



Disponible en ligne sur

**ScienceDirect**  
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

**EM|consulte**  
www.em-consulte.com



REVUE GÉNÉRALE

# Les enfants sont-ils métaboliquement nés endurants ?

*Are children metabolically born enduring?*

S. Ratel

EA 3533, laboratoire des adaptations métaboliques à l'exercice en conditions physiologiques et pathologiques (AME2P), TSA 60026, Clermont université, université Blaise-Pascal, 63178 Aubière cedex, France

Reçu le 9 juin 2016 ; accepté le 23 septembre 2016

## MOTS CLÉS

Enfant ;  
Physiologie ;  
Exercice ;  
Métabolisme ;  
Croissance

## Résumé

**Objectifs.** – L'objectif de cette revue générale est d'apporter un éclairage sur le fonctionnement métabolique musculaire de l'enfant prépubère au cours de l'exercice.

**Actualités.** – Les enfants ont une plus faible capacité de travail que les adultes en raison de leur plus petite taille et de leur efficacité gestuelle plus faible. Toutefois, ils sont caractérisés par une capacité aérobie exceptionnelle qui les aide à récupérer plus vite et à moins se fatiguer au cours de l'exercice. En réalité, les enfants prépubères semblent métaboliquement nés comme des athlètes adultes bien entraînés en endurance. L'analyse comparative entre ces deux populations montre un phénotype musculaire similaire (typologie musculaire, activité enzymatique oxydative, densité mitochondriale, vitesse de récupération de la phosphocréatine et vitesse d'élimination des protons musculaires).

**Perspectives et projets.** – Cette analyse comparative entre les enfants prépubères, les adultes non entraînés et les athlètes adultes bien entraînés en endurance suggère que la capacité oxydative musculaire baisse de l'enfance à l'âge adulte et que l'entraînement en endurance pourrait être une alternative pour compenser cette baisse au cours de la croissance. Les physiologistes de l'exercice musculaire chez l'enfant doivent sans aucun doute poursuivre leurs recherches pour prévenir la baisse du potentiel oxydatif musculaire et les désordres métaboliques associés au cours de la croissance en proposant des programmes d'activités physiques adaptés aux jeunes populations.

**Conclusion.** – Les enfants prépubères sont métaboliquement nés endurants ; ils sont caractérisés par un profil oxydatif supérieur qui baisse au cours de la puberté et au début du stade adulte mais qui est comparable à celui d'athlètes adultes bien entraînés en endurance.

© 2016 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Adresse e-mail : [sebastien.ratel@univ-bpclermont.fr](mailto:sebastien.ratel@univ-bpclermont.fr)

<http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2016.09.002>

0765-1597/© 2016 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Pour citer cet article : Ratel S. Les enfants sont-ils métaboliquement nés endurants ? Sci sports (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2016.09.002>

**KEYWORDS**

Children;  
Physiology;  
Exercise;  
Metabolism;  
Growth

**Summary**

*Objectives.* – The objective of this review article is to provide insight into the contribution of oxidative processes to muscle energy production in prepubertal children.

*News.* – Children have a lower work capacity than adults because of their smaller body dimensions and their poorer mechanical (movement) efficiency. However, they are characterized by an exceptional aerobic system that helps them to recover faster and fatigue less during exercise. In fact, from a metabolic perspective, children appear to be born as well-trained adult endurance athletes. More specifically, prepubertal children could have a similar muscle phenotype as well-trained adult endurance athletes (muscle fiber type composition, oxidative enzyme activity, mitochondrial density, phosphocreatine recovery rate and pH recovery rate).

*Prospects and projects.* – Comparative analysis between prepubertal children, untrained adults and well-trained endurance adult athletes indicates that a decrease in muscle oxidative capacity may be typical during puberty and early adulthood, and that endurance-based training may be requisite to offset the decrement during this period. The pediatric exercise physiologists should undoubtedly focus their research upon the development of exercise-based strategies for the prevention of many metabolic diseases related to mitochondrial oxidative dysfunction during growth and maturation.

*Conclusion.* – Prepubertal children are metabolically born endurant; they are characterized by an exceptional aerobic capacity that decreases during puberty and early adulthood but is comparable to well-trained endurance adult athletes.

© 2016 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

**1. Introduction**

Les enfants prépubères (i.e. n'ayant pas encore développé les caractères sexuels secondaires) ne sont pas des adultes en miniature. Au cours de leur pratique sportive, ils choisissent de travailler spontanément de manière intermittente à une intensité plus proche de leur capacité maximale que les adultes [1]. Ainsi, les enfants prépubères tendent naturellement à se fatiguer plus rapidement. Par ailleurs, cette population « gaspille » beaucoup d'énergie lors de leur déplacement en raison de leur efficacité gestuelle plus faible ; ils sont donc moins « efficaces » que les adultes, notamment durant les tâches motrices complexes telles que la course à pied et le saut [2,3]. Cela s'explique, en partie, par le fait qu'ils ont une plus faible capacité à restituer l'énergie élastique emmagasiné par le système musculotendineux lors des cycles étirement-détente [3]. L'activité des muscles effecteurs du mouvement, i.e. les muscles agonistes, et leur activité métabolique s'en trouvent donc augmentées chez les enfants [2]. De plus, au cours de l'exercice, les enfants sur-activent les muscles freinateurs du mouvement, i.e. les muscles antagonistes [2], ce qui se traduit par une masse musculaire active (par rapport à leur masse corporelle) plus conséquente. Les enfants prépubères produisent également moins de puissance (exprimée en valeur absolue ou rapportée à la masse musculaire segmentaire) que les adultes [4]. Ils sont aussi caractérisés par une plus faible efficacité ventilatoire au cours de l'exercice, c'est-à-dire par un débit ventilatoire plus élevé pour exhaler une quantité donnée de gaz carbonique [5]. Par conséquent, les enfants prépubères produisent moins de travail que les adultes et semblent donc être moins aptes aux efforts physiques.

Toutefois, les enfants prépubères ont des capacités physiologiques exceptionnelles qui les aident à surpasser ces

difficultés ; ils ont, en particulier, un système énergétique aérobie unique (i.e. système principalement sollicité lors des efforts de longue durée). En effet, les enfants ont la même « cylindrée aérobie » que les adultes c'est-à-dire la même consommation maximale en O<sub>2</sub> rapportée à la masse corporelle (VO<sub>2max</sub> en mL·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>) [6]. De même, les réponses du système cardiovasculaire au cours de l'exercice maximal sont similaires entre les enfants de 10–11 ans et les adultes de moins de 30 ans. En effet, les deux populations ont des valeurs maximales équivalentes de fréquence cardiaque (FC<sub>max</sub> : 195 bpm), de débit cardiaque (Q<sub>max</sub> : 13,0 L·min<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup> surface corporelle), de volume d'éjection systolique (VES<sub>max</sub> : 70,0 mL·m<sup>-2</sup> surface corporelle) et de différence artério-veineuse en O<sub>2</sub> (12,0 mL·dL<sup>-1</sup>) [6]. Cependant, la capacité de production d'énergie anaérobie (i.e. énergie principalement utilisée au cours des efforts intenses de courte durée) augmente progressivement au cours de la croissance, probablement au moment de l'adolescence et durant le début du stade adulte [4]. Par conséquent, les enfants prépubères utilisent relativement plus le métabolisme aérobie que le métabolisme anaérobie pour reformer l'énergie au cours de l'exercice musculaire que les adolescents et les adultes.

Cependant, il est bien connu que les profils métaboliques diffèrent considérablement entre les athlètes adultes selon leur type d'entraînement. En effet, par rapport à celui des adultes non entraînés, le génotype métabolique des sprinters est plus anaérobie alors que celui des athlètes endurants est plus aérobie [7]. Cette cylindrée plus oxydative de l'athlète endurant se traduit particulièrement par une récupération plus rapide après l'exercice musculaire intense [8] et par une fatigue musculaire plus faible au cours de contractions musculaires maximales répétées [9]. Ces profils métaboliques et de fatigue sont également observés chez les enfants prépubères par rapport aux adultes non

entraînés [10]. Par conséquent, on peut se demander si les enfants prépubères sont métaboliquement comparables à des athlètes adultes bien entraînés en endurance.

L'objectif principal de cette revue générale sera donc d'apporter un éclairage sur la spécificité métabolique musculaire au cours de l'exercice chez l'enfant prépubère et de la comparer à celles d'adultes non entraînés et bien entraînés en endurance. Cette analyse comparative se fera sur la base des mesures mécaniques de puissance aérobie et anaérobie, des réponses cardio-respiratoires à l'exercice et des mesures musculaires *in vivo* et *in vitro*.

## 2. Comparaison entre les enfants prépubères, les adultes non entraînés et les athlètes adultes bien entraînés en endurance

### 2.1. Le rapport entre les puissances anaérobie et aérobie

Bien que les puissances maximales anaérobie ( $P_{max}$ ) et aérobie (PMA) absolues soient plus faibles chez les enfants prépubères par rapport aux adultes, il est maintenant bien démontré que le rapport entre ces deux puissances, calculé en normalisant  $P_{max}$  obtenue lors d'un test de Wingate (i.e. sprint de 30 s sur bicyclette) à la PMA mesurée lors d'un test maximal progressif, est significativement plus faible chez les enfants prépubères par rapport aux adultes non entraînés (~2,0 vs 2,6, respectivement) [11–15]. Toutefois, ce rapport n'est pas différent entre les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance [14,16,17]. En effet, Meeuwisse et al. [17] et Hostrup et al. [16] ont obtenu un rapport aux alentours de 2,0 chez des athlètes adultes bien entraînés en endurance de 24–25 ans qui avaient des valeurs de  $VO_{2max}$  comprises entre 60 et 70 mL·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>. Cela suggère que la capacité à réaliser un exercice anaérobie par rapport à un exercice aérobie augmente au cours de la croissance. Aussi, malgré une capacité de travail réduite, les enfants prépubères sollicitent les voies énergétiques aérobie et anaérobie de la même manière que les athlètes adultes bien entraînés en endurance.

### 2.2. Capacité d'endurance

Par ailleurs, par rapport à des adultes non entraînés, les enfants âgés de 6 à 15 ans courent plus vite pour une même contribution anaérobie (i.e. une lactatémie approximativement égale à 2,0 mmol·L<sup>-1</sup>) [18]. Cela dit, cette différence n'existe pas lorsque l'on compare les enfants et les adultes entraînés en endurance. Par ailleurs, il a été montré que le premier seuil ventilatoire 1 (SV1 ou « seuil d'adaptation ventilatoire ») est plus élevé chez les garçons de 5–6 ans par rapport à des hommes non entraînés de 17–18 ans (74,4 ± 6,0 vs 50,5 ± 7,5 % $VO_{2max}$ , respectivement) [19]. Or, aucune différence n'est observée entre les enfants prépubères et les adultes bien entraînés en endurance. En effet, Seiler et al. [20] ont rapporté un SV1 qui correspond à 77 ± 5 % $VO_{2max}$  chez 9 coureurs de 23 ans très bien entraînés en endurance qui avaient une  $VO_{2max}$  de 72 ± 5 mL·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>. Ces résultats montrent alors que la véritable capacité d'endurance (i.e. le temps d'endurance

à un pourcentage donné de  $VO_{2max}$ ) est supérieure chez les enfants prépubères par rapport aux adultes non entraînés mais qu'elle n'est pas différente entre les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance. Les résultats issus des vitesses d'adaptation du métabolisme aérobie à l'exercice sous-maximal supportent aussi la notion que le potentiel aérobie diminue au cours de la croissance mais qu'il est similaire entre les enfants prépubères et les athlètes adultes entraînés en endurance. En effet, certains auteurs ont montré que le temps d'atteinte de  $VO_2$  à l'état stable au début d'un exercice de pédalage à intensité constante (i.e. à 80 % du seuil ventilatoire) est significativement plus faible chez les enfants de 11–12 ans (constante de temps ou  $\tau$  : 19,0 ± 2,0 s) par rapport à des adultes non entraînés ( $\tau$  : 27,9 ± 8,6 s) [21]. Or, ce temps est comparable à celui de cyclistes adultes bien entraînés en endurance de 21,4 ans qui avaient une  $VO_{2max}$  moyenne de 59,5 ± 4,0 mL·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup> ( $\tau$  : 20,9 ± 8,9 s d'après Cleuziou et al. [22]).

Ainsi, dans l'ensemble, ces résultats montrent que :

- la contribution relative du métabolisme aérobie au cours de l'exercice maximal ;
- la capacité de travail (e.g. la vitesse de course) pour une contribution anaérobie donnée ;
- la vitesse d'adaptation du métabolisme aérobie en réponse à l'exercice sous-maximal diminuent au cours de la croissance.

Toutefois, tous ces paramètres restent indifférenciés entre les enfants prépubères et les adultes entraînés en endurance. Sur le plan métabolique, de fortes analogies peuvent donc être faites entre les enfants prépubères et les adultes bien entraînés en endurance.

### 2.3. Les mesures musculaires *in vivo* et *in vitro*

On pourrait tirer les mêmes conclusions à partir des données provenant des mesures musculaires *in vivo* et *in vitro*. En effet, les enfants prépubères présentent un potentiel aérobie musculaire plus élevé que les adultes de 18–30 ans [23–25]. Cela est démontré chez les enfants par un pourcentage plus élevé de fibres lentes [26], une activité enzymatique oxydative supérieure [27], une densité mitochondriale plus importante [28,29], une resynthèse plus rapide de la phosphocréatine (PCr) musculaire [23–25] et une élimination plus rapide des produits métaboliques (i.e. les ions H<sup>+</sup>) après l'exercice [23,25]. Ces résultats semblent concluants malgré le faible nombre d'enfants testés dans les études, notamment dans celles utilisant la technique de la biopsie musculaire. Ce profil oxydatif musculaire supérieur est également le cas chez les athlètes adultes bien entraînés en endurance par rapport aux adultes non entraînés. Ainsi, le profil oxydatif musculaire des athlètes adultes endurants pourrait être similaire à celui des enfants prépubères.

#### 2.3.1. La typologie musculaire

Par rapport à la typologie musculaire, il a été montré dans un des chefs du quadriceps (le *vastus lateralis*) que le pourcentage de fibres lentes est plus élevé chez les coureurs de moyenne et longue distance (67 ± 10 %) par rapport à des

lutteurs gréco-romains ( $47 \pm 14$  %), des haltérophiles ( $44 \pm 7$  %), des étudiants en éducation physique ( $43 \pm 9$  %) et des kayakistes ( $41 \pm 10$  %) [30]. Cela dit, le pourcentage de fibres lentes rapporté chez les coureurs adultes entraînés en endurance est comparable à ceux trouvés par Lexell et al. [26] dans le *vastus lateralis* de 4 enfants âgés entre 5 et 13 ans (valeurs individuelles : 63, 65, 67 et 69 %). Ce résultat est soutenu par le rapport PCr/phosphate inorganique ( $P_i$ ) de repos qui est un bon indicateur de la typologie musculaire. En effet, lorsque le rapport PCr/ $P_i$  est faible, le pourcentage de fibres lentes est élevé [31]. Or, il a été montré par rapport à des adultes non entraînés que le ratio PCr/ $P_i$  est 35 % plus faible chez les coureurs adultes de longue distance [32] et 28 % plus faible chez les enfants prépubères [23]. Par conséquent, de telles données indiquent que le pourcentage de fibres lentes pourrait être similaire entre les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance mais qu'il pourrait être plus élevé chez les enfants par rapport aux adultes non entraînés.

### 2.3.2. L'activité enzymatique oxydative

Certains auteurs ont aussi montré que l'activité de certaines enzymes oxydatives telles que la succinate déshydrogénase (SDH), est plus élevée chez les coureurs adultes très bien entraînés en endurance qui avaient une  $VO_{2max}$  moyenne de  $72,4 \pm 4,0$  mL·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup> ( $6,4 \pm 0,5$  μmol·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup>) par rapport à des haltérophiles ( $3,0 \pm 0,3$  μmol·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup>) et des adultes non entraînés ( $4,3 \pm 0,6$  μmol·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup>) [33]. Or, sous des conditions expérimentales strictement identiques, ces mêmes auteurs ont rapporté une activité enzymatique supérieure de la SDH dans un groupe de 5 garçons prépubères ( $5,4 \pm 0,4$  μmol·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup>) par rapport à des adultes non entraînés [33], et des valeurs équivalentes entre certains garçons prépubères de 11 ans (valeur maximale :  $6,3$  μmol·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> [34]) et des athlètes adultes bien entraînés en endurance. De plus, ces mêmes chercheurs ont trouvé qu'un entraînement par intervalles de 6 semaines était suffisant pour augmenter l'activité enzymatique de la SDH de  $5,4 \pm 0,4$  à  $7,0 \pm 0,4$  μmol·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> dans un groupe de 5 garçons de 11 ans [34], ce qui suggère que les enfants prépubères modérément entraînés en endurance pourraient présenter une activité enzymatique aérobie plus élevée que leurs homologues plus âgés très bien entraînés. Toutefois, il est difficile de faire la même analogie entre les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance à partir d'autres activités enzymatiques oxydatives (i.e. citrate synthase, malate déshydrogénase, fumarase, etc.) puisque les conditions expérimentales pour analyser l'activité enzymatique (i.e. température musculaire, équipement utilisé, etc.) sont différentes entre les études, et que celles qui utilisent les biopsies musculaires sont particulièrement limitées chez les enfants pour des raisons d'éthique et de méthodologie.

### 2.3.3. La densité mitochondriale

Par ailleurs, l'analyse morphométrique du muscle squelettique indique que la densité mitochondriale (i.e. la densité « des centrales énergétiques oxydatives ») est plus élevée chez les athlètes adultes entraînés en endurance par rapport à des adultes non entraînés [29]. En effet, certains chercheurs ont rapporté une densité

mitochondriale supérieure dans le *vastus lateralis* de 9 jeunes hommes de 27,6 ans qui avaient une  $VO_{2max}$  moyenne de  $61,3 \pm 5,6$  mL·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup> par rapport à 3 femmes sédentaires de 24,8 ans ( $5,9$  vs  $4,1$  %, respectivement) [29]. Cette différence pourrait même être plus élevée par rapport à des athlètes adultes très bien entraînés en endurance. En effet, Hoppeler et al. [29] ont rapporté une densité mitochondriale de 8,6 % chez 5 athlètes adultes de 25,3 ans spécialisés en course d'orientation qui avaient une  $VO_{2max}$  moyenne de  $76,1 \pm 5,0$  mL·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>. Malheureusement, à ce jour, il n'existe que très peu d'information sur la densité mitochondriale du muscle squelettique des enfants. À ma connaissance, seuls Bell et al. [28] ont rapporté une densité mitochondriale de 5,5 % dans le *vastus lateralis* de 7 filles et 5 garçons de 6 ans qui avaient une  $VO_{2max}$  moyenne de  $45,2$  mL·min<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>. Toutefois, cette valeur moyenne indique que la densité mitochondriale dans le *vastus lateralis* diminue de l'enfance à l'âge adulte et qu'elle pourrait être équivalente ou plus faible chez les enfants prépubères par rapport aux athlètes adultes entraînés en endurance selon leur niveau d'entraînement.

### 2.3.4. La vitesse de resynthèse de la phosphocréatine

La typologie musculaire, l'activité enzymatique aérobie et la densité mitochondriale pourraient aussi influencer la vitesse de resynthèse des substrats énergétiques après l'exercice. En effet, en utilisant la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire du phosphore 31 au niveau des fléchisseurs plantaires, certaines études [35] ont rapporté des vitesses de resynthèse de PCr environ deux fois plus rapides chez des coureurs de demi-fond bien entraînés (temps nécessaire pour reconstituer 50 % des réserves initiales ou  $t_{1/2}$  :  $12,5 \pm 1,5$  s) par rapport à des adultes non entraînés ( $t_{1/2}$  :  $26,4 \pm 2,8$  s). La vitesse de récupération de PCr au niveau des fléchisseurs plantaires est également deux fois plus rapide chez les enfants de 6–12 ans ( $t_{1/2}$  :  $12 \pm 4$  s) par rapport à des adultes non entraînés de 20–29 ans ( $t_{1/2}$  :  $27 \pm 8$  s) et presque trois fois plus rapide par rapport à des seniors de 70–83 ans ( $t_{1/2}$  :  $32 \pm 11$  s) [24]. D'ailleurs, en comparant ces études, il est intéressant de noter que les temps de récupération de PCr sont presque identiques entre les enfants prépubères et les adultes entraînés en endurance de moins de 30 ans. Cette vitesse de resynthèse de PCr environ deux fois plus rapide chez les enfants prépubères par rapport aux jeunes adultes non entraînés a aussi été rapportée au niveau des extenseurs du genou et des fléchisseurs des doigts [25,36] ce qui démontre que la différence entre enfant et adulte sur ce paramètre n'est pas tributaire du groupe musculaire étudié, qu'il soit positionné au niveau des membres supérieurs ou inférieurs. Ces données montrent donc que le potentiel aérobie du muscle squelettique est le plus élevé au moment de l'enfance, qu'il baisse durant la phase pubertaire mais qu'il pourrait être similaire entre les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance.

### 2.3.5. La vitesse d'élimination des protons

Enfin, la typologie musculaire, l'activité enzymatique oxydative et la densité mitochondriale pourraient aussi influencer l'élimination des produits métaboliques après l'exercice. En effet, la vitesse de récupération du pH

musculaire vers son état initial est plus rapide chez les athlètes adultes très bien entraînés en endurance par rapport à des adultes non entraînés [37]. Par exemple, Hug et al. [37] ont montré que l'efflux cellulaire de protons, qui décrit la vitesse d'élimination des protons du muscle squelettique, est environ trois fois plus rapide après un exercice maximal progressif dans les muscles de la cuisse de cyclistes professionnels sur route de 24 ans qui avaient une  $VO_{2max}$  moyenne de  $74,6 \pm 5,1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $32,8 \pm 18,9 \text{ mM} \cdot \text{min}^{-1}$ ) par rapport à des adultes modérément actifs du même âge ( $10,3 \pm 6,7 \text{ mM} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Cela est également observé chez les enfants prépubères par rapport aux adultes non entraînés [23,25]. En effet, à la suite d'un exercice de flexions des doigts de 3 min, Ratel et al. [23] ont rapporté une vitesse de restauration du pH environ trois fois plus rapide chez 7 garçons prépubères par rapport à 10 hommes non entraînés ( $9,7 \pm 6,9$  vs  $3,5 \pm 2,7 \text{ mM} \cdot \text{unité pH}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ , respectivement). Par conséquent, les vitesses de récupération du pH musculaire semblent similaires entre les athlètes adultes très bien entraînés en endurance et les enfants prépubères. Aussi, ces deux populations semblent avoir de meilleures capacités à éliminer les protons musculaires à la suite de l'exercice que les adultes non entraînés.

Ainsi, l'ensemble de ces données suggère que la contribution relative du métabolisme aérobie au cours de l'exercice baisse de l'enfance à l'âge adulte mais que l'entraînement en endurance chez le jeune adulte de moins de 30 ans permet de compenser cette baisse. Les causes de cette contribution supérieure du métabolisme aérobie au cours de l'exercice chez les enfants prépubères restent encore inexplicables. Nous ne savons pas encore si cela est lié au fait que les enfants n'aient pas encore le matériel enzymatique pour restaurer l'énergie à partir des voies anaérobies ou s'ils n'aient pas encore la nécessité de solliciter véritablement les voies anaérobies en raison de leur métabolisme aérobie déjà bien développé. Toutefois, la contribution supérieure du métabolisme aérobie chez les enfants prépubères pourrait être liée à leurs plus faibles dimensions corporelles, comme cela est observé chez les petits animaux [38]. En effet, dans ces conditions, les distances de circulation sanguine sont plus courtes et les échanges de gaz entre les compartiments pulmonaires et musculaires s'en trouvent accélérés [39]. Par ailleurs, l'activité des enzymes du métabolisme anaérobie lactique semble s'améliorer chez les mammifères lorsque leurs dimensions corporelles augmentent [38]. Cela est soutenu par les travaux de l'équipe de Bengt Saltin qui ont montré une plus faible activité de la phosphofructokinase, i.e. enzyme clé du métabolisme anaérobie lactique, chez des garçons prépubères par rapport à des adultes entraînés et non entraînés [33,34]. Cela dit, étant donné que les athlètes adultes bien entraînés en endurance sont à pleine maturité biologique et qu'ils ne sont plus exposés au processus de croissance, il est raisonnable de croire que leur plus forte contribution aérobie au cours de l'exercice puisse être principalement expliquée par leur entraînement aérobie spécifique et/ou par leur génotype, et moins par leurs dimensions corporelles.

Autrement, il pourrait être admis que la plus forte capacité oxydative musculaire chez les enfants prépubères soit attribuée à leur activité physique supérieure par rapport à celle des adultes. Toutefois, le niveau d'activité physique semble avoir été relativement bien contrôlé dans les

études citées précédemment puisque les enfants n'étaient pas engagés dans un programme d'entraînement spécifique de type aérobie ou impliqués dans un programme d'entraînement à visée compétitive. De plus, il a été montré que la contribution du métabolisme aérobie au cours de l'exercice est supérieure chez les enfants prépubères avec les fléchisseurs des doigts qui ne semblent pas être plus spécifiquement sollicités chez les enfants par rapport aux adultes non entraînés [23].

## 2.4. La fatigue musculaire

Sur un plan plus pratique, en raison d'un profil métabolique plus aérobie qu'anaérobie, les enfants prépubères se fatiguent plus faiblement que les adultes non entraînés au cours de séries de sprints sur bicyclette [40] ou en course à pied [41] ou lors de contractions musculaires maximales répétées [10]. Par exemple, au cours d'une répétition de deux sprints de 30 s sur bicyclette séparés par une récupération passive de 1 min, Hebestreit et al. [40] ont montré que la puissance musculaire baisse plus faiblement chez les garçons de 9–12 ans (–11 %) par rapport à des hommes de 19–23 ans (–29 %). Toutefois, cette différence n'existe pas lorsque l'on compare des enfants prépubères et des athlètes adultes très bien entraînés en endurance. En effet, sous des conditions expérimentales identiques, les cyclistes professionnels sur route de niveaux national et Olympique diminuent leur puissance musculaire de 13 % [42] comme les enfants prépubères [40]. De la même façon, le niveau de fatigue, calculé à partir de la baisse de puissance au cours d'un test de Wingate, est comparable entre les enfants prépubères (–44 % [40]) et les cyclistes professionnels sur route (–43 % [42]), mais il est plus faible par rapport à des adultes non entraînés (–52 % [40]) et des adultes entraînés en sprint (–61 % [43]). En fait, il existe un consensus que les enfants prépubères se fatiguent moins au niveau musculaire que les adultes non entraînés durant des contractions musculaires maximales répétées [10], ce qui est également le cas lorsque l'on compare des cyclistes et des triathlètes bien entraînés en endurance par rapport à des athlètes s'entraînant plutôt en puissance [9]. De même, il est possible que la fatigue musculaire soit plus faible chez les athlètes adultes entraînés en endurance par rapport à des adultes non entraînés mais cela reste à confirmer. Cette contribution supérieure du métabolisme aérobie au cours de l'exercice chez les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance pourrait être associée à une plus faible sollicitation des métabolismes anaérobies et donc à une moindre accumulation de produits métaboliques (i.e. ions  $H^+$  et phosphate inorganique) et une plus faible dégradation de la phosphocréatine au cours de l'exercice par rapport à leurs homologues plus âgés et non entraînés [35,44]. Plus spécifiquement, ce plus faible déséquilibre de l'homéostasie (i.e. l'équilibre du milieu intérieur de l'organisme) au cours de l'exercice chez l'enfant prépubère et l'adulte endurant pourrait se traduire par une plus faible altération des processus contractiles et du couplage excitation-contraction au niveau du muscle squelettique [45]. Ce phénomène peut donc conduire à une plus faible fatigue musculaire, comme cela est observé chez les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance.

## 2.5. Récupération de la fréquence cardiaque et de la VO<sub>2</sub>

Comme chez les athlètes adultes entraînés en endurance [46], les enfants prépubères sont caractérisés par une récupération plus rapide de la VO<sub>2</sub> et de la fréquence cardiaque par rapport aux adultes non entraînés [40]. La plus forte réactivation parasympathique du système nerveux autonome après l'exercice semble être le dénominateur commun de la récupération plus rapide de la fréquence cardiaque chez les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance [47,48]. Par ailleurs, la récupération plus rapide de la VO<sub>2</sub> chez les enfants prépubères pourrait être attribuée à leur plus petite taille. En effet, cela pourrait expliquer les temps de transit circulatoire plus courts [39] et les échanges de gaz plus rapides entre les sites pulmonaires et musculaires. Une autre alternative qui pourrait s'appliquer à la fois aux enfants prépubères et aux athlètes adultes bien entraînés en endurance est le moindre déficit en O<sub>2</sub> au début de l'exercice qui se traduit après l'exercice par une consommation réduite en O<sub>2</sub> et donc par un plus faible remboursement de la dette en O<sub>2</sub> [46,49]. Cette dynamique cardio-respiratoire pourrait en partie expliquer la moindre fatigabilité des enfants prépubères et des athlètes adultes entraînés en endurance par rapport à leurs homologues plus âgés et non entraînés.

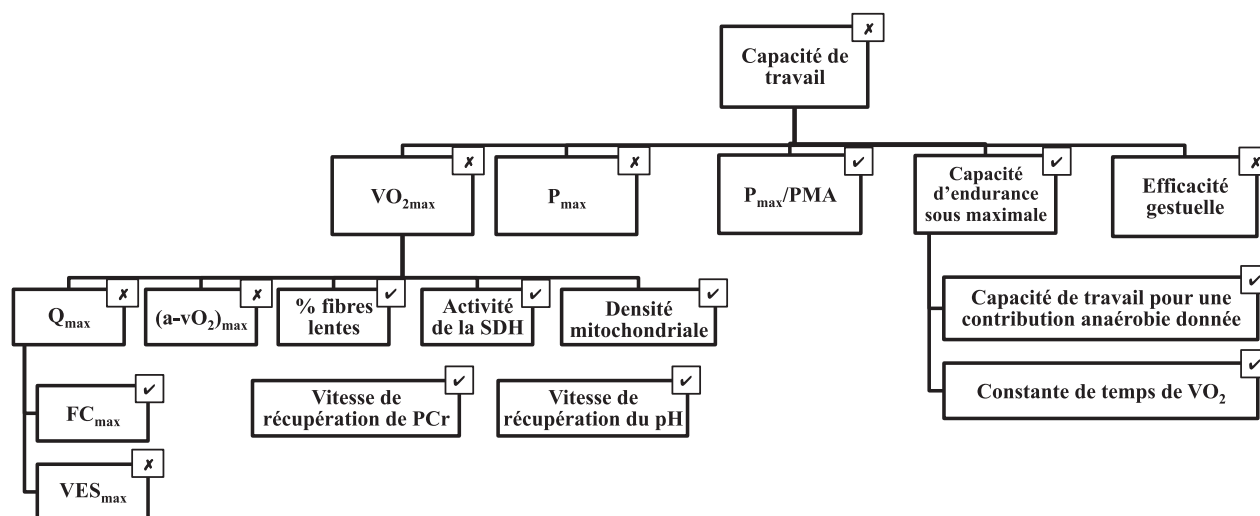
## 3. Conclusion

Bien que les enfants prépubères aient une plus faible capacité de travail que les adultes en raison de leur dimension corporelle plus petite et de leur efficacité gestuelle plus faible, ils semblent caractérisés par une capacité oxydative musculaire exceptionnelle qui leur permet de mieux

récupérer et d'être plus résistants à la fatigue. En réalité, les enfants prépubères apparaissent métaboliquement nés comme des athlètes adultes bien entraînés en endurance (Fig. 1). Cela dit, les enfants prépubères dépendent plus du métabolisme aérobie que du métabolisme anaérobie au cours de l'exercice que les adultes non entraînés. Ce constat suggère que la contribution du métabolisme aérobie au cours de l'exercice diminue au moment de la puberté et au début du stade adulte [36] et qu'au cours de cette période, l'entraînement en endurance pourrait être une façon de compenser cette baisse.

Sur le plan clinique, ces résultats montrent qu'il est nécessaire de proposer des programmes d'activités physiques pour prévenir et traiter de nombreux désordres métaboliques liés à un dysfonctionnement de la fonction mitochondriale oxydative (e.g. chez les patients diabétiques, insulino-résistants et obèses), qui sont souvent associés à un déconditionnement musculaire chez l'adolescent et l'adulte [50] mais dont la prévalence est plus faible chez l'enfant prépubère [51]. Les programmes d'activités physiques à préconiser durant cette période de déconditionnement aérobie pourraient être orientés sur un travail continu à intensité modérée [52], ou bien sur des exercices de type intermittent court, i.e. répéter des séries de courses de 10 s entrecoupées de pauses passives de 10 s à une intensité comprise entre 100 et 130 % de la vitesse maximale aérobie [53].

Sur le plan sportif, l'entraînement en endurance pourrait ne pas être une priorité chez les enfants prépubères qui ont pour objectif d'améliorer leur performance. D'autres stratégies pourraient être utilisées avant la période pubertaire comme travailler les gestions d'allure, augmenter la capacité anaérobie et améliorer la technique pour augmenter l'efficacité gestuelle et réduire le coût métabolique de l'activité.



**Figure 1** Illustration schématique des différences et des similitudes physiologiques entre les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance. VO<sub>2max</sub> : consommation maximale en O<sub>2</sub> ; PMA : puissance maximale aérobie ; P<sub>max</sub> : puissance maximale anaérobie ; FC<sub>max</sub> : fréquence cardiaque maximale ; Q<sub>max</sub> : débit cardiaque maximal ; VES<sub>max</sub> : volume d'éjection systolique maximal ; (a-VO<sub>2</sub>)<sub>max</sub> : différence artério-veineuse en O<sub>2</sub> maximale ; PCr : phosphocréatine ; SDH : succinate déshydrogénase ; constante de temps de VO<sub>2</sub> : constante reflétant la vitesse d'adaptation du métabolisme aérobie au cours de l'exercice à intensité constante ; ✓ : similaire entre les enfants prépubères et les athlètes adultes bien entraînés en endurance ; X : plus faible chez les enfants prépubères par rapport aux athlètes adultes bien entraînés en endurance.

Enfin, en termes de perspectives de recherche, il serait nécessaire de conduire des études comparatives sur le fonctionnement métabolique musculaire *in vivo* (i.e. en utilisant la spectroscopie de résonance magnétique du phosphore 31) entre les enfants prépubères, pubères, les adultes non entraînés et entraînés en endurance afin de (i) mieux analyser les effets délétères de la croissance et de la maturation sur le fonctionnement oxydatif du muscle squelettique et (ii) appréhender les effets de l'entraînement en endurance sur la baisse de ce potentiel oxydatif au cours de la croissance. Des études longitudinales sur l'évolution de l'activité métabolique musculaire au cours de la croissance combinée ou non avec de l'entraînement en endurance pourraient constituer une autre alternative mais elles restent plus difficiles à réaliser en raison des problèmes de compliance des participants.

## Déclaration de liens d'intérêts

L'auteur déclare ne pas avoir de liens d'intérêts.

## Références

- [1] Bailey RC, Olson J, Pepper SL, Porszasz J, Barstow TJ, Cooper DM. The level and tempo of children's physical activities: an observational study. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27:1033–41.
- [2] Frost G, Dowling J, Dyson K, Bar-Or O. Cocontraction in three age groups of children during treadmill locomotion. *J Electromyogr Kinesiol* 1997;7:179–86.
- [3] Moritani T, Oddsson L, Thorstensson A, Astrand PO. Neural and biomechanical differences between men and young boys during a variety of motor tasks. *Acta Physiol Scand* 1989;137:347–55.
- [4] Van Praagh E, Dore E. Short-term muscle power during growth and maturation. *Sports Med* 2002;32:701–28.
- [5] Cooper DM, Kaplan MR, Baumgarten L, Weiler-Ravell D, Whipp BJ, Wasserman K. Coupling of ventilation and CO<sub>2</sub> production during exercise in children. *Pediatr Res* 1987;21:568–72.
- [6] Vinet A, Nottin S, Lecoq AM, Obert P. Cardiovascular responses to progressive cycle exercise in healthy children and adults. *Int J Sports Med* 2002;23:242–6.
- [7] Pesta D, Paschke V, Hoppel F, Kobel C, Kremser C, Esterhammer R, et al. Different metabolic responses during incremental exercise assessed by localized 31P MRS in sprint and endurance athletes and untrained individuals. *Int J Sports Med* 2013;34:669–75.
- [8] Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK, Nevill AM. Recovery of power output and muscle metabolites following 30s of maximal sprint cycling in man. *J Physiol* 1995;482(Pt 2):467–80.
- [9] Garrandes F, Colson SS, Pensini M, Seynnes O, Legros P. Neuromuscular fatigue profile in endurance-trained and power-trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:149–58.
- [10] Ratel S, Kluka V, Vicencio SG, Jegu AG, Cardenoux C, Morio C, et al. Insights into the mechanisms of neuromuscular fatigue in boys and men. *Med Sci Sports Exerc* 2015;47:2319–28.
- [11] Astorino TA, White AC. Assessment of anaerobic power to verify VO<sub>2</sub>max attainment. *Clin Physiol Funct Imaging* 2010;30:294–300.
- [12] Bell W, Cooper SM, Cobner D, Longville J. Physiological changes arising from a training programme in under-21 international netball players. *Ergonomics* 1994;37:149–57.
- [13] MacDougall JD, Hicks AL, MacDonald JR, McKelvie RS, Green HJ, Smith KM. Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training. *J Appl Physiol* 1998;84:2138–42.
- [14] Rivera-Brown AM, Alvarez M, Rodriguez-Santana JR, Benetti PJ. Anaerobic power and achievement of VO<sub>2</sub> plateau in pre-pubertal boys. *Int J Sports Med* 2001;22:111–5.
- [15] 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 Meds* 1986;7:281–6.
- [16] Hostrup M, Kalsen A, Auchenberg M, Bangsbo J, Backer V. Effects of acute and 2-week administration of oral salbutamol on exercise performance and muscle strength in athletes. *Scand J Med Sci Sports* 2016;26:8–16.
- [17] Meeuwisse WH, McKenzie DC, Hopkins SR, Road JD. The effect of salbutamol on performance in elite nonasthmatic athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:1161–6.
- [18] Tanaka H, Shindo M. Running velocity at blood lactate threshold of boys aged 6–15 years compared with untrained and trained young males. *Int J Sports Med* 1985;6:90–4.
- [19] Reybrouck T, Weymans M, Stijns H, Knops J, van der Hauwaert L. Ventilatory anaerobic threshold in healthy children. Age and sex differences. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1985;54:278–84.
- [20] Seiler S, Haugen O, Kuffel E. Autonomic recovery after exercise in trained athletes: intensity and duration effects. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:1366–73.
- [21] Fawcner SG, Armstrong N, Potter CR, Welsman JR. Oxygen uptake kinetics in children and adults after the onset of moderate-intensity exercise. *J Sports Sci* 2002;20:319–26.
- [22] Cleuziou C, Perrey S, Borrani F, Lecoq AM, Candau R, Courteix D, et al. Dynamic responses of O<sub>2</sub> uptake at the onset and end of exercise in trained subjects. *Can J Appl Physiol* 2003;28:630–41.
- [23] 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.
- [24] Taylor DJ, Kemp GJ, Thompson CH, Radda GK. Ageing: effects on oxidative function of skeletal muscle *in vivo*. *Mol Cell Biochem* 1997;174:321–4.
- [25] 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.
- [26] Lexell J, Sjöström M, Nordlund AS, Taylor CC. Growth and development of human muscle: a quantitative morphological study of whole vastus lateralis from childhood to adult age. *Muscle Nerve* 1992;15:404–9.
- [27] Berg A, Keul J. Biochemical changes during exercise in children. In: Malina R, editor. *Young athletes/biological, psychological and educational perspectives*. Champaign (IL): Human Kinetics; 1988. p. 61–77.
- [28] Bell RD, MacDougall JD, Billeter R, Howald H. Muscle fiber types and morphometric analysis of skeletal muscle in six-year-old children. *Med Sci Sports Exerc* 1980;12:28–31.
- [29] Hoppeler H, Luthi P, Claassen H, Weibel ER, Howald H. The ultrastructure of the normal human skeletal muscle. A morphometric analysis on untrained men, women and well-trained orienteers. *Pflugers Arch* 1973;344:217–32.
- [30] Tesch PA, Karlsson J. Muscle fiber types and size in trained and untrained muscles of elite athletes. *J Appl Physiol* 1985;59:1716–20.
- [31] Vandeborne K, Walter G, Ploutz-Snyder L, Staron R, Fry A, De Meirleir K, et al. Energy-rich phosphates in slow and fast human skeletal muscle. *Am J Physiol* 1995;268:C869–76.
- [32] Bernus G, Gonzalez de Suso JM, Alonso J, Martin PA, Prat JA, Arus C. 31P-MRS of quadriceps reveals quantitative differences between sprinters and long-distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1993;25:479–84.
- [33] Gollnick PD, Armstrong RB, Saubert CWT, Piehl K, Saltin B. Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle

- of untrained and trained men. *J Appl Physiol* 1972;33:312–9.
- [34] 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.
- [35] Johansen L, Quistorff B. 31P-MRS characterization of sprint and endurance trained athletes. *Int J Sports Med* 2003;24:183–9.
- [36] Fleischman A, Makimura H, Stanley TL, McCarthy MA, Kron M, Sun N, et al. Skeletal muscle phosphocreatine recovery after submaximal exercise in children and young and middle-aged adults. *J Clin Endocrinol Metab* 2010;95:E69–74.
- [37] Hug F, Bendahan D, Le Fur Y, Cozzone PJ, Grelot L. Metabolic recovery in professional road cyclists: a 31P-MRS study. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37:846–52.
- [38] Emmett B, Hochachka PW. Scaling of oxidative and glycolytic enzymes in mammals. *Respir Physiol* 1981;45:261–72.
- [39] Cumming GR. Recirculation times in exercising children. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1978;45:1005–8.
- [40] 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.
- [41] Ratel S, Williams CA, Oliver J, Armstrong N. Effects of age and mode of exercise on power output profiles during repeated sprints. *Eur J Appl Physiol* 2004;92:204–10.
- [42] Harbili S. The effect of different recovery duration on repeated anaerobic performance in elite cyclists. *J Hum Kinet* 2015;49:171–8.
- [43] Berger NJ, Jones AM. Pulmonary O<sub>2</sub> uptake on-kinetics in sprint- and endurance-trained athletes. *Appl Physiol Nutr Metab* 2007;32:383–93.
- [44] Kappenstein J, Ferrauti A, Runkel B, Fernandez-Fernandez J, Muller K, Zange J. Changes in phosphocreatine concentration of skeletal muscle during high-intensity intermittent exercise in children and adults. *Eur J Appl Physiol* 2013;113:2769–79.
- [45] Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev* 2008;88:287–332.
- [46] Short KR, Sedlock DA. Excess postexercise oxygen consumption and recovery rate in trained and untrained subjects. *J Appl Physiol* 1997;83:153–9.
- [47] 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.
- [48] Dixon EM, Kamath MV, McCartney N, Fallen EL. Neural regulation of heart rate variability in endurance athletes and sedentary controls. *Cardiovasc Res* 1992;26:713–9.
- [49] Armon Y, Cooper DM, Flores R, Zanconato S, Barstow TJ. Oxygen uptake dynamics during high-intensity exercise in children and adults. *J Appl Physiol* 1991;70:841–8.
- [50] Eisenmann JC. Aerobic fitness, fatness and the metabolic syndrome in children and adolescents. *Acta Paediatr* 2007;96:1723–9.
- [51] Moran A, Jacobs Jr DR, Steinberger J, Hong CP, Prineas R, Luepker R, et al. Insulin resistance during puberty: results from clamp studies in 357 children. *Diabetes* 1999;48:2039–44.
- [52] Brandou F, Savy-Pacaux AM, Marie J, Bauloz M, Maret-Fleuret I, Borrocoso S, et al. Impact of high- and low-intensity targeted exercise training on the type of substrate utilization in obese boys submitted to a hypocaloric diet. *Diabetes Metab* 2005;31:327–35.
- [53] Ratel S, Lazaar N, Dore E, Baquet G, Williams CA, Berthoin S, et al. High-intensity intermittent activities at school: controversies and facts. *J Sports Med Phys Fitness* 2004;44:272–80.