



Club des
cardiologues
du sport

DÉPENSES ÉNERGÉTIQUES ET SPORT

Avec la revue

CARDIO&SPORT

LA REVUE PRATIQUE DE LA CARDIOLOGIE DE L'EFFORT

N°37 - Novembre 2013

COMPRENDRE

Dépenses énergétiques et sport

Quelle filière énergétique
pour quel effort ?

CAS CLINIQUE



Tachycardie à QRS larges chez un rugbyman professionnel

Préexcitation
par fibres de Mahaim

ÉVÈNEMENT

Biathlon

Tour d'horizon
d'une double discipline

Rencontre avec
Antonin Guigonnat,
jeune espoir du biathlon



DOSSIER

Dilatation de l'aorte

La pratique sportive est-elle compatible avec cette pathologie ?

- ✂ Les différents types d'anévrismes de l'aorte thoracique ascendante :
description et physiopathologie
- ✂ Dilatations aortiques et sport : quelle conduite adopter ?
- ✂ Un cœur d'athlète peut-il expliquer une aorte ascendante dilatée ?

Dépenses énergétiques et sport

Quelle filière énergétique pour quel effort ?

Pourquoi Usain Bolt, qui est aujourd'hui l'homme le plus rapide du monde sur 100 et 200 m, n'est-il pas également le meilleur au 10 000 m ou au marathon ? Comment expliquer que le record du monde du 10 000 m ne soit pas cent fois celui du 100 m ? Au cours d'un effort physique, l'organisme doit ajuster en permanence sa production d'énergie aux besoins de l'exercice. Les adaptations physiologiques qui vont permettre cet ajustement ne sont pas les mêmes selon l'intensité et la durée de l'exercice. Quelles sont ces adaptations ? Dans quelle mesure contribuent-elles à la performance ? Pourquoi est-il important de les quantifier ? Cet article fait le point.

Pr Laurent Bosquet*

À L'ORIGINE : L'ÉNERGIE

Toutes les formes d'activité physique de la vie quotidienne, qu'elles soient sportives ou non, nécessitent de l'énergie. Cette énergie, qui provient à l'origine du soleil, est convertie en énergie chimique par les plantes. C'est en mangeant les plantes, ou les animaux qui mangent ces plantes, que nous obtenons à notre tour de l'énergie. Elle est stockée dans les nutriments issus de la dégradation de ces aliments, que sont les glucides, les lipides et les protéines, selon des proportions variables (de 4 à 9 kcal/g de nutriment). L'évolution de l'espèce a permis d'équiper chacune de nos cellules des moyens nécessaires pour utiliser cette énergie, que ce soit pour transporter des molécules dans l'organisme, catalyser des réactions chimiques ou permettre la contraction musculaire. Notre capacité à nous mouvoir dans notre environnement dépend donc en très grande

partie de notre capacité à extraire l'énergie contenue dans les nutriments et à la transférer aux éléments contractiles du muscle squelettique. Il faut pour cela une molécule qui va servir d'intermédiaire. C'est précisément à cette étape qu'intervient l'adénosine triphosphate (ATP).

Le rôle de cette molécule, qui est constituée de trois phosphates inorganiques attachés à une molécule d'adénosine, est de stocker l'énergie dans les liaisons entre ses phosphates, selon le principe d'un ressort comprimé prêt à libérer son énergie potentielle dès qu'on lui permet de se relâcher.

L'ATP est une molécule qui est assez peu intéressante du point de vue énergétique par rapport aux nutriments, puisqu'il contient seulement 0,015 kcal/g. A titre d'illustration, un marathonien qui couvre la distance en 3 h et renouvelle environ 10 g d'ATP chaque seconde devrait disposer d'environ 108 kg d'ATP au début de l'épreuve s'il ne devait compter que sur cette source d'énergie. Il est donc beaucoup plus

efficace d'en avoir une petite quantité et de la renouveler au fur et à mesure qu'elle est utilisée, à partir de l'énergie contenue dans les nutriments. C'est exactement ce qui se passe dans les faits. Imaginons que notre marathonien pèse 70 kg, dont 30 kg de muscle frais. Il dispose alors d'une réserve d'ATP d'environ 90 g, ce qui correspond à 1,35 kcal, alors qu'il en a besoin de près de 3 000 pour parcourir les 42 km de l'épreuve. L'énergie dépensée au cours d'un marathon provient donc à 99,95 % des nutriments. Ce fonctionnement particulier nécessite la mise en place de voies métaboliques spécifiques dont l'objectif final est de renouveler l'ATP.

LES FILIÈRES DE RESYNTHÈSE DE L'ATP (1)

LES PHOSPHAGÈNES

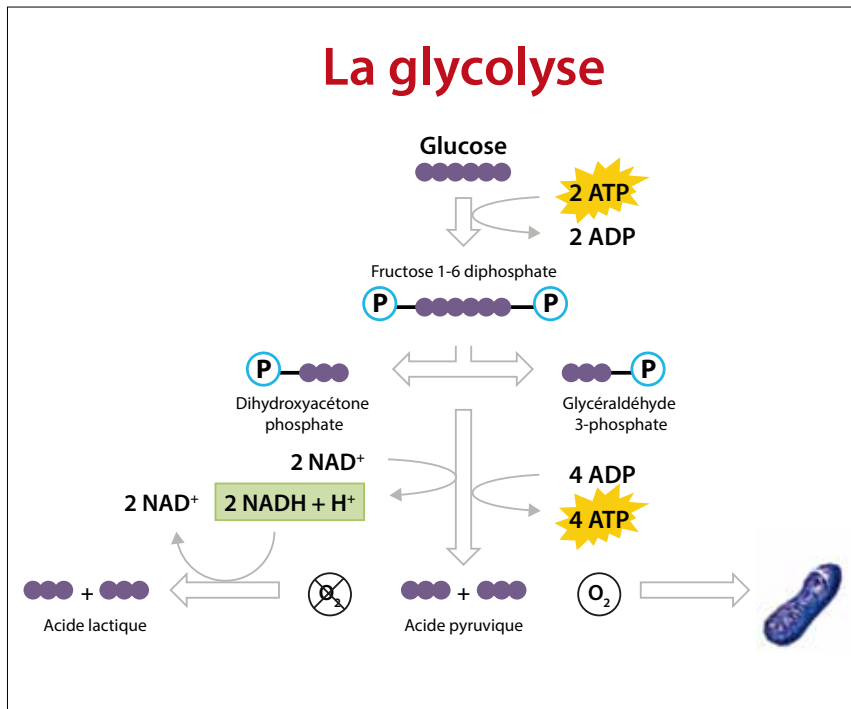
Le système de resynthèse de l'ATP le plus simple et le plus rapide est celui des phosphagènes. Nos cellules contiennent une petite quantité d'une molécule assez proche de la structure de l'ATP : la phosphocréatine (PCr). Sous l'action de la créatine kinase, l'énergie contenue dans la liaison entre la molécule de créatine et le phosphate inorganique qui constituent la PCr est transférée à une molécule d'ADP, à laquelle on ajoute un phosphate inorganique afin qu'elle soit "encapsulée". Ce système de transfert n'est pas spécifique à la PCr, puisque sous l'action de l'adénylate kinase, l'énergie contenue dans l'ADP peut également être utilisée pour reformer un ATP à partir d'une seconde molécule d'ADP.

*Faculté des sciences du sport, Université de Poitiers

L'intérêt de ce jeu de chaises musicales est sa rapidité. Les phosphatases permettent en effet de maintenir un débit de resynthèse de l'ATP très élevé, ce qui convient

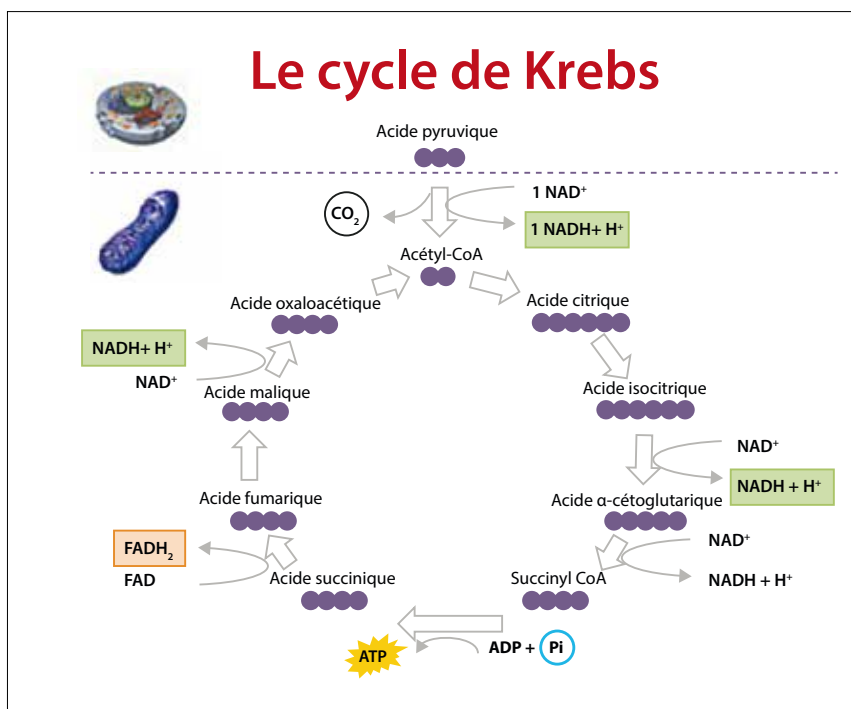
parfaitement aux efforts très intenses. En revanche, ils disposent d'une capacité limitée, puisqu'ils ne peuvent couvrir les besoins énergétiques que pour 5 à 15 secondes

d'exercice d'intensité maximale. Lorsque les besoins sont plus importants, c'est la dégradation des nutriments qui fournit l'énergie requise pour la resynthèse de l'ATP, à commencer par le glucose.



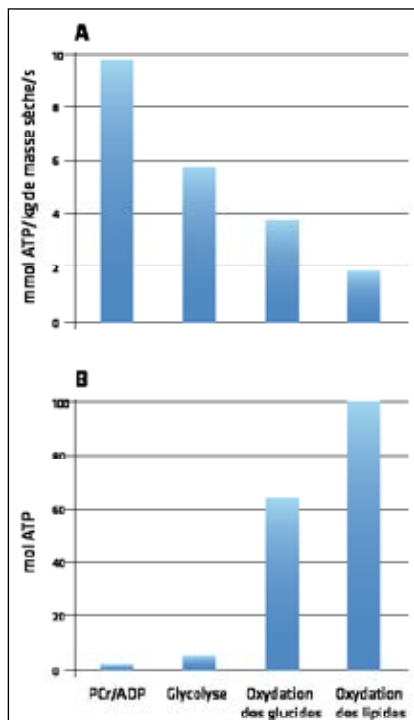
LE GLUCOSE

Le catabolisme du glucose se déroule dans le cytosol (Fig. 1). Il s'agit d'une fermentation qui permet de passer d'une mole de glucose à deux moles d'acide pyruvique, avec un bilan net de deux ATP s'il s'agit de glucose circulant ou de trois ATP s'il provient du glycogène intracellulaire. La glycolyse produit également des protons (H⁺), qui sont transportés de façon temporaire par une coenzyme impliquée dans les réactions d'oxydoréduction, le nicotinamide adénine dinucléotide ou NAD, qui est transformé en NADH. En effet, en l'absence d'oxygène, il est important d'oxyder rapidement ces transporteurs réduits afin de pouvoir continuer à dégrader du glucose. L'accepteur final de ces protons est l'acide pyruvique, qui est transformé en acide lactique. En présence d'oxygène, les protons et le pyruvate vont suivre deux voies métaboliques distinctes qui se situent dans la mitochondrie : le cycle de Krebs et la chaîne respiratoire (siège de la phosphorylation oxydative).



Le cycle de Krebs (Fig. 1) est une succession de réactions enzymatiques dont le bilan net est de deux ATP par mole de glucose, soit le même que pour la glycolyse ! En fait, tout l'intérêt du cycle de Krebs réside, non pas dans sa capacité à resynthétiser directement de l'ATP, qui est relativement limitée, mais plutôt dans celle à approvisionner la chaîne respiratoire en protons. Les complexes enzymatiques de cette chaîne vont ensuite expulser ces protons dans l'espace intermembranaire de la

>>> Figure 1 - Représentations synthétiques de la glycolyse et du cycle de Krebs. Adapté de Wilmore et al. (2008) (1).



>>> Figure 2 - Caractéristiques de puissance (A) et de capacité (B) des différentes filières énergétiques. Adapté de Wilmore et al. (2008) (1).

mitochondrie, créant ainsi un gradient, aussi appelé force protonomotrice. C'est en retournant dans la matrice mitochondriale par le complexe de l'ATPase que ces protons vont apporter l'énergie nécessaire à la resynthèse de l'ATP, selon le principe de la dynamo. Les protons générés par le cycle de Krebs permettent la resynthèse de 22 ATP par mole de glucose. Si nous y ajoutons l'ATP resynthétisé directement, et celui qui provient des protons libérés à d'autres étapes du catabolisme du glucose, le bilan global du catabolisme du glucose est de 38 ATP lorsqu'il provient de la circulation, et 39 ATP lorsqu'il provient du glyco-gène intracellulaire.

LES LIPIDES ET LES PROTÉINES

La glycolyse et le cycle de Krebs constituent le tronc sur lequel vont venir se greffer les réactions

biochimiques associées à la dégradation des lipides et des protéines. On a en effet coutume de dire que les graisses (c'est également vrai pour les protéines) brûlent sous un feu de glucose. Les triglycérides constituent une réserve énergétique très importante : environ 110 000 kcal pour un individu de 70 kg avec une masse grasse de 17 %. Ils sont constitués de trois acides gras attachés à une molécule de glycérol. La première étape de leur catabolisme va consister à séparer ces éléments, grâce à l'action de la lipase. Le glycérol va rester dans le cytosol et intégrer la glycolyse, tandis que les acides gras vont pénétrer dans le cytoplasme et approvisionner le cycle de Krebs en acétyl-coA grâce à la β-oxydation. Le bilan net de la dégradation d'une mole d'acide palmitique est de 129 ATP. Il est quantitativement beaucoup plus élevé que celui du glucose, mais l'équivalent énergétique de ce dernier en fait un substrat beaucoup plus intéressant lorsqu'il s'agit de maintenir une intensité élevée (5,12 vs 4,75 kcal par litre d'oxygène consommé).

La logique d'utilisation est sensiblement la même pour les protéines. Les acides aminés qui les constituent sont dégradés par désamination oxydative, les produits finaux intègrent ensuite différentes étapes du cycle de Krebs. La contribution énergétique des protéines au cours de l'exercice reste cependant négligeable.

QUELLE FILIÈRE POUR QUEL EFFORT ?

Ces différentes voies métaboliques possèdent des caractéristiques de puissance (quantité d'ATP resynthétisée par unité de temps) et de capacité (quantité totale d'ATP susceptible d'être resynthétisée) qui leur sont propres (Fig. 2). Les phosphagènes permettent de resynthétiser l'ATP quasiment instantanément et à un débit très élevé, mais les réserves disponibles sont relativement faibles. A l'inverse, les acides gras ne permettent pas un débit de resynthèse de l'ATP très élevé, mais les réserves dont nous disposons

| Tableau 1 - Systèmes énergétiques majoritairement utilisés en fonction de la durée et de l'intensité de l'exercice. | | |
|---|--------------------------------|--|
| Durée (secondes) | Intensité (échelle arbitraire) | Systèmes énergétiques majoritairement impliqués |
| 0 - 6 | Extrêmement élevée | • Phosphagènes (ATP, ADP, PCr) |
| 6 - 30 | Très élevée | • Phosphagènes (ATP, ADP, PCr) • Glycolyse avec production d'acide lactique |
| 30 - 120 | Élevée | • Glycolyse avec production d'acide lactique |
| 120 - 180 | Modérée | • Glycolyse avec production d'acide lactique • Cycle de Krebs et phosphorylation oxydative (Glucides) |
| > 180 | Faible | • Cycle de Krebs et phosphorylation oxydative (Glucides, lipides, acides aminés) |

sont beaucoup plus importantes. Ce sont ces caractéristiques de capacité et de puissance qui vont déterminer les voies métaboliques préférentiellement utilisées au cours de l'exercice (Tab. 1). Il est important de conserver à l'esprit que ces filières énergétiques ne sont pas mutuellement exclusives. Elles sont généralement activées en même temps ou dans des laps de temps relativement rapprochés. Seule leur importance relative dans la fourniture totale d'énergie est modifiée, en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice.

On a coutume de regrouper les phosphagènes et la glycolyse dans la voie dite anaérobie (car elle ne nécessite pas d'oxygène), et le cycle de Krebs et la phosphorylation oxydative dans les processus dits aérobie. La contribution aérobie augmente de façon exponentielle avec la durée de l'effort. Si la production d'énergie nécessaire pour un effort maximal de 10 secondes provient à 94 % environ des processus anaérobies, cette proportion passe à 55 % en moyenne pour un effort maximal d'une minute, et à seulement 20 % pour un effort maximal de 4 minutes (2).

Il ne faudrait toutefois pas croire que les processus anaérobies ne comptent que pour la portion congrue dans les épreuves de fond. Si cette supposition est vraie d'un point de vue quantitatif, elle ne l'est certainement pas d'un point de vue qualitatif. Il suffit de se souvenir de l'incroyable dernier tour du 10 000 m des jeux Olympiques d'Atlanta, parcouru en 54 secondes environ par Haile Gebreselassie, pour se rendre compte qu'il s'agit d'une qualité physique très importante pour les coureurs de demi-fond et de fond, qui leur permet de faire la différence lorsqu'il s'agit de gagner une course.

POURQUOI MESURER LA DÉPENSE ÉNERGÉTIQUE ?

POUR LA PERFORMANCE SPORTIVE

Dans un certain nombre de disciplines telles que la course à pied, le cyclisme ou la natation, la performance dépend en très grande partie des stratégies mises en œuvre par l'organisme pour dépenser le maximum d'énergie en un temps très court, ou pour minimiser sa dépense d'énergie à une intensité donnée afin de la maintenir le plus longtemps possible.

L'évaluation de la puissance, de l'endurance et du rendement de chaque système de production d'énergie (aérobie et anaérobie) revêt donc une valeur prédictive certaine.

Elle permet également de vérifier les progrès ou, à l'occasion, de définir les intensités d'entraînement.

Parallèlement, le développement

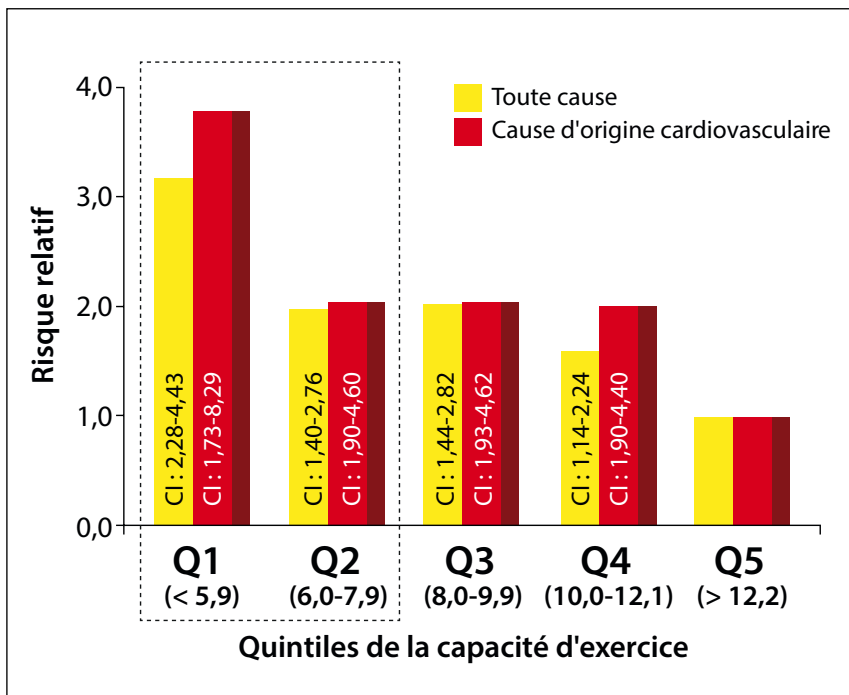
des qualités physiques nécessite des charges d'entraînement d'autant plus importantes que le niveau de performance est élevé.

L'entraîneur a besoin de quantifier précisément ces charges d'entraînement et la dépense énergétique qui y est associée, afin d'organiser les périodes de récupération et d'optimiser la capacité de performance à court et à long terme.

POUR LA SANTÉ

Une équipe américaine a suivi près de 4 500 individus qui ont bénéficié de trois à cinq mesures de la consommation maximale d'oxygène (mesure de la puissance maximale du métabolisme aérobie) pendant une période de 20 ans (3).

La figure 3, issue de cette étude, présente le risque relatif de mortalité toute cause et celui d'origine cardiovasculaire en fonction du niveau



>>> Figure 3 - Risque relatif de mortalité toute cause ou d'origine cardiovasculaire en fonction du niveau d'aptitude cardiorespiratoire (Mandic et al. 2009) (3).

d'aptitude aérobie, qui a été séparé en cinq catégories.

Leur principal constat, encadré en pointillés sur la figure, est qu'il suffit de passer de la première à la seconde catégorie, ce qui correspond à une amélioration minime de l'aptitude aérobie, pour diminuer le risque relatif de mortalité toute cause et celui d'origine cardiovasculaire par deux.

L'activité physique et la dépense énergétique qui y est associée est donc le facteur clé de l'augmentation de l'espérance de vie chez les individus qui ont l'aptitude aérobie la plus basse. De façon intéressante, les recommandations internationales sur la quantité et la qualité d'activité physique nécessaires pour obtenir des bénéfices en termes de santé sont passées de repères basés sur la fréquence cardiaque à des repères basés sur la dépense énergétique hebdomadaire (4). Cette évolution nécessite donc d'estimer la dépense énergétique associée aux différentes formes d'activité physique.

AVEC QUELS OUTILS ?

Les méthodes d'évaluation de la dépense énergétique sont nombreuses. Il n'est pas question dans cet article d'en faire une revue exhaustive, mais simplement d'en donner un bref aperçu. Chaque méthode est associée à des caractéristiques de validité, de

reproductibilité et surtout d'accessibilité qui lui sont propres. Les méthodes les plus valides (eau doublement marquée, calorimétrie indirecte) sont souvent celles qui sont le moins accessibles à cause de leur coût élevé et des compétences techniques qu'elles requièrent.

A l'inverse, les méthodes les plus accessibles (questionnaires) sont souvent les moins valides et les moins reproductibles.

Entre ces deux extrêmes figurent un certain nombre d'outils qui représentent un compromis très acceptable, tant pour les sportifs que pour les pratiquants de loisirs. Les cardiofréquencemètres, les accéléromètres, les capteurs de foulées, les GPS sont des technologies de plus en plus accessibles et dont les mesures permettent une estimation correcte de la dépense énergétique.

Les compendiums, qui sont en fait des listes d'activités physiques associées à une dépense énergétique moyenne, ou les équations de coûts, qui permettent d'estimer la dépense énergétique à partir de variables simples telles que la vitesse de déplacement ou la masse corporelle, représentent également une alternative intéressante. Leur principal inconvénient est qu'elles ne tiennent pas compte des différences interindividuelles, puisque ce sont des listes ou des équations génériques.

CONCLUSION

La capacité de performance dépend en grande partie de la capacité de l'organisme à resynthétiser l'ATP à partir de l'énergie contenue dans les nutriments, afin de répondre aux besoins énergétiques de la locomotion.

Les différents systèmes de resynthèse de l'ATP disposent de caractéristiques de puissance et de capacité qui leur sont propres, et qui permettent à l'organisme de faire face à des situations de durée et d'intensité très variables. Selon le niveau d'expression de ces systèmes énergétiques, un individu sera performant pour des efforts très courts et très intenses, ou plutôt pour des efforts d'intensité moindre mais de durée plus longue.

L'évaluation du potentiel énergétique revêt donc un intérêt majeur, que ce soit pour prédire la performance d'un sportif, vérifier ses progrès ou optimiser ses intensités d'entraînement, mais aussi pour évaluer la dépense énergétique d'un individu afin de s'assurer que sa dose d'activité physique soit suffisante pour en retirer des bénéfices en termes de santé.

MOTS-CLÉS : *Énergie, ATP, Dépenses énergétiques, Besoins énergétiques, Phosphagènes, Glucose, Cycle de Krebs, Effort, Exercice*

BIBLIOGRAPHIE

1. Wilmore J, Costill D, Kenney W. Physiology of sport and exercise. Human Kinetics, Champaign, 2008 : 574.
2. Gastin. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. Sports Med 2001 ; 31 : 725-41.
3. Mandic S, Myers J, Oliveira R et al. Characterizing

differences in mortality at the low end of the fitness Spectrum. Med Sci Sports Exerc 2009 ; 41 : 1573-9.

4. Garber C, Blissmer B, Deschenes M et al. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. Med Sci Sports Exerc 2011 ; 43 : 1334-59.