



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Disponible en ligne sur
SciVerse ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com



REVUE GÉNÉRALE

Les exercices anaérobies lactiques chez les enfants : la fin d'une idée reçue ?

Lactic anaerobic exercise in children: The end of a belief?

S. Ratel*, V. Martin

EA 3533, laboratoire des adaptations métaboliques à l'exercice en conditions physiologiques et pathologiques (AME2P), Clermont université, université Blaise-Pascal, BP 10448, 63000 Clermont-Ferrand, France

Reçu le 30 mars 2011 ; accepté le 4 août 2011

Disponible sur Internet le 19 décembre 2011

MOTS CLÉS

Croissance ;
 Acidose ;
 Exercice
 supramaximal ;
 Métabolisme ;
 Glycolyse

Résumé

Objectifs. – L'objectif de cette revue consiste à apporter un éclairage nouveau, visant à reconsidérer l'idée selon laquelle les exercices anaérobies lactiques ne doivent pas être pratiqués par les enfants.

Actualités. – Les études récentes montrent que l'activité du métabolisme anaérobie lactique de l'enfant n'est pas différente de celle de l'adulte, remettant ainsi en cause les études publiées dans les années 1970 et 1980. De plus, en raison d'un métabolisme oxydatif plus développé, les enfants sont capables d'éliminer plus rapidement les métabolites issus du métabolisme anaérobie lactique et de reconstituer plus rapidement que les adultes la phosphocréatine et l'ATP nécessaires à la restauration de la puissance maximale. Notons aussi que l'entraînement est bénéfique pour augmenter l'activité de la phosphofructokinase (PFK), enzyme clé du métabolisme anaérobie lactique et optimiser la performance anaérobie chez les enfants.

Perspectives et projets. – Il n'est ni inutile et ni dangereux, sur le plan physiologique, de solliciter la filière anaérobie lactique chez les enfants. Les physiologistes de l'exercice chez l'enfant doivent sans aucun doute poursuivre leurs recherches dans ce domaine pour augmenter les connaissances relatives aux réponses physiologiques des enfants à l'exercice anaérobie lactique.

Conclusion. – À ce jour, « aucun argument scientifique ne confirme l'idée bien souvent avancée que l'exercice anaérobie est dangereux pour la santé des enfants ».

© 2011 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

KEYWORDS

Growth;
 Acidosis;

Summary

Objectives. – The objective of this review article is to provide new insights into the practice of high-intensity activities involving the contribution of the glycolytic energy pathway into ATP replenishment in children.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : Sebastien.RATEL@univ-bpclermont.fr (S. Ratel).

Supramaximal
Exercise;
Metabolism;
Glycolysis

News. – Contrary to earlier published studies in the 1970s and 1980s, recent studies demonstrate that the activity of glycolytic energy system in exercising muscle is not different between children and adults. In addition, due to an increased oxidative metabolism, children are able to remove metabolic by-products arising from lactic anaerobic metabolism faster and recover faster the phosphocreatine and ATP stores necessary to the restoration of maximal power compared to young adults. Exercise training was also found to be effective to increase the activity of phosphofructokinase (PFK), a key enzyme of the glycolytic energy pathway and to optimize anaerobic performance in children.

Prospects and projects. – It appears that it is neither useless nor dangerous, from a physiological point of view, to propose supramaximal activities involving the lactic anaerobic metabolism to young children. The paediatric exercise physiologists should undoubtedly focus their research in this area in order to improve our understanding in the physiological responses during lactic anaerobic exercise in children.

Conclusion. – Actually, there is no scientific argument supporting the idea often advanced that anaerobic exercise is harmful for the health of young children.

© 2011 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

Bien que les connaissances dans le domaine de la physiologie de l'exercice chez l'enfant restent encore très parcellaires pour des raisons souvent d'ordre éthique et (ou) méthodologique, des recherches scientifiques récentes amènent, cependant, à reconsidérer certains préjugés ancrés dans les milieux éducatifs, sportifs et médicaux. Ainsi, la pratique des exercices qui mobilisent principalement le métabolisme anaérobie lactique chez les enfants est souvent un sujet très débattu dans ces milieux. Beaucoup considèrent encore que ce type d'exercice est inutile et même dangereux pour la santé des enfants. Aussi, en s'appuyant sur les tous derniers travaux scientifiques, il s'agira d'apporter un éclairage nouveau, visant à remettre en question les idées reçues relatives à ce type de pratique chez les enfants.

2. Définitions

Tout d'abord, considérons les enfants comme des individus n'ayant pas atteint le stade pubertaire. Par ailleurs, les termes « exercice intense » et « exercice supramaximal » seront utilisés de façon interchangeable pour définir les exercices qui nécessitent un débit de production énergétique supérieur au débit maximal aérobie de resynthèse de l'adénosine triphosphate (ATP) (i.e. les exercices faisant appel essentiellement aux voies métaboliques anaérobies pour reconstituer l'énergie nécessaire à la contraction musculaire). L'activité du système anaérobie lactique est plus spécifiquement élevée dans les exercices continus compris entre dix secondes et une minute 15 secondes [1]. Toutefois, dans le cas d'exercices intermittents supra-maximaux caractérisés par des courtes phases de travail (inférieures à dix secondes) et de récupération (inférieures à 30 secondes), la contribution du métabolisme anaérobie lactique dans la resynthèse de l'énergie est également élevée. Ces deux types d'exercices provoquent une accumulation de métabolites musculaires (i.e. le phosphate inorganique [Pi], l'adénosine diphosphate [ADP] et les protons) qui contribuent à la fatigue du muscle squelettique [2,3]. La capacité

du muscle à pouvoir neutraliser les protons musculaires par tamponnement (via l'action du Pi, du bicarbonate, ou encore des protéines tampons) et/ou par élimination du secteur musculaire (efflux de protons via l'action des co-transporteurs H⁺/lactate) est essentielle pour préserver l'activité contractile du muscle et retarder l'apparition de la fatigue. De plus, il est nécessaire de resynthétiser rapidement les stocks de phosphocréatine (PCr) musculaire à la suite de chaque exercice pour limiter l'accumulation du Pi, qui est préjudiciable au fonctionnement musculaire [3], éviter l'activation anticipée du métabolisme anaérobie lactique et faciliter la restauration de la puissance musculaire [4]. Les athlètes qui ont une bonne capacité oxydative musculaire et qui pratiquent fréquemment des courses répétées dans les sports collectifs (i.e. le football, le basket-ball, le hand-ball etc.) sont capables de récupérer très rapidement à la suite de chaque exercice en raison d'une resynthèse accélérée des stocks de PCr (via un métabolisme oxydatif augmenté) et d'une élimination plus rapide des métabolites [5].

3. Les idées reçues

Les exercices anaérobies lactiques chez les enfants sont la plupart du temps perçus comme des exercices dangereux pour leur santé et inutiles en termes de développement de leur capacité anaérobie. Par exemple, Le Chevalier [6] indique que la capacité anaérobie n'augmente sensiblement qu'avec l'avènement de la puberté et qu'il est donc inutile de programmer des activités qui sollicitent électivement le processus anaérobie lactique chez les enfants prépubères. De plus, dans son ouvrage *Biologie du Sport* (p. 335–336), Weineck [7] indique que ce type d'exercice risque de provoquer des fatigues excessives et des réactions de stress préjudiciables chez les enfants. Selon cet auteur, l'élimination du lactate et, par conséquent, la capacité de récupération sont plus faibles chez l'enfant. Dans la même idée, Bos [8] indique « qu'il est couramment admis en France qu'avant la puberté on ne dispose pas de l'équipement enzymatique qui permet de dégrader rapidement l'acide

lactique. Concrètement, cela signifie que les séries de très haute intensité sur plus de 25 mètres sont à éviter pour les jeunes nageurs ». Weineck [7] précise aussi que les exercices anaérobies lactiques provoquent chez l'enfant une élévation dix fois plus grande des catécholamines (hormones du stress) que chez l'adulte. Toutefois, la relecture des travaux scientifiques publiés dans les années 1970 et 1980 nous amène à reconsidérer ces conclusions prématurées relatives au développement et à l'entraînabilité de la capacité anaérobie chez l'enfant. De plus, des études récentes contredisent ces conclusions.

4. Les contre-arguments scientifiques

4.1. Immaturité du système anaérobie lactique ?

Tout d'abord, on peut remettre en question l'immaturité du système anaérobie lactique durant l'enfance. En se fondant sur les recherches d'Eriksson et al. dans les années 1970 [9–11], il a souvent été considéré que la capacité anaérobie n'augmente qu'avec la survenue de la puberté. L'immaturité du système anaérobie lactique chez l'enfant a été fondée sur une plus faible utilisation du glycogène musculaire au cours de l'exercice en raison d'une plus faible activité enzymatique (phosphofructokinase [PFK], lactate déshydrogénase [LDH]). Cela a pour conséquence une moindre accumulation maximale de lactate musculaire [9]. Le lien entre l'activité glycolytique et le niveau de maturation a été établi à partir d'une corrélation entre la concentration maximale de lactate musculaire et le volume testiculaire [9]. Cependant, bien que ces résultats soient d'un intérêt potentiel, ils restent très contestables pour appréhender les effets de la maturation sur l'activité de la glycolyse. En effet, le taux d'utilisation du glycogène musculaire au cours de l'exercice intense ne constitue en rien un facteur limitant de la performance anaérobie [12]. De plus, bien qu'une plus faible activité de la PFK et de la LDH ait été reportée chez les enfants par rapport aux adolescents et aux adultes [10, 13–15], celle-ci a été mesurée dans des conditions de repos et non au cours d'exercices supra-maximaux. Certaines études ne comparent pas ces données à celles d'un groupe témoin adulte [9, 13]. En outre, les travaux d'Haralambie [16] n'indiquent aucune différence dans l'activité de la LDH entre des enfants de 13 à 15 ans et des jeunes adultes. Cependant, dans cette étude, on peut s'interroger sur l'avancée pubertaire des enfants testés. Appréhender l'activité du système anaérobie lactique par simple dosage de la concentration de lactate est également réducteur puisqu'une concentration n'est que la résultante d'un équilibre entre production et élimination. Une concentration de lactate dans le muscle ne représente donc pas uniquement ce qui est produit par l'activité du système anaérobie lactique. De plus, la relation obtenue entre le volume testiculaire et la concentration maximale de lactate chez les enfants n'est assurément pas une relation de cause à effet. Enfin, les résultats d'investigations récentes nous amènent à porter un regard nouveau sur la contribution des différentes voies métaboliques dans la resynthèse de l'énergie au cours de l'exercice en fonction du développement de l'enfant. En effet, nous avons récemment étudié le métabolisme énergétique *in vivo* des

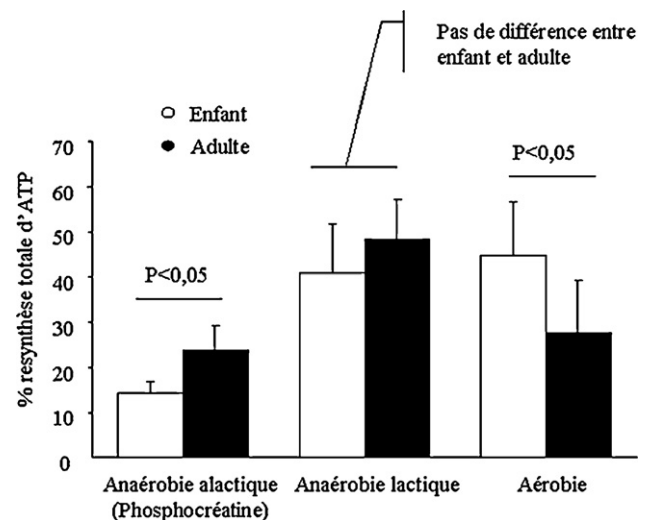


Figure 1 Contribution relative de chaque filière métabolique, exprimée en pourcentage de la synthèse d'adénosine triphosphate totale produite au cours d'un exercice de flexion des doigts de trois minutes réalisé à 15% de la force maximale volontaire chez des enfants et des adultes. $p < 0,05$ représente une différence significative entre enfant et adulte [12].

muscles fléchisseurs des doigts par spectroscopie de résonance magnétique du phosphore 31 chez des jeunes garçons prépubères comparés à des adultes au cours d'un exercice standardisé de trois minutes réalisé à 15% de la force maximale volontaire (FMV) [17]. L'exercice induisait une forte acidose puisque le pH intramusculaire s'est abaissé respectivement de 0,5 et 0,6 unités chez les enfants et les adultes. L'analyse quantitative de la production d'ATP, réalisée pour la première fois chez les enfants, a montré un coût énergétique identique alors que la contribution relative des différentes filières énergétiques était différente. La production oxydative d'ATP était augmentée chez les enfants en début d'exercice et était compensée par une réduction de la dégradation de PCr. En revanche, l'activité de la glycolyse était identique quel que soit l'âge [17] (Fig. 1). Cette dernière a été calculée à partir des changements du pH musculaire au cours de l'exercice en tenant compte de la consommation des protons par l'hydrolyse de la PCr (plus faible chez l'enfant), l'efflux des protons (plus importante chez l'enfant) et la capacité de tamponnement total du muscle (identique entre enfant et adulte) [17]. En bref, les études actuelles, qui proposent des protocoles expérimentaux plus proches des conditions d'exercice, remettent donc en question les conclusions des premiers travaux sur l'enfant, sur lesquelles sont basées les pratiques du milieu sportif.

4.2. Récupération chez l'enfant

La vitesse d'élimination des métabolites musculaires issus de l'activité du processus anaérobie lactique est également à reconsidérer chez les enfants. Contrairement aux propos rapportés par Weineck [7] et Bos [8], l'élimination des métabolites musculaires semble être plus rapide après un exercice intense chez les enfants par rapport aux adultes. Après un sprint de 30 secondes sur bicyclette, Dotan et al.

[18] ont en effet montré que le pic de lactatémie est atteint à la cinquième minute de la récupération chez l'enfant alors que celui de l'adulte est obtenu à la huitième minute. Bien que cette étude n'ait pas mesuré directement un efflux de lactate, l'accumulation plus rapide du lactate dans le compartiment extracellulaire chez l'enfant nous laisse penser que l'efflux musculaire du lactate est plus rapide chez l'enfant. Les plus faibles concentrations de lactate musculaire rapportées chez les enfants à l'issue d'épreuves maximales [9] pourraient donc être expliquées en partie par une vitesse d'accumulation plus rapide du lactate dans le secteur extracellulaire via un efflux de lactate plus élevé. De plus, nous avons montré au décours d'un exercice de flexion des doigts de trois minutes réalisé à 15% de la FMV que la récupération initiale du pH musculaire est nettement plus rapide chez les enfants par rapport aux adultes ($0,03 \pm 0,09$ unités $\text{pH} \cdot \text{min}^{-1}$ vs $-0,04 \pm 0,04$ unités $\text{pH} \cdot \text{min}^{-1}$ chez les enfants et les adultes, respectivement, la valeur négative indiquant une acidose initiale post-exercice) [17,19]. Le taux d'efflux de protons correspondant était significativement plus élevé chez les enfants ($6,2 \pm 2,5$ $\text{mM} \cdot \text{min}^{-1}$) comparés aux adultes ($3,8 \pm 1,9$ $\text{mM} \cdot \text{min}^{-1}$). Bien que non analysé durant la phase de récupération, la plus faible accumulation de Pi au cours de l'exercice chez les enfants [17] nous laisse aussi supposer que ce métabolite est plus rapidement éliminé durant la récupération chez l'enfant. L'élimination des métabolites étant plus rapide, les enfants peuvent donc préserver plus longtemps leur activité contractile et retarder l'apparition de la fatigue au cours des exercices intenses et répétés [17].

Ainsi, les enfants sont capables de récupérer plus rapidement que les adultes après un exercice intense. Après un sprint de 30 secondes sur bicyclette, la restauration de la puissance maximale est complète chez les enfants après seulement deux minutes de récupération tandis que chez les adultes, la durée nécessaire est environ de dix minutes [20]. Le rétablissement plus rapide de la puissance maximale chez l'enfant est associé à une resynthèse plus rapide de PCr en raison d'une capacité oxydative musculaire augmentée [17,19]. Cette contribution supérieure du métabolisme aérobie au cours de l'exercice chez l'enfant se caractérise, d'une part, par un ajustement plus rapide de la consommation d' O_2 pendant l'exercice et, d'autre part, par une chute plus rapide de la consommation d' O_2 durant la phase de récupération au décours d'un exercice supra-maximal continu [20–22]. Cela témoigne d'un déficit en O_2 plus faible lié à une moindre contribution du métabolisme anaérobie (i.e. une utilisation plus faible de la PCr) durant la phase initiale de l'exercice chez l'enfant. L'activité supérieure du système nerveux parasympathique permet également à l'enfant de récupérer plus rapidement sa fréquence cardiaque de repos à la suite d'un exercice intense [23–25].

4.3. Fatigabilité

En raison d'une élimination accélérée des métabolites musculaires et d'une resynthèse facilitée de la phosphocréatine musculaire, les enfants, à l'inverse des adultes, sont capables de répéter plus facilement des exercices

intenses sans qu'une fatigue trop importante n'apparaisse. Par exemple, au cours d'une série de dix sprints de dix secondes sur bicyclette séparés par des intervalles de récupération de 30 secondes, les enfants peuvent maintenir leur puissance maximale alors qu'elle diminue de 29% chez les adultes [26]. De la même manière, la distance maximale parcourue diminue plus faiblement au cours d'une série de dix sprints de dix secondes en course à pied séparés par des pauses de 15 secondes chez les enfants par rapport aux adultes ($-18,6$ vs $-29,4\%$, respectivement) [27]. Lors de cette série, l'exercice est perçu comme plus facile par les enfants par rapport aux adultes [27]. Ainsi, l'aptitude à maintenir une performance maximale au cours d'une épreuve intense intermittente est d'autant plus élevée que le sujet est jeune. Les enfants produisent moins de puissance, récupèrent plus vite et sont donc capables de mieux la maintenir au cours d'une série d'exercice intense mobilisant considérablement le métabolisme anaérobie lactique.

4.4. Accumulation des catécholamines

Contrairement à ce qui a été rapporté par Weineck [7] dans son ouvrage *Biologie du Sport* (p. 335–336), les exercices qui sollicitent le processus anaérobie lactique ne sont pas physiologiquement plus stressants chez les enfants que chez les adultes. Les deux seules études qui ont mesuré la concentration plasmatique des catécholamines (i.e. les hormones du stress : adrénaline et noradrénaline) après un exercice maximal chez les enfants et les adultes ont montré des valeurs similaires entre les deux groupes [28,29]. Rappelons que l'accumulation des catécholamines au cours de l'exercice n'est pas une réponse antiphiologique. Elle permet naturellement au muscle squelettique de répondre aux contraintes énergétiques engendrées par l'exercice. Les conclusions un peu trop hâtives de Weineck [7] proviennent des résultats de l'étude de Lehmann et al. [28] qui montrent des concentrations plasmatiques de catécholamines plus élevées chez les enfants mais pour des intensités de travail sous maximales relatives (en pourcentage des aptitudes maximales) plus importantes. À charges de travail absolues identiques, il est vraisemblable que le stress physiologique chez l'enfant soit plus élevé en raison de leurs plus faibles aptitudes maximales. La comparaison avec les adultes devrait donc être établie à des intensités de travail relatives similaires. Par conséquent, l'influence du système nerveux sympathique au cours de l'exercice maximal est indépendante de la maturation biologique.

4.5. Impact de l'entraînement

4.5.1. Métabolisme anaérobie lactique

De manière très surprenante, l'idée selon laquelle il est inutile de programmer des activités qui sollicitent électivement le métabolisme anaérobie lactique chez les enfants en raison d'un manque de maturité de ce métabolisme avant la puberté, est très répandue dans le milieu sportif [6]. Pourtant, cette idée n'est aucunement fondée puisqu'il semble possible de faire progresser un système énergétique par l'entraînement, indépendamment de son état de

développement biologique. En effet, les travaux d'Eriksson et al. [10] montrent clairement qu'un entraînement en endurance de six semaines à une intensité proche de la fréquence cardiaque maximale augmente significativement l'activité de la PFK de 45% et l'activité de la SDH (enzyme du métabolisme aérobie) de 22,5% chez des enfants de 12 ans. Ainsi, un entraînement même non spécifique au métabolisme anaérobie lactique permettrait d'induire des changements favorables à la capacité anaérobie du jeune sportif. Toutefois, seule cette étude s'est intéressée à la question de l'entraînabilité du métabolisme anaérobie lactique chez l'enfant. D'autres travaux, évaluant notamment les effets sur le métabolisme anaérobie lactique d'un entraînement spécifique à cette voie métabolique, sont donc nécessaires pour confirmer cette hypothèse. De telles études devraient être conduites avec des groupes d'enfants représentatifs des différents stades de maturation afin de connaître la période critique au cours de laquelle l'entraînement pourrait être le plus bénéfique pour développer la capacité anaérobie du jeune sportif.

4.5.2. La performance anaérobie lactique

S'il n'existe pas d'étude ayant étudié l'effet d'un entraînement spécifique sur le métabolisme anaérobie lactique, certains travaux ont toutefois démontré l'effet positif d'un entraînement spécifique sur la performance anaérobie lactique. Ainsi, un entraînement de neuf semaines à une fréquence de trois séances par semaine augmente la puissance moyenne sur 30 secondes au cours d'un test de Wingate d'environ 10% chez des garçons de dix à 11 ans [30]. Grodjinovsky et al. [31], ont également rapporté une augmentation de 4% de la puissance moyenne sur 30 secondes au décours d'une période d'entraînement de six semaines. Les gains de performance anaérobie chez les enfants sont généralement expliqués par une meilleure coordination inter- et intramusculaire (i.e. un meilleur recrutement des unités motrices) [32]. Toutefois, les résultats des études citées ci-dessus suggèrent qu'une augmentation du débit d'énergie d'origine anaérobie lactique pourrait également contribuer aux gains de performance.

4.5.3. La performance aérobie

Enfin, il est intéressant de noter qu'un entraînement supramaximal réalisé deux fois par semaine durant sept semaines à des intensités comprises entre 100% et 130% de la vitesse maximale aérobie (VMA) a des effets positifs sur la performance aérobie [33]. Au décours de ce programme d'entraînement, la VMA augmentait significativement de 5% et la consommation maximale d'O₂ de 8% chez des filles et des garçons de huit à 11 ans. Les intensités d'exercice spécifiques au métabolisme anaérobie lactique sont intéressantes pour développer les aptitudes aérobie et anaérobie de l'enfant car elles sollicitent la participation des différentes voies métaboliques (aérobie et anaérobie) dans la reconstitution de l'énergie au cours de l'exercice. D'autres formes d'entraînement, sollicitant de façon spécifique le métabolisme aérobie (entraînement en endurance) et le métabolisme anaérobie alactique (entraînement de la vitesse) peuvent cependant être pratiquées pour assurer le développement harmonieux des qualités physiques de l'enfant.

5. Conclusion

Après examen critique de la littérature, il apparaît donc qu'il n'est ni inutile et ni dangereux, sur le plan physiologique, de solliciter la filière anaérobie lactique chez les enfants et de leur proposer des exercices intenses et répétés. Contrairement aux adultes, les enfants peuvent maintenir plus aisément leur puissance maximale au cours de séries de sprints séparés par de courtes pauses de récupération. En raison d'un métabolisme oxydatif plus développé, les enfants sont capables d'éliminer plus rapidement les métabolites musculaires issus du métabolisme anaérobie lactique et de reconstituer plus rapidement la phosphocréatine musculaire et l'ATP nécessaires à la restauration de la puissance maximale. De plus, l'entraînement supramaximal est bénéfique pour augmenter les performances aérobie et anaérobie de l'enfant. Ce type d'exercice n'est pas plus stressant physiologiquement chez l'enfant que chez l'adulte. En conclusion, sur le plan physiologique, « aucun argument scientifique ne confirme l'idée bien souvent avancée que l'exercice anaérobie est dangereux pour la santé des enfants » [34].

Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

Références

- [1] Gastin PB. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med* 2001;31(10):725–41 [Review].
- [2] Gaitanos GC, Williams C, Boobis LH, Brooks S. Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol* 1993;75:712–9.
- [3] Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev* 2008;88(1):287–332.
- [4] Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK, Nevill AM. Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man. *J Physiol* 1995;482:467–80.
- [5] Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK. Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J Appl Physiol* 1996;80:876–84.
- [6] Le Chevalier JM. Pourquoi les efforts lactiques dits de « résistance » sont néfastes pour les jeunes (de benjamins à cadets)? *Revue de l'association des entraîneurs français d'athlétisme (AEFA)* 1999 [hors série: 42].
- [7] Weineck J. *Biologie du Sport*. Paris: Éditions Vigot; 1992.
- [8] Bos JC. Planifier son entraînement. *Toute la natation* 1997; 3: 46–57.
- [9] Eriksson BO, Karlsson J, Saltin B. Muscle metabolites during exercise in pubertal boys. *Acta Paediatr Scand Suppl* 1971;217:154–7.
- [10] Eriksson BO, Gollnick PD, Saltin B. Muscle metabolism and enzyme activities after training in boys 11–13 years old. *Acta Physiol Scand* 1973;87:485–97.
- [11] Eriksson BO. Muscle metabolism in children—a review. *Acta Paediatr Scand Suppl* 1980;283:20–8.
- [12] Glaister M. Multiple sprint work: physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med* 2005;35(9):757–77 [Review].

- [13] Fournier M, Ricci J, Taylor AW, Ferguson RJ, Montpetit RR, Chaitman BR. Skeletal muscle adaptation in adolescent boys: sprint and endurance training and detraining. *Med Sci Sports Exerc* 1982;14(6):453–6.
- [14] Berg A, Keul J. Biochemical changes during exercise in children. In: Malina RM, editor. *Young athletes: biological, psychological, and educational perspectives*. Champaign: Human Kinetics; 1984. p. 61–77.
- [15] Kaczor JJ, Ziolkowski W, Popinigis J, Tarnopolsky MA. Anaerobic and aerobic enzyme activities in human skeletal muscle from children and adults. *Pediatr Res* 2005;57(3):331–5.
- [16] Haralambie G. Enzyme activities in skeletal muscle of 13–15 years old adolescents. *Bull Eur Physiopathol Respir* 1982;18:65–74.
- [17] Tonson A, Ratel S, Le Fur Y, Vilmen C, Cozzone PJ, Bendahan D. Muscle energetics changes throughout maturation: a quantitative ³¹P-MRS analysis. *J Appl Physiol* 2010;109:1769–78.
- [18] Dotan R, Ohana S, Bediz C, Falk B. Blood lactate disappearance dynamics in boys and men following exercise of similar and dissimilar peak-lactate concentrations. *J Pediatr Endocrinol Metab* 2003;16:419–29.
- [19] Ratel S, Tonson A, Le Fur Y, Cozzone P, Bendahan D. Comparative analysis of skeletal muscle oxidative capacity in children and adults: a ³¹P-MRS study. *Appl Physiol Nutr Metab* 2008;33:720–7.
- [20] Hebestreit H, Mimura K, Bar-Or O. Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: comparing boys and men. *J Appl Physiol* 1993;74:2875–80.
- [21] Armon Y, Cooper DM, Flores R, Zanonato S, Barstow TJ. Oxygen uptake dynamics during high-intensity exercise in children and adults. *J Appl Physiol* 1991;70:841–8.
- [22] Zanonato S, Cooper DM, Armon Y. Oxygen cost and oxygen uptake dynamics and recovery with 1 min of exercise in children and adults. *J Appl Physiol* 1991;71:993–8.
- [23] Baraldi E, Cooper DM, Zanonato S, Armon Y. Heart rate recovery from 1 minute of exercise in children and adults. *Pediatr Res* 1991;29:575–9.
- [24] Ohuchi H, Suzuki H, Yasuda K, Arakaki Y, Echigo S, Kamiya T. Heart rate recovery after exercise and cardiac autonomic nervous activity in children. *Pediatr Res* 2000;47:329–35.
- [25] Buchheit M, Duché P, Laursen PB, Ratel S. Postexercise heart rate recovery in children: relationship with power output, blood pH, and lactate. *Appl Physiol Nutr Metab* 2010;35:142–50.
- [26] Ratel S, Duche P, Hennegrave A, Van Praagh E, Bedu M. Acid-base balance during repeated cycling sprints in boys and men. *J Appl Physiol* 2002;92:479–85.
- [27] Ratel S, Williams CA, Oliver J, Armstrong N. Effects of age and recovery duration on performance during multiple treadmill sprints. *Int J Sports Med* 2006;27:1–8.
- [28] Lehmann M, Keul J, Korsten-Reck U. The influence of graduated treadmill exercise on plasma catecholamines, aerobic and anaerobic capacity in boys and adults. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1981;47:301–11.
- [29] Rowland TW, Maresh CM, Charkoudian N, Vanderburgh PM, Castellani JW, Armstrong LE. Plasma norepinephrine responses to cycle exercise in boys and men. *Int J Sports Med* 1996;17:22–6.
- [30] Rotstein A, Dotan R, Bar-Or O, Tenenbaum G. Effect of training on anaerobic threshold, maximal aerobic power and anaerobic performance of preadolescent boys. *Int J Sports Med* 1986;7(5):281–6.
- [31] Grodjinovsky A, Inbar O, Dotan R, Bar-Or O. Training effect on the anaerobic performance of children as measured by the Wingate anaerobic test. In: Berg K, Eriksson BO, editors. *Children and exercise IX*. Baltimore: University Park Press; 1980. p. 139–45.
- [32] Ratel S. High-intensity and resistance training and elite young athletes. *Med Sport Sci* 2011;56:84–96.
- [33] Baquet G, Berthoin S, Dupont G, Blondel N, Fabre C, van Praagh E. Effects of high-intensity intermittent training on peak VO₂ in prepubertal children. *Int J Sports Med* 2002;23:439–44.
- [34] Bar-Or O. The young athlete: some physiological considerations. *J Sports Sci* 1995:31–3.