale moyenne (a) d'après la formule suivante :

$$d = \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

$$\text{donc } a = 2d / t^2 \quad (2)$$

Connaissant l'accélération, la force moyenne de propulsion horizontale (F_h) peut alors être calculée en utilisant la deuxième loi du mouvement de Newton :

$$F_h = m \cdot a \quad (3)$$

Comme la puissance (P) est égale au produit de la force par la vitesse :

$$P = F \cdot v \quad (4)$$

La puissance développée est alors déduite.

Prenons l'exemple d'un sportif qui pèse 80kg et qui parcourt 20m lancé en 3s. En utilisant l'équation (2), son accélération moyenne horizontale est : $(2 \times 20m) \div (3s)^2 = 4.44 \text{ m/s}^2$. La force horizontale moyenne qu'il utilise est donc (équation 3) : $80kg \times 4.44\text{m/s}^2 = 355.2\text{N}$. Le travail moyen qu'il réalise est : $355.2\text{N} \times 20\text{m} = 7104 \text{ J}$ ce qui permet de calculer la puissance mécanique moyenne développée : $7104 \text{ N} \div 3\text{s} = 2368 \text{ W}$ ou par kg de masse corporelle : $2368 \text{ W} \div 80\text{kg} = 29.6 \text{ W/kg}$. Connaissant le nombre de foulées sur 20m, il est même possible de calculer la puissance moyenne développée par foulée.



Dans cet exemple nous avons fait l'hypothèse que l'accélération était constante du départ à l'arrivée. Des travaux ont montré que la distance de 30m est la distance maximale sur laquelle un individu peut accélérer. Certains sujets atteignent même le maximum de leur accélération aux environs de 10m. En conséquence nous suggérons d'enregistrer les temps de passage à chaque 10m d'une distance qui ne devrait pas dépasser 50m (photo 1).

Photo 1 : Prise de performances sur des distances courtes de sprint lancé: 20, 30 ou 40m

b) Tests de laboratoire.

- Détente verticale à partir du tapis électronique de Bosco ou ergo-jump.

L'élévation du centre de gravité est mesurée ici à partir du temps d'envol. Le sujet effectue un saut vertical à partir d'un tapis équipé de contacts électroniques. La position de départ dite Squat-Jump doit être rigoureusement respectée : position demi-squat, genoux fléchis à 90°, mains sur les hanches (Figure 4a). Le dispositif de contacteurs électroniques est couplé à un jeu de cellules photoélectriques ce qui permet de mesurer au millième près, la durée du saut. La puissance est calculée par la formule :

$$P \text{ (watt)} = 9.81 \cdot T_v \cdot T_c / 4T_c$$

T_v = temps de vol, T_c = temps de contact.

Ce test peut aussi être réalisé de deux autres façons (figure 4b et c) : après une flexion-extension des membres inférieurs, ou après un saut en contre bas d'une hauteur maximum de 40cm. Ces deux protocoles respectivement définis par l'auteur : counter movement jump (CMJ) et drop jump (DJ) évaluent aussi l'effet pliométrique et la coordination.

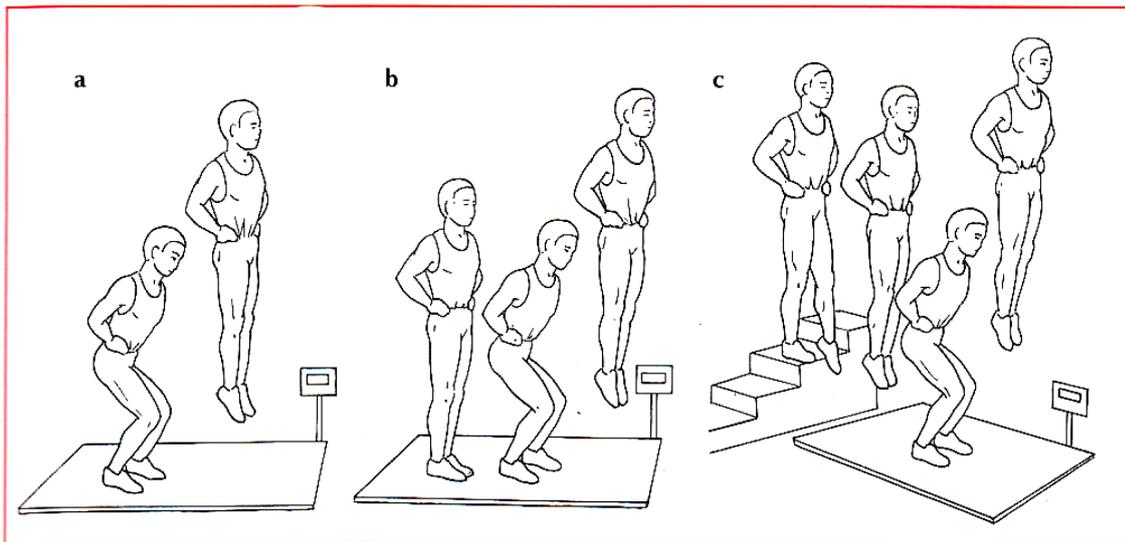


Figure 4 : Trois types de sauts verticaux réalisés sur ergo-jump : a) : squat jump (SJ), b) : counter movement jump (CMJ) et c) : drop jump (DJ).

□ Test du coup de pédale d'Ayalon, Inbar et Bar-Or.



A partir d'un cyclo-ergomètre à freinage mécanique, équipé d'un chronométrage intégré au pédalier (Photo 2) et précis à 0.01s, il est demandé au sujet d'exécuter le plus rapidement possible un coup de pédale unique contre une résistance standard correspondant soit à une charge unique pour tous de 2.90 kg (mode absolu) soit à une charge relative de 40g par kg de masse corporelle. Connaissant la charge et la vitesse (rapport de la distance de rotation entraînée par un coup de pédale : 6m par révolution sur la durée du coup de pédale) il est alors possible de calculer la puissance développée. Cette même épreuve peut être réalisée avec ergomètre à bras pour évaluer la puissance de crête des membres supérieurs.

□ Nombre maximum de coups de pédale en 5s de Nadeau et coll.

Le matériel requis est identique à celui du test précédent. On demande au sujet de pédaler le plus rapidement possible contre une charge correspondant à 10% de la masse corporelle pendant 5s. Le nombre de révolutions complétées pendant cette durée permet selon le même principe précédemment décrit, de calculer la puissance mécanique développée. Exemple de calcul pour un sujet de 80kg qui réussit à compléter 9 révolution de pédalier en 5s contre une charge de 8kg c'est à dire à 78.5 N. Le travail accompli est de : $78.5 \text{ N} \times 9 \text{ rév.}$

$X 6m = 4239 J$. La puissance mécanique moyenne développée est donc : $4239 J \div 5s = 848 W$ soit : $848 W \div 80kg = 10.6 W/kg$ de masse corporelle.

□ Epreuve de l'escalier de Margaria-Kalamen.

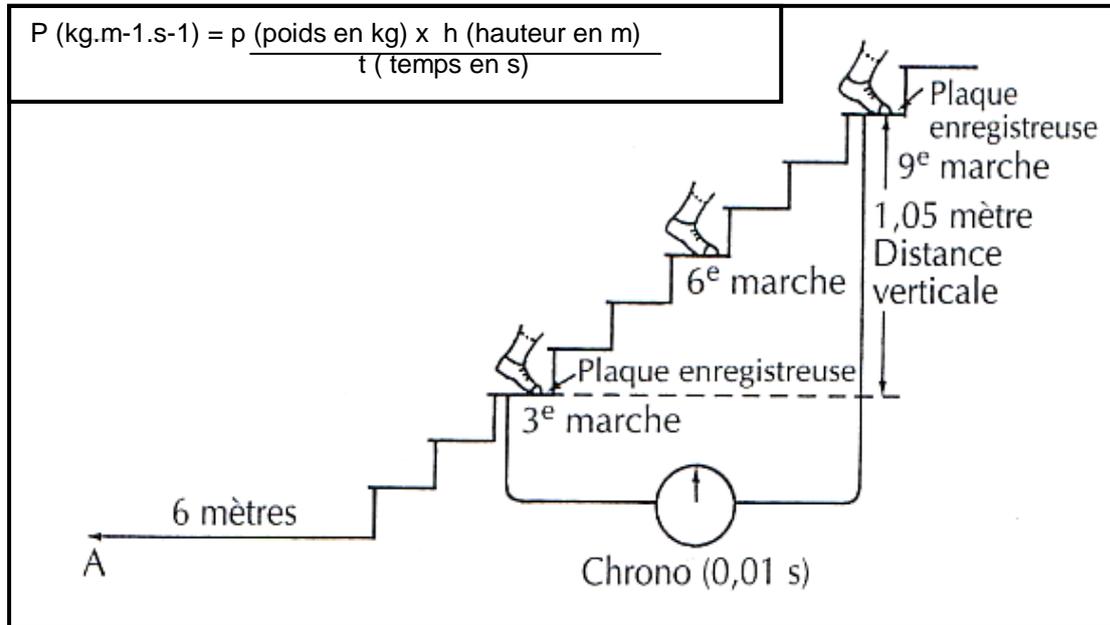


Figure 5 : Test de l'escalier de Margaria-Kalamen permettant d'évaluer la puissance des membres inférieurs

Matériel et personnel nécessaires

Un escalier avec des marches dont la hauteur est préalablement mesurée (175 mm dans notre cas) et des cellules photoélectriques couplées à un chronomètre électronique (figure 5). Un chronométrateur très expérimenté peut cependant pallier l'absence de cellules.

Protocole

Le sujet évalué part du point A et après un élan de 6 m, grimpe trois par trois les marches de l'escalier aussi rapidement que possible. La durée mise pour aller de la marche n° 3 à la marche n° 9 est enregistrée au centième près.

Résultat

La puissance (P) développée est le rapport entre le produit de la masse corporelle du sujet (p) par la distance verticale franchie et la durée chronométrée :

$$P \text{ (kg.m}^{-1}\text{.s}^{-1}\text{)} = \frac{p \text{ (poids en kg)} \times h \text{ (hauteur en m)}}{t \text{ (temps en s)}}$$

Exemple : pour un sujet qui pèse 70 kg et grimpe 1.05 m eu 0.50 s, la puissance développée sera :

$$P = \frac{70 \text{ kg} \times 1.05 \text{ m}}{0.50 \text{ s}} = 147 \text{ kg.m}^{-1}\text{.s}^{-1}$$

- Sprint sur tapis autotracté de Belli et coll (1989) : Chatard (1990)

Sur ce tapis encore défini : *tapis libre*, le coureur entraîne lui-même la bande roulante du tapis. Pour cela, il est maintenu en position fixe par une ceinture entourant sa taille et reliée à une barre de maintien, articulée à ses extrémités de façon à permettre les déplacements verticaux et latéraux (figure 6). Des capteurs montés sur le tapis roulant permettent d'obtenir la vitesse instantanée du tapis, la force de traction horizontale et le déplacement vertical du coureur. L'acquisition et le traitement des données s'effectuent à l'aide d'un ordinateur qui calcule et visualise la puissance mécanique fournie à chaque foulée par le coureur. La puissance musculaire fournie par un membre peut être ainsi comparée à l'autre membre. Le temps mis par un sujet pour atteindre une valeur maximale de puissance ou de vitesse est mesuré. Cette valeur est atteinte soit rapidement, en moins de 2 s, soit plus lentement en 4 ou 5 s.

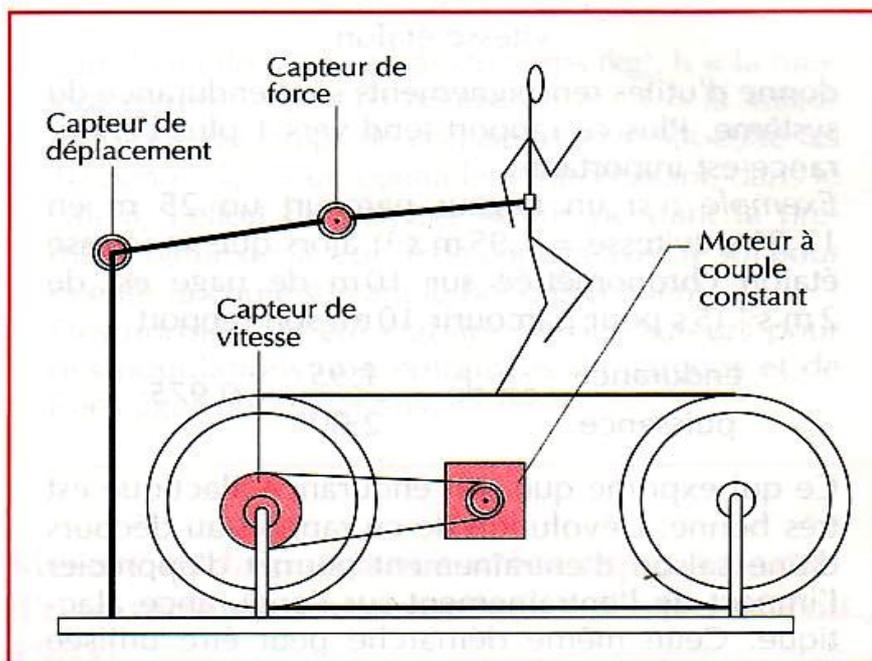


Figure 6 : Vue schématique de l'appareillage permettant de mesurer la puissance directement à partir de la course sur le tapis roulant à bande roulante auto tractée de Belli et al. 1989 (D'après Chatard 1990)

Evaluation de l'endurance anaérobie alactique.

a) Tests de terrain

- Décroissance de la vitesse de locomotion

Par les épreuves précédentes, l'entraîneur peut être rapidement renseigné non seulement sur la puissance anaérobie alactique de ses athlètes, mais aussi sur la vitesse gestuelle spécifique exhaustive définie comme vitesse *étalon*. Grâce à l'étude de sa décroissance en

fonction de l'allongement de la durée, il est possible d'évaluer les limites des autres métabolismes. C'est ce principe qui peut être utilisé pour déterminer notamment l'endurance du processus anaérobie alactique.

Pour notre part, après avoir déterminé la vitesse étalon de chaque sportif (20m lancé en course et 10m en natation), nous suggérons l'étude de la décroissance de la vitesse de course ou nage jusqu'à 20 s. Généralement, on observe chez les sujets non entraînés une première décroissance entre la 6ème et la 9ème seconde. Le rapport =

$$\frac{\text{Vitesse d'une course } 10 \text{ s} \leq x < 20 \text{ s}}{\text{vitesse étalon}}$$

donne d'utiles renseignements sur l'endurance du système. Plus ce rapport tend vers 1 plus l'endurance est importante.

Exemple Si un nageur parcourt un 25 m en 12.81 s, (vitesse = 1.95 m/s) alors que sa vitesse étalon chronométrée sur 10 m de nage est de 2 m/s (5 s pour parcourir 10 m) son rapport

$$\frac{\text{Endurance}}{\text{Puissance}} \text{ est de } = \frac{1.95}{2.00} = 0.975$$

ce qui exprime que son endurance alactique est très bonne. L'évolution de ce rapport au décours d'une saison d'entraînement permet d'apprécier l'impact de l'entraînement sur l'endurance alactique. Cette même démarche peut être utilisée pour apprécier l'évolution de l'endurance des autres sources énergétiques (Figure 7).

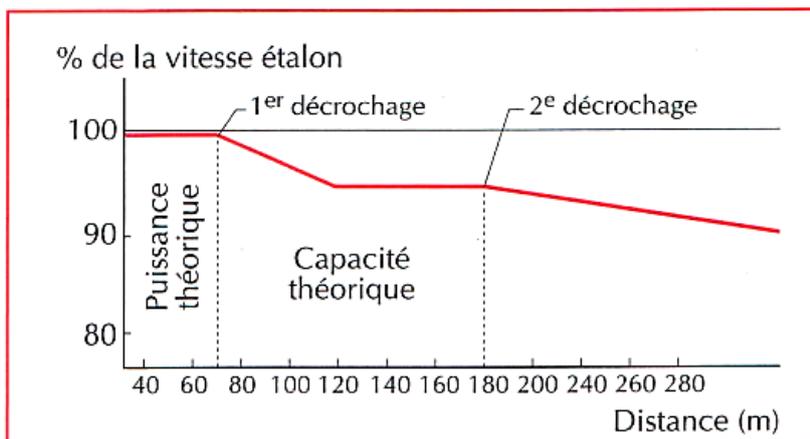


Figure 7 : Exemple théorique permettant d'estimer la puissance et de l'endurance spécifique du système ATP-PCr d'un sujet.

□ Epreuve de squats avec haltères (Montpetit, 1990)

Cette épreuve consiste à mesurer le plus grand nombre de flexions-extensions des membres inférieurs qu'un sportif peut exécuter avec une charge correspondant à 80% de sa charge maximale, en 15s. Il faut préalablement mesurer la distance verticale sur laquelle la charge est déplacée. La puissance moyenne développée est calculée à partir de la formule :

$$P (W) = \frac{Ch(kg) \times 9.81 \times n \times d (m)}{t(15s)}$$

Dans laquelle Ch est la charge, n le nombre de flexions-extensions complétées, d la distance du déplacement de la charge et t la durée, ici 15s.

Par exemple un sportif qui exécute 25 squats en 15s avec une charge de 120kg déplacée sur une distance de 35cm développerait une puissance mécanique moyenne de :

$$P = \frac{120kg \times 9.81 \times 25 \times 0.35 m}{15s} = 686.7 W$$

□ Epreuve de tractions à la barre fixe (Montpetit, 1990).

On procède comme pour l'épreuve précédente mais ici la charge correspond à la masse du sujet et la distance est celle sur laquelle cette masse est soulevée. Il est aisé de mesurer cette distance au moyen d'un mètre de couturière. La durée est aussi fixée à 15s.

Par exemple un sportif dont la masse est 80kg et qui est capable d'exécuter 14 tractions (distance 60cm) en 15s développerait une puissance mécanique moyenne de :

$$P = \frac{80kg \times 9.81 \times 14 \times 0.60m}{15s} = 439.5 W$$

□ Epreuve des « pompes » avec charge (Montpetit, 1990).

On procède comme pour les deux épreuves précédentes. En position de « pompe » les deux mains sur un pèse-personne, le sportif enregistre la masse que représente la partie haute de son corps à laquelle est ajoutée un sac de 20kg. On mesure la distance d'une flexion-extension complète par rapport au sol et en enregistre le nombre maximum de pompes complétées en 15s.

Par exemple, le poids du sujet sur le pèse-personne est 55kg (45kg + sac de 10kg). Le nombre de pompes exécutées en 15s est de 12. La distance de mouvement est de 40cm. La puissance mécanique moyenne développée serait :

$$P = 55kg \times 9.81 \times 12 \times 0.40m = 172.7 W$$

□ Epreuves de vitesse gestuelle spécifique

Leur principe est simple. Il s'agit de mesurer soit le nombre de gestes spécifiques réalisés, soit la distance parcourue pendant une durée très courte jamais supérieure à 10 secondes.

On peut aussi tout simplement chronométrer des sprints sur courtes distances : *Sprints* de 20, 30, 40 ou 45 m départ lancé.

De bonnes corrélations ont été établies entre les résultats de l'épreuve de Margaria-Kalamen

et ces distances de courses, ce qui semble indiquer que l'ensemble de ces épreuves mesure la même dimension métabolique (et/ou la même qualité musculaire).

- Le «push-up» ou «pompe», le «sit-up» ou redressement assis.

Pour pouvoir apprécier la puissance alactique des trois parties principales du corps, membres supérieurs, tronc et membres inférieurs, dans ces tests on mesure aussi, soit le nombre de mouvements réalisés en 10 s, soit la durée nécessaire pour effectuer correctement 10 de ces mouvements. Quels que soient ces tests ils ne donnent qu'un indice de l'endurance alactique de ces parties du corps.

b) Epreuves de laboratoire

- Épreuve des 10 bonds verticaux de Georgesco et coll (1977)

Dans ce test, il s'agit d'exécuter, pieds joints, 10 bonds verticaux successifs aussi haut que possible en réduisant au minimum le contact avec le sol entre deux bonds. La capacité maximale alactique se calcule à partir de la formule

$$\frac{p \times h \times 1.5}{t}$$

dans laquelle p = le poids du corps (kg), h = la hauteur moyenne des 10 bonds (en m), t = la valeur moyenne du temps de contact avec le sol entre les 10 bonds, 1.5 = un coefficient, introduisant dans le calcul l'effort de freinage requis pendant la première partie de la reprise de contact avec le sol pour ralentir la chute suivant le bond précédent.

Des normes ont été établies par les auteurs pour des populations non entraînées de garçons et de filles âgés de 7 à 21 ans.

- Mesure de la puissance mécanique à partir d'une série de sauts verticaux (Bosco et coll., 1983)

Bien que la classification de cette épreuve s'avère difficile (utilisation d'un matériel réservé aux laboratoires bien équipés, mesure à la fois de la capacité alactique et de la puissance anaérobie lactique), comme elle procède du même principe que l'épreuve de Georgesco et coll. (1977), il semble opportun de présenter les deux épreuves à la suite l'une de l'autre.

A partir de l'équation

$$W = \frac{g^2 \cdot Tf \cdot 60}{4n(60 - Tf)}$$

les auteurs mesurent la puissance mécanique totale : contraction + élasticité musculaire des membres inférieurs (W = watt/kg de poids corporel), au cours d'une épreuve consistant à réaliser le plus grand nombre possible de bonds verticaux (n) sur le tapis dit de Bosco ou Ergo-jump précédemment décrit. Au moyen d'un logiciel spécifiquement créé sont enregistrées les durées cumulées pendant lesquelles les pieds du sujet évalué quittent le sol (Tf). g^2 représente la constante gravitationnelle des sauts verticaux, estimée à 9.81 m.s^{-2} .

Comparés aux résultats obtenus par Ayalon, Inbar et Bar-Or (1974) et Margaria et coll. (1966), ceux de cette épreuve sont significativement plus élevés, traduisant, selon les auteurs, la prise en compte de la composante élastique qui entre en jeu dans les sauts successifs.

LIMITES DE SIGNIFICATION DES EPREUVES «ALACTIQUES»

L'ensemble des tests précédents sont censés donner des indications fondées sur la connaissance de la rapidité de l'utilisation voire de l'épuisement des réserves en phosphagènes (ATP-PCr). En effet, on a longtemps pensé que seules les réserves d'ATP-PCr immédiatement disponibles fournissaient l'énergie utilisée par les contractions musculaires intenses de courte durée mais des données récentes montrent bien que la glycolyse est aussi fortement impliquée dans l'apport énergétique même lors de ce type d'exercices (40 à 50 % pour des exercices de 6 secondes !). Dès lors non seulement l'appellation « alactique » s'avère inexacte mais les résultats de ce type de test intègrent ces deux composantes dont il est difficile de connaître la part respective exacte.

Notons en outre que seule la puissance mécanique résultant de l'utilisation des systèmes ATP-PCr-glycolyse lactique est appréciée par les différentes épreuves standardisées intenses et de très courte durée, mais aucun renseignement n'est fourni sur la quantité totale des réserves disponibles. Si ces épreuves se prolongent au delà de 10s, il devient très difficile de connaître avec précision la part de l'énergie assurée respectivement par les phosphagènes et la glycolyse anaérobie.

Il faut noter enfin que, les facteurs morphologiques peuvent ajouter à l'efficacité mécanique de la réponse à une épreuve, de même que l'efficacité du système neuromusculaire et l'élasticité du muscle peuvent influencer sur les résultats.

C'est pourquoi l'évaluation de l'endurance du système dit « anaérobie alactique » est toujours matière à controverses.

2.2 Evaluation des capacités dites « Anaérobies lactiques »

2.2 - EVALUATION DE L'APTITUDE « ANAEROBIE LACTIQUE »

Dès lors qu'une partie des réserves en phosphagène (environ 50 %) est utilisée, et que l'apport d'oxygène aux fibres actives est insuffisant (début d'exercice et exercices supra-maximaux), la contraction musculaire est alimentée en énergie par la dégradation (ou catabolisme) du glycogène sans utilisation d'oxygène ce qui induit une formation de molécules d'acide lactique immédiatement dissociées en lactate et en protons H^+ .

Le catabolisme d'une molécule de glycogène libère trois molécules d'ATP et s'accompagne d'une production de deux molécules de lactate. Dans certaines disciplines de durées comprises entre 20s et 2min, les meilleures performances sont réalisées par les sportifs capables à la fois de produire plus d'ATP, donc plus de lactate, par unité de temps et de supporter de fortes concentrations de protons H^+ , donc des acidoses élevées. Ces deux critères définissent l'aptitude anaérobie lactique. Ils nécessitent que les épreuves susceptibles de l'évaluer soient supramaximales, qu'elles conduisent le sportif évalué à l'épuisement et s'inscrivent dans des durées comprises entre 30s et 2min.

L'évaluation par méthodes directes de l'aptitude anaérobie lactique (méthodes enzymatiques, mesure du lactate musculaire, spectrométrie...) s'avère très complexe tant au plan méthodologique que théorique. Nous nous limiterons dans ce document aux méthodes indirectes utilisées soit en laboratoire, soit sur le terrain.

a) En laboratoire,

la mesure de la concentration maximale du lactate sanguin (ou lactatémie) et la mesure du déficit maximal en oxygène ou DO_{2max} sont les deux approches les plus utilisées pour évaluer l'aptitude du métabolisme anaérobie lactique. Plusieurs autres épreuves utilisant le temps limite d'une épreuve supramaximale réalisée sur cyclo-ergomètre ou en course sur tapis roulant, permettent d'estimer la puissance ou l'endurance mécanique anaérobie lactique.

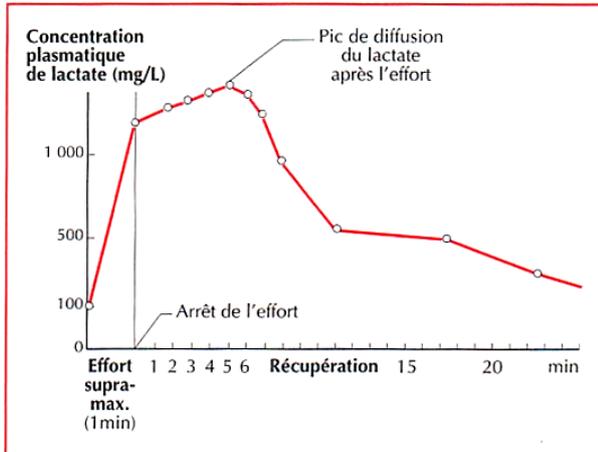
□ Mesure du « pic » lactique post épreuves supramaximales.

Afin de pouvoir mesurer les concentrations sanguines en lactate, à l'issue d'une épreuve supramaximale de courte durée (30s à 2min), il est indispensable d'attendre 5 à 10min après l'arrêt de l'exercice pour réaliser le microprélèvement sanguin nécessaire. Cette durée permet au lactate produit par le muscle de diffuser dans le sang. On obtient ainsi la concentration sanguine la plus élevée définie : « pic lactique (figure 8).

Comme les concentrations sanguines en lactate sont toujours le résultat d'une production cellulaire et d'une utilisation organique, elles ne permettent pas de savoir avec précision ce qui, en fait, est mesuré.

L'évaluation de l'aptitude anaérobie lactique à partir de la seule lactatémie doit donc toujours

être relativisée. Couplée à d'autres paramètres soit physiologiques comme la fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène, soit physiques comme la vitesse de course, de nage, de pédalage, le pourcentage de pente d'un tapis roulant et la durée d'un exercice, la lactatémie peut donner un reflet de la participation de la glycolyse anaérobie au cours ou à l'issue d'un exercice.



lactate sanguin après un exercice d'intensité supramaximale. Selon la durée et l'intensité de l'exercice, ce pic apparaît à des durées différentes : 1 à 3 min après un 3000m et 6 à 10 min après un 400 m

- le *plafond lactique* ou quantité maximale pouvant s'accumuler dans l'organisme et indiquant la limite anaérobie supportable par le sujet. Selon l'intensité de l'épreuve, on peut obtenir ce résultat, soit à l'issue d'un exercice épuisant de 1 à 3 min, soit par la répétition toutes les 4 ou 5 min, d'un exercice épuisant d'une durée de 1min. Les valeurs extrêmes quelquefois enregistrées avoisinent 30 mmol.kg^{-1} et 25 mmol.l^{-1} respectivement pour le muscle et le sang.

En incluant dans une série comprenant trois ou quatre exercices épuisants de 1min, des périodes de repos de 4 à 5min entre chaque, il est possible d'obtenir des concentrations sanguines de lactate qui se rapprochent le plus de celles produites par le muscle (figure 9) et donc de mieux apprécier l'aptitude anaérobie lactique.

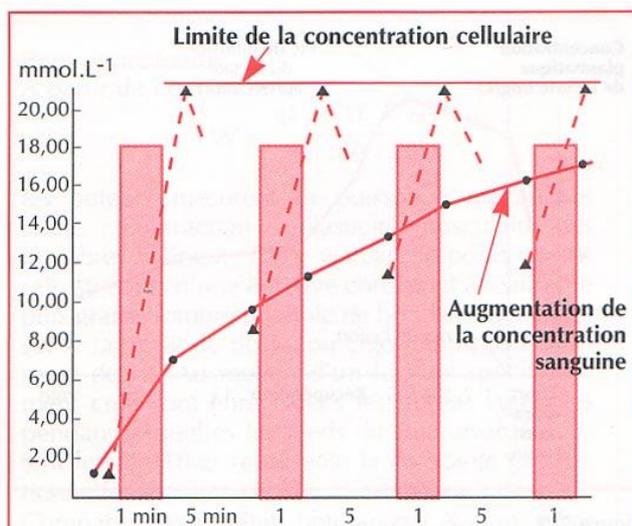


Figure 9 : Le lactate musculaire atteint chaque fois des concentrations maximales qui semblent définir une limite physiologique, alors que les concentrations du lactate sanguin continue de diffuser hors du muscle.

Elle permettrait notamment de déterminer :

- une *zone de transition* (ou seuil) à partir de laquelle le lactate commence à s'accumuler dans l'organisme ce qui marquerait ainsi la limite entre le métabolisme anaérobie et aérobie. Actuellement, cette notion de seuil est très controversée. Elle ne s'appuie en effet ni sur des données expérimentales incontestables, ni sur une explication biologique convenable. Par ailleurs, le nombre important de techniques qui permettraient de déterminer le « seuil » et le nombre de « seuils » différents obtenus chez les mêmes sujets à partir de ces techniques, ne plaident pas en faveur de leur reconnaissance.

Les concentrations sanguines ne donnent donc qu'un reflet incomplet de la production réelle du lactate cellulaire. Cependant, pour un même sujet participant à la même épreuve à plusieurs moments d'une saison sportive, la lactatémie peut correctement renseigner sur l'impact de l'entraînement sur le métabolisme sollicité. Bien maîtrisée, elle peut constituer un moyen tout à fait acceptable de contrôle et de suivi de l'entraînement.

Mesure du déficit maximal en oxygène (DO_{2max}).

Dès le début et lors d'exercices supramaximaux épuisants, l'énergie est fournie : par l'hydrolyse des phosphagènes, par l'utilisation des réserves d'oxygène (myoglobine et hémoglobine) et par la glycolyse lactique, ce qui induit un déficit en oxygène qu'il faudra rembourser à l'arrêt de l'exercice. Le déficit maximal en oxygène (ou DO_{2max}) est souvent utilisé pour évaluer l'aptitude anaérobie lors d'exercices supramaximaux réalisés sur cycloergomètre ou sur tapis roulant.

Connaissant la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) d'un sujet et la relation puissance

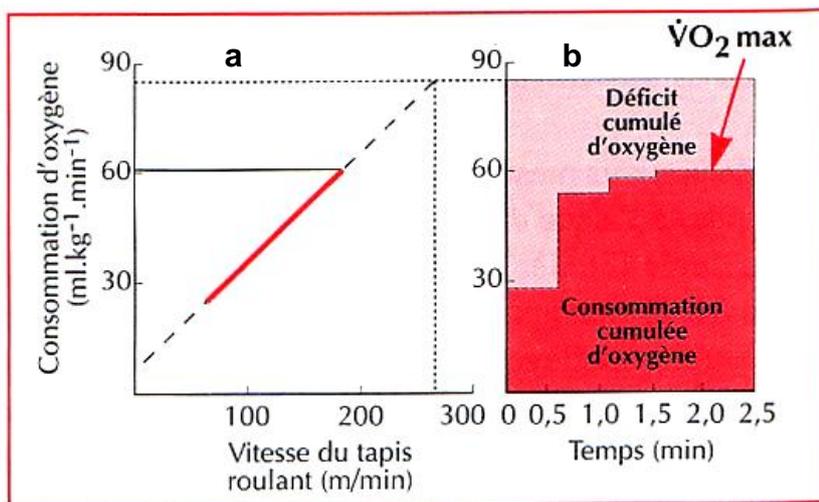


Figure 10 : Détermination du DO_{2max} .

- Evolution de la relation $\dot{V}O_{2max}$ -vitesse.
- Représentation schématique de l'accumulation du déficit en oxygène lors d'un exercice de course à vitesse supramaximale (Medbo et al. 1988)

ou vitesse de course – $\dot{V}O_2$, on lui fait faire un exercice épuisant de 2min correspondant à 120% de sa puissance ou de sa vitesse obtenue à $\dot{V}O_{2max}$ (PAM ou VAM). Pendant toute la durée de cet exercice, la consommation d' O_2 est mesurée. Le DO_{2max} correspondrait à la différence entre la consommation d'oxygène théorique extrapolée pour une intensité de 120% de PAM ou de VAM et la consommation mesurée (figure 10).

□ Mesure du temps limite.

Evaluation de la puissance anaérobie lactique

La puissance de la glycolyse anaérobie est mise en jeu par des exercices supra-maximaux amenant le sujet à l'épuisement au bout de 30 à 50s. La puissance maximale est généralement obtenue entre 30 et 40 s. Ce sont ces principes qui ont présidé à l'élaboration d'épreuves de laboratoire nécessitant un matériel spécial, et d'épreuves de terrain. Les deux ayant pour point commun la faiblesse de leur validité.

Épreuves de «laboratoire»

- Épreuve pour les membres inférieurs d'Ayalon et coll. (1974).

Cette épreuve consiste à accomplir sur un cycloergomètre le plus grand nombre de révolutions en 30 s contre une résistance supra-maximale standard établie en fonction du poids corporel (40 g/kg de poids). On admet que le type d'effort requis soit limité

principalement par la glycolyse anaérobie. La puissance obtenue exprimée en kgm/min correspond à la puissance moyenne mesurée pour 30 s.

L'endurance lactique et la puissance alactique peuvent aussi être évaluées. La première correspond au nombre maximal de révolutions en 30 s, ou travail total (exprimé en kgm), réalisé en 30 s. La seconde, à la puissance maximale enregistrée pendant la fraction de 5 s la plus rapide des 30 s. Elle s'exprime en kgm/min.

Lors de travaux complémentaires, Bar-Or et Inbar (1978) ont établi d'intéressantes corrélations entre trois courses (40, 300 et 600 m) et, respectivement, la puissance maximale et l'endurance anaérobie lactique

□ Épreuve lactique d'évaluation de la puissance des membres supérieurs d'Ayalon et coll. (1974)

Le protocole et le principe de cette épreuve sont identiques au précédent, à l'exception toutefois

- de la technique du pédalage qui est effectué avec les membres supérieurs, le sujet étant assis en position stable, sur une selle dont la hauteur a été fixée de façon à ce que l'axe du pédalier se situe au niveau des épaules de l'évalué,
- et de la puissance du pédalage, fixée à 30 g par kg de poids corporel pour un cycloergomètre de Fleish, et à 50 g pour la bicyclette ergométrique Monark.

Épreuves de «terrain»

La glycolyse anaérobie permet de fournir un travail supramaximal qui, selon son intensité, peut être poursuivi entre 30 s (puissance) et 3 min (endurance). Dans les deux cas, on postule que c'est la trop forte acidose musculaire qui induirait une incapacité fonctionnelle musculaire et donc une baisse de la performance. L'évaluation de la puissance suggère d'utiliser des épreuves supramaximales de durées incluses entre 30 et 50 s. Celle de l'endurance utilise de préférence des épreuves de durées comprises entre 2 et 3 min. Le travail fourni ne doit pas être limité par des problèmes d'apprentissage, d'où le choix d'exercices de réalisation simple ou faisant partie de la technique habituelle des sujets considérés. La même épreuve, assortie de durées variables, peut donc être retenue. La totalité du travail réalisé, l'intensité maximale et la décroissance de cette intensité peuvent respectivement renseigner sur la capacité, la puissance et l'endurance du système; c'est pourquoi, bien que n'entrant pas dans la logique de la chronologie de cette étude, nous les envisageons ensemble dans le chapitre ci-dessous.

Épreuves de course à pied

□ Course en navettes de 6 x 30s avec 25s de récupération (figure 11)

Dans cette épreuves il s'agit de courir en navettes de 5 puis de 10 puis de 15 puis de 20m et ainsi de suite... en couvrant la plus grande distance en 30s. Après un arrêt de 25s reprendre une deuxième course navette et ainsi de suite jusqu'à six répétitions. Enregistrer la distance

parcourue à chaque répétition et établir le pourcentage entre le moins bon essai et l'essai référence relevé à part et qui sert lui-même de performance. Trois performances permettent d'évaluer l'aptitude anaérobie des sujets : la meilleure performance sur un essai unique hors protocole enchaîné, la distance totale parcourue et le pourcentage obtenu.

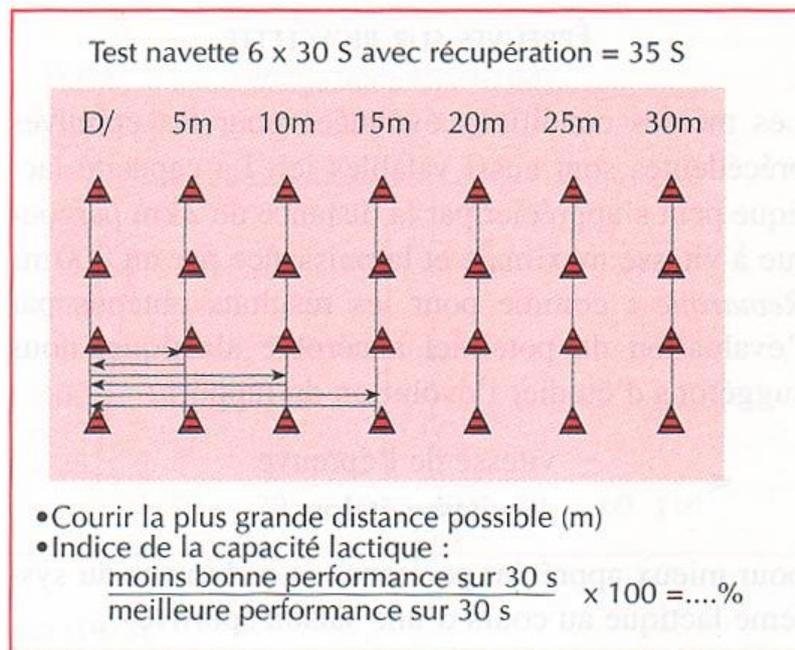


Figure 11

□ Course de 500m de Lemon

Sur une piste étalonnée de 50 en 50 m, il s'agit de courir un 500 m à la vitesse la plus élevée possible. Chronométrer le deuxième et le dernier 50 m.

On calcule alors la différence entre les deux performances chronométrées enregistrées et on multiplie le score obtenu par 10. L'objectif est d'obtenir le résultat le plus faible possible. On admet qu'une forte décroissance de la vitesse entre les deux 50 m est liée à une importante accumulation lactique, ce qui constituerait la limite anaérobie lactique du sujet.

Exemple : Si un sujet court le deuxième 50 m en 6.9 s et le dernier en 7.8 s son score serait $7.8 - 6.9 = 0.9 \times 10 = 9$ points.

□ Prises de performances chronométrées sur différentes distances.

Les performances réalisées sur les distances suivantes peuvent utilement renseigner sur les caractéristiques du processus anaérobie lactique.

Selon l'âge, le sexe et le niveau d'entraînement des sujets

- la puissance peut être évaluée par des sprints de 200 ou 300 m
- l'endurance par des courses de 600 ou 800 m

□ Épreuves de nage

Elles dépendent de l'âge, du sexe, du niveau technique et d'entraînement du sujet et bien sûr de la technique de nage retenu.

□ Épreuve sur bicyclette

Les mêmes conditions évoquées pour les épreuves précédentes sont aussi valables ici. La capacité lactique peut s'apprécier par la distance de 2 km parcourue à vitesse maximale et la puissance par un 800 m.

Remarque : comme pour les résultats obtenus par l'évaluation du potentiel anaérobie alactique, nous suggérons d'étudier l'évolution du rapport : $\frac{\text{vitesse de l'épreuve}}{\text{vitesse étalon}}$

pour mieux apprécier puissance et endurance du système lactique au cours d'une saison sportive.

□ **Evaluation de l'endurance anaérobie lactique.**

En ce qui concerne le potentiel anaérobie lactique, il est difficile de dissocier clairement l'endurance de la capacité du processus. En effet, dans les deux cas, les intensités requises sont très voisines. Le débit maximum de production d'ATP à partir de la glycolyse anaérobie se situe cependant entre 30 et 50s, alors que, à intensité supramaximale très sensiblement moindre, la glycolyse lactique continue de contribuer à un important apport énergétique jusqu'à environ 2 à 3min. Soulignons encore que dans ces durées, la glycolyse aérobie devient alors une source énergétique d'autant plus associée à la réalisation de ce type d'activité musculaire que le potentiel aérobie du sujet est développé. L'évaluation de l'endurance anaérobie lactique est donc toujours liée à celle de la puissance aérobie maximale.

□ Épreuve de De Bruyn-Prévost (1975)

L'objectif de cette épreuve est de mesurer le travail lactique total. Elle consiste à chronométrer la durée maximale pendant laquelle un sujet est capable de pédaler sur un cycloergomètre à une puissance standard (rythme + freinage) établie en fonction du sexe, et prendre la fréquence cardiaque en fin d'épreuve pendant 3 minutes.

Le matériel nécessaire pour réaliser cette épreuve, comprend un cycloergomètre à freinage mécanique ou électromagnétique, un métronome et un indicateur de vitesse, un compte-tours cumulatif solidaire du pédalier et un chronomètre. Après échauffement, l'intensité de l'exercice est fixée à 400 W pour les hommes et à 350W pour les femmes, pour un rythme de pédalage fixé respectivement entre 124 et 128 et entre 104 et 108 rotations par minute (figure 12)

Au cours de l'épreuve, il faut enregistrer :

- la durée nécessaire (en secondes) pour atteindre le rythme cible.
- la durée totale pendant laquelle le sujet a maintenu le rythme cible.

Après l'arrêt de l'épreuve, pendant la récupération, le nombre de pulsations est enregistré par séquences de 15 s chacune située à 1, 2 et 3 min.

Après avoir enregistré les données de l'épreuve : puissance cible (watts), rotations/min cible, rotations/min réelles moyennes, nombre total de rotations, le travail total (J), les fréquences cardiaques à 1, 2 et 3 min (b/min), on calcule l'indice I ($I = \text{Durée totale de l'épreuve} / \text{délai initial} \times (FC_1 + FC_2 + FC_3)$) et l'indice II ($II = \text{Durée totale de l'épreuve} / \text{délai initial}$).

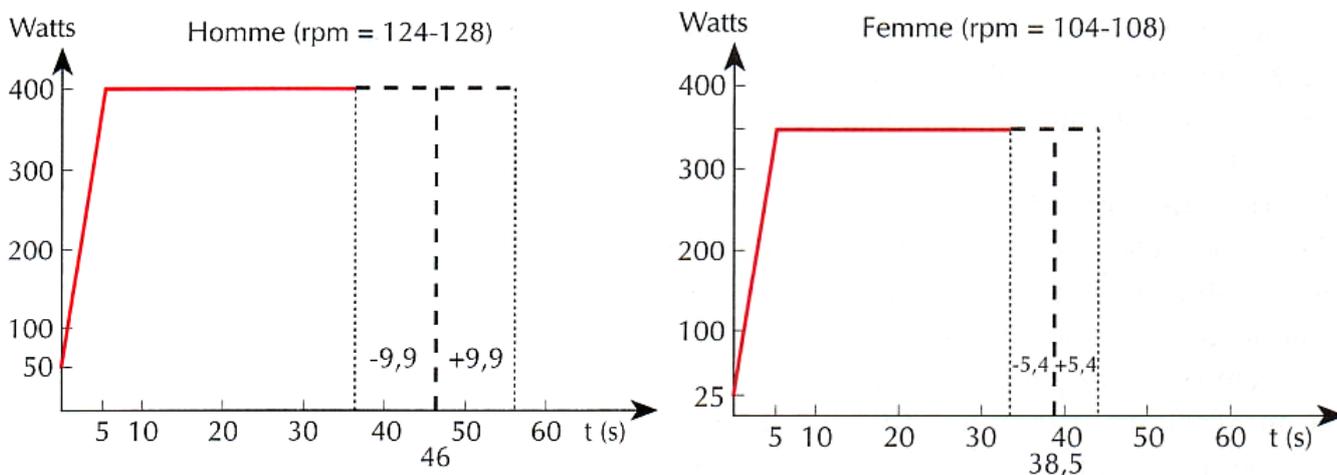


Figure 12 : Caractéristiques des résultats moyens obtenus respectivement par les hommes et les femmes au test sur ergocycle de De Bruyn-Prévost.

Limites de signification des mesures et épreuves anaérobies lactiques

Nous avons déjà indiqué les limites de la lactatémie. La molécule de lactate diffuse inégalement dans les différents compartiments liquidiens de l'organisme à partir desquels son devenir est multiple on sait que, même au cours de l'exercice, une certaine quantité peut être retransformée en glycogène (cellules hépatiques et musculaires), une autre totalement oxydée (cellules myocardiques et musculaires) ou/et encore transaminée en alanine, enfin une petite quantité serait éliminée par la sueur.

La quantité qui demeure dans le sang n'est donc que le reflet indirect et imparfait de la production cellulaire réelle. Elle-même dépend des caractéristiques musculaires et du niveau d'entraînement du sujet. Autrement dit, la lactatémie n'est qu'un moyen peu précis d'évaluation de la capacité anaérobie lactique .

D'autres facteurs sont aussi susceptibles de fausser les épreuves d'évaluation de l'aptitude anaérobie lactique. Ils sont d'ordre :

- *psychologique* car les sujets non motivés ne vont pas jusqu'au bout de leurs possibilités;
- *physiologique*, la consommation maximale d'oxygène jouant un rôle d'autant plus important que la durée de l'exercice se situe au-delà de 30 s (à des intensités supramaximales, 90 à

95 % de la consommation maximale d'oxygène peuvent être sollicités dès la première minute). Inversement, plus la durée de l'épreuve est courte, plus intervient l'hydrolyse des phosphagènes.

- et enfin *biomécanique*, car les rapports segmentaires, la taille et le poids du sujet, de même que l'apprentissage technique de certaines tâches complexes, peuvent infléchir les résultats et les rendent difficilement comparables d'un individu à l'autre.

Bien que les résultats de ces épreuves soient entachés d'une certaine imprécision, ils permettent néanmoins de donner d'assez bonnes indications individuelles. Répétés à intervalles réguliers, ils peuvent permettre d'apprécier l'impact d'un programme d'entraînement sur le métabolisme dit « anaérobie lactique », principalement sollicité dans toutes les activités physiques et sportives d'une durée comprise entre 10 s et 3 min.

BIBLIOGRAPHIE

(1) AYALON (H.), INBAR (O.), IIAR-OR (O.).- Relationship among measurements of explosive strength and anaerobic power. In NELSON (R.C.), MAREHOUSE (C.A.) (cd'). International Series on Sport Sciences, Vol. I. *Biomechanics IV Proceedings of the Fourth International Seminar on Biomechanics*, Baltimore University Park Press, 1974. pp. 572-577.

(2) BAR-OR (O.), INBAR (O.).- Relationship among anaerobic capacity, sprint and middle distance running of school children. In SHEPHARD (R.), LAVALLEE (H.) (eds), *Physical Fitness Assessment*. Springfield: Thomas, 1978, pp. 142-147

(3) BEN ARI (E.), INBAR (O.), BAR-OR (O.).- The aerobic capacity and maximal anaerobic power of 30 to 40 years old men and women. In LANDRY (F.), ORBAN (W.A.R.) (eds).

Biomechanics of Sports and Kinanthropometry. Proceedings of the International Congress of Physical Activity Sciences, Québec :1976, Miami - Symposium Specialists, Inc., 1978, pp. 427-433. (3) COSTILL (D.L.).- Compte rendu de conférence. Spécial Sport Natation n° 1, Paris INSEP, 1980.

(4) CUMMING (G.R.).- Correlation of athletic performance and aerobic power in 12 to 17 years old children with bone age, calf muscle, total body potassium, heart volume and two indices of anaerobic power. In BAROR (O.) (cd). *Proceedings of the 4th International Symposium on Pediatric Work Physiology*, Wingate Institute, 1975, pp. 109-134.

(5) DAL MONTE (A.), LEONARDI (L.M.). Nouvelle méthode d'évaluation de la puissance anaérobie maximale alactacide.- Congrès Groupement Latin Médecine du Sport, Nice : 1977, pp. 3942.

(6) DE BRUYN, PREVOST (P.).- Essai de mise au point d'une épreuve anaérobie sur la bicyclette ergométrique. *Médecine du sport*. 1975, 49, n° 4, pp. 202-206.

(7) GEORGESCO (M.), ALEXANDRESCO (C.), FOZZA (C.), DIMITRIU (v.), CHEREBETIU (G.), NICOLAESCO (v.).- Capacité d'effort anaérobie chez les non entraînés âgés de 7 à 21 ans. *Médecine du sport*, 1977, 51, n° 3, pp.147-152.

- (8) HEBBELINCK (N.).- Réactions cardiorespiratoires au cours d'un travail épuisant répété chez l'homme normal. *In* - HORNOF, SCHMID (eds), **Poumon, respiration et sport**, Prague : Littér. Mé<l. Tchec., 1965, pp. 195-220.
- (9) HEBBELINCK (N.). - Ergometry in physical training research - *J. Sports Med. Phys. Fit.* 1969, 9, n' 2, pp. 69-79.
- (10) INBAR (O.), AYALON (A.), BAR-OR (O.).- Relationship between tests of anaerobic capacity and power. *Israel. j. Med. Sel.*, 1974, 10, p. 290 (abstract).
- (11) INBAR (O.), BAR-OR (O.).- The effect of intermittent warm-up on 7-9 years old boys. *Europ. J. Appl. Physiol.*, 1975, 34, pp. 81-90.
- (12) INBAR (O.), DOTAN (R.), BAR-OR (O.).- Aerobic and anaerobic components of a thirty second supermaximal cycling task, Congrès annuel de l'American College of Sports Medicine, Anaheim, Maz, 1976, (abstract). *Med. Sel. Sports*, 1976, 8, n° 1, p. 51.
- (13) INBAR (O.), BAROR (O.).- Relationships of anaerobic and aerobic arm and leg capacities to swimming performance of 8-12 years old children. *In*: LA~ALL~E (H.H.), SHEPHARD (R.J.) (eds). *Frontiers of Activity and Child Health*. Québec Pélican, 1977, pp. 283-292.
- (14) KALAMEN (J.).- Measurement of Maximum Muscular Power in Man. Doctoral dissertation. The Ohio State University, 1968.
- (15) KEUL (J.), KINDERMANN (W.), SIMON (G.).- La transition aérobie-anaérobie lors de la pratique de certains sports. Comptes rendus du Colloque de Nice énergétique et sports de compétition, 4 novembre 1978.
- (16) LACOUR (J.R.), FLANDROIS (R.), DENIS (C.).- Les tests d'effort. *In* : **Sports et Sciences**, Paris : Vigot, 1981, pp. 235-269.
- (17) MATHEWS (D.K.), FOX (E.L.).- The physiological basis of physical education and athletics.- Philadelphia Saunders, 1976, p. 499.
- (18) MORAND (P.H.), GRANGER (G.), RADAORNI (H.), LORIN (C.).- Détermination du seuil anaérobie. Applications à l'entraînement des sportifs. Congrès Groupement Latin Médecine du Sport, Nice, 1977, pp. 57-58.
- (19) MARGARIA (R.), EDWARDS (H.T.), DILL (B.). The possible mechanism of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *Am. J. Physiol.*, 1963, 106, pp. 689-714.
- (20) MARGARIA (R.), AGREMO (P.), ROVELLI (E.).- Measurement of muscular anaerobic power in man. *J. Appl. Physiol.*, 1966, 21, pp. 1662-1664.
- (21) PIRNAY (F.), CRIELAARD (J.M.). Mesure de la puissance anaérobie alactique. *Médecine du sport*, 1979, 53, pp. 13-16.
- (22) TANCHE.- Tests jugeant des efforts courts et intenses. *Cinésiologie*, 1977, n° 63, pp. 3948.
- (23) BOSCO (C.), LUHTANEN (P.), KOMI (P.V.).- A simple method for measurement of mechanical power in Jumping. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1983, 50, pp. 273-282.