Nutrition et sport au cours de l'enfance et de l'adolescence: satisfaire les demandes métaboliques liées à la croissance et à l'exercice physique

C.L. Zanker

Carnegie Faculty of Sport and Education, Leeds Metropolitan University, Leeds, Royaume-Uni

Mots-clés

Exercice, nutrition • Croissance/puberté, nutrition et sport • Performances physiques • Métabolisme énergétique

Résumé

Au cours de l'enfance et de l'adolescence, les principaux objectifs sont une croissance et une maturation optimales. Ces processus développementaux demandent un bilan énergétique et azoté positif. Une activité physique régulière peut améliorer le développement de l'enfant et de l'adolescent mais un entraînement physique très intensif peut réduire les stocks d'énergie et d'azote de l'organisme, qui doivent être tous deux reconstitués par l'alimentation. Les adolescents physiquement actifs sont sensibles aux troubles de l'alimentation, ce qui peut aboutir à une malnutrition protéino-énergétique. Les conséquences d'un bilan énergétique et azoté négatif incluent un délai, un retard ou un arrêt de la croissance et de la maturation pubertaire. Actuellement, quelques rares données suggèrent qu'un entraînement physique a un impact négatif direct sur la croissance et la maturation. Une alimentation bien équilibrée est essentielle pour l'entretien des performances physiques et la préservation de la santé chez tous les sujets physiquement actifs, quel que soit leur âge. Les aliments apportent les éléments chimiques nécessaires à la production d'énergie par exercice des muscles squelettiques, au réapprovisionnement des stocks d'énergie après l'exercice et à la régénérescence des muscles endommagés. Les besoins alimentaires des enfants physiquement actifs se modifient avec la croissance et la progression de la puberté. Le degré de maturité est un important

déterminant des réponses métaboliques et physiologiques à l'exercice et influence ainsi tant les capacités de performances physiques que les besoins alimentaires. Des études du métabolisme énergétique chez les enfants suggèrent que ces derniers sont bien équipés pour une activité aérobie soutenue, mais que leur capacité de performance anaérobie est limitée par leur degré de maturité. Il est important de noter que des limitations éthiques s'opposent au type de recherches détaillées et invasives qui ont identifié les besoins nutritionnels des adultes physiquement actifs. Néanmoins, il semblerait que, comme ces adultes, les enfants physiquement actifs ont des besoins alimentaires plus élevés pour l'énergie, les glucides, les protéines et l'eau que leurs homologues sédentaires. Le présent article justifie les besoins nutritionnels des enfants sportifs sur la base des besoins physiologiques et métaboliques nécessaires à la survie, à la croissance et à l'activité physique.

Copyright © 2006 Nestec Ltd., Vevey/S. Karger AG, Basel

Introduction

L'enfance et l'adolescence représentent une phase de croissance importante et de maturation physique. Ces processus dépendent d'une activité physique régulière et d'une nutrition saine. C'est également pendant l'enfance et l'adolescence que la personnalité se développe et que les talents émergent. Ces talents incluent l'aptitude sportive et des compétences dans divers sports. Un entraînement physique soigneusement structuré, associé à une alimentation bien équilibrée, peut favoriser les performances sportives des en-

fants et adolescents et préparer le corps à des compétitions futures.

Avant la puberté, les performances physiques des garçons et des filles sont très similaires. Cependant, tandis que la puberté progresse, une différence significative entre les adolescents des deux sexes devient apparente [1, 2]. Chez les garçons comme chez les filles, l'entraînement physique renforce les accroissements pubertaires normaux de la taille des muscles, de la force, ainsi que de la puissance aérobie et anaérobie, qui sont tous d'importants déterminants des performances physiques. Néanmoins, chez les filles, le développement de ces caractéristiques physiologiques et de ces performances sur toute la durée de l'adolescence est beaucoup moins marqué que chez les garçons, et une accumulation significative de tissus adipeux chez les filles peut altérer leurs aptitudes sportives [1, 3]. Un entraînement intensif et un faible poids corporel ont été associés à une dysfonction neuroendocrinienne, à une inhibition gonadique et à une multitude de perturbations endocrines qui rompent l'équilibre normal du renouvellement osseux [4, 5]. Les conséquences de ces troubles incluent une sidération de la croissance, un retard ou un arrêt de la puberté et une inadéquation de la formation osseuse, des facteurs pouvant tous altérer la santé actuelle et future [1, 3].

Il est important de noter que des données convaincantes montrent que des troubles endocriniens et le déséquilibre du métabolisme osseux chez les jeunes sportifs sont largement imputables à une insuffisance nutritionnelle primaire exacerbée par le coût énergétique surajouté de l'entraînement physique plutôt que par ce dernier lui-même [6, 7]. Sur la base de ces données, il est essentiel que les enfants et adolescents s'engageant dans des activités sportives intensives aient une alimentation répondant de façon adéquate aux besoins nutritionnels liés à leur entraînement physique comme à leur croissance normale. Le présent article justifie les besoins nutritionnels des jeunes sportifs sur la base des besoins physiologiques et métaboliques nécessaires à la survie, à la croissance et à l'activité physique. Les effets de la croissance et de la maturation sur les réponses métaboliques et physiologiques à l'exercice physique sont résumés, avec une discussion de l'impact conjoint de ces facteurs sur les performances physiques et les besoins alimentaires.

Problèmes éthiques ayant trait aux recherches chez les enfants et adolescents sportifs

Il faut reconnaître que la base des données permettant de définir les besoins nutritionnels des enfants et adolescents sportifs est restreinte, contrairement à celle, étendue, disponible pour les adultes et issue de recherches ayant porté sur les principales caractéristiques nutritionnelles associées à l'exercice physique. Ces données ont été utilisées afin de réa-

liser des recommandations diététiques destinées aux hommes et femmes s'entraînant à diverses disciplines sportives et participant à des compétitions dans le cadre de celles-ci [8]. L'absence relative de données comparables issues de recherches menées chez des enfants sportifs est principalement imputable à des restrictions éthiques et méthodologiques ayant trait aux méthodes de recueil des données qui ont été renforcées ces dernières années [9, 10]. Les techniques appliquées aux études métaboliques menées chez des adultes sous entraînement physique, bien qu'informatives, ont fréquemment excédé les limites de l'acceptabilité éthique chez l'enfant.

Chez l'adulte, la mesure des substances énergétiques ou de leurs métabolites présents dans le sang et dans les muscles a permis de mieux connaître les taux du renouvellement des substrats énergétiques au cours d'un effort physique. De plus, l'utilisation d'isotopes stables a permis l'étude des paramètres cinétiques de la mobilisation et de l'utilisation de substrats. Ces méthodes sont très informatives et pratiques pour l'étude détaillée du bilan énergétique et du métabolisme des substrats énergétiques au cours d'activités physiques. Elles s'accompagnent toutefois d'un certain degré de risque, de gêne ou de douleur qui a paru excessif ou difficile à quantifier chez l'enfant. En conséquence, les recherches comportant des méthodes invasives ne sont généralement autorisées que chez des enfants atteints de pathologies et si elles sont effectuées dans le cadre des soins [9, 10]. Concernant l'étude de divers aspects du métabolisme chez l'enfant en bonne santé, les réglementations éthiques internationales ayant trait aux recherches biomédicales chez l'homme [11] soulignent la nécessité de l'utilisation de techniques indirectes non invasives et non intrusives pour le mode de vie de l'enfant. Ces règlements limitent nettement l'étendue et la précision des recherches pouvant être menées chez l'enfant mais, point important, protègent sa dignité, sa santé et son bien-être.

Établissement de recommandations nutritionnelles pour les sujets physiquement actifs

Les principaux déterminants des besoins nutritionnels liés à l'activité physique concernent la demande énergétique «supplémentaire» excédant les besoins sédentaires, ainsi que la consommation absolue de divers substrats énergétiques métaboliques [12, 13]. L'hydratation exerce également une influence significative sur les performances physiques et la santé, et les apports liquidiens provenant d'aliments et de boissons doivent équilibrer les pertes liquidiennes par excrétion et sudation. Des recherches menées chez des adultes ont porté sur divers domaines nutritionnels ayant trait à l'activité physique, dont un grand nombre sont résumées dans le document «Joint Position Statement on Nutrition and

Athletic Performance» de l'American College of Sports Medicine (ACSM), l'American Dietetic Association (ADA) et Dietitians of Canada (DC) [8]. Ces domaines nutritionnels incluent:

(1) Les besoins énergétiques et les coûts métaboliques spécifiques à divers sports et activités [14, 15].

(2) La régulation du métabolisme énergétique musculaire en cours d'effort, effectué à diverses intensités et durées [16, 17].

(3) Les différences du métabolisme énergétique en fonction du sexe au cours d'une activité physique [18, 19].

(4) Le rôle d'interventions diététiques, dont le moment des repas par rapport à l'activité physique et l'utilisation de suppléments diététiques afin de moduler les performances physiques et/ou d'améliorer la récupération après l'effort [20, 21].

Les besoins alimentaires établis pour l'adulte physiquement actif sont centrés sur l'optimisation des performances et le maintien d'une bonne santé [8]. Cependant, une proportion élevée de ces connaissances est absente dans le cas des enfants et adolescents, et il est actuellement difficile de savoir à quel point les résultats des études menées chez des adultes peuvent leur être appliqués. La préoccupation nutritionnelle fondamentale pour un jeune sportif est l'apport d'une énergie adéquate et de nutriments spécifiques pour une croissance et une maturation normales; le potentiel ergogène (amélioration des performances) des aliments est d'une importance secondaire [3, 22]. De plus, la physiologie de l'enfant est moins mature que celle de l'adulte. Il en est particulièrement ainsi pour l'enfant en période prépubertaire qui, comparativement à l'adulte, présente des réponses différentes à l'effort en termes de dépense d'énergie pour une activité donnée, de profil du métabolisme énergétique et de thermorégulation [2, 22, 23]. Néanmoins, des données suggèrent que les réponses métaboliques et physiologiques des adolescents plus âgés à diverses activités sont similaires à celles des adultes du même sexe [2, 22, 23].

Les connaissances actuelles sur les besoins alimentaires particuliers des jeunes sportifs de différents âges chronologiques ou biologiques sont très limitées. En conséquence, les recommandations nutritionnelles concernant ces sujets sont plutôt vagues et reposent sur les trois principaux facteurs suivants:

(1) Connaissances établies des besoins nutritionnels liés à la croissance et à la maturation de l'enfant et de l'adolescent.

(2) Physiologie et potentiel de performances physiques des enfants et adolescents d'un âge chronologique ou biologique donné.

(3) Adaptations de données obtenues chez l'adulte lors d'études métaboliques menées dans le contexte d'un entraînement à l'effort et physique.

Enfin, des indices capitaux de l'adéquation nutritionnelle de l'alimentation d'un jeune sportif sont l'état général de santé et de bien-être, la vitesse de croissance linéaire et de maturation et l'adéquation du gain pondéral sur une période spécifiée de temps [1, 7, 22]. Chez le jeune sportif, l'alimentation peut être considérée comme satisfaisant les besoins nutritionnels liés à l'entraînement et à la croissance normale quand, sur une période de plusieurs mois, le sujet continue à grandir et à gagner du poids en harmonie avec les percentiles normaux d'une courbe de croissance validée, et en l'absence de retard ou de détérioration du développement pubertaire [1, 7]. La présence d'une privation chronique d'énergie ou de protéines chez un enfant est indiquée par un gain inadéquat de taille et de poids, qui s'écarte des courbes de croissance validées, ou par un déficit de poids par rapport à la taille, comme indiqué par le calcul de l'indice de masse corporelle. Des modifications du comportement, dont asthénie, léthargie, irritabilité et apathie, ou des dysfonctionnements physiques, tels que des infections fréquentes et des lésions réitérées des tissus mous, peuvent également indiquer une insuffisance nutritionnelle, notamment une déshydratation, chez les jeunes sportifs [22, 24].

Paramètres respiratoires intervenant dans l'entraînement des muscles squelettiques

L'énergie nécessaire à l'activité musculaire provient du catabolisme de l'adénosine triphosphate (ATP). La quantité d'ATP présente dans les cellules musculaires est limitée et n'est suffisante que pendant quelques secondes à la puissance nécessaire à l'activité musculaire. Afin de soutenir un exercice physique, l'ATP doit donc être resynthétisée aussi rapidement qu'elle est utilisée [12, 13]. Au cours d'une activité physique, l'activité des diverses chaînes respiratoires de la synthèse de l'ATP dans les muscles recrutés détermine le taux et l'étendue du catabolisme des substances énergétiques stockées et circulantes et influence ainsi les besoins nutritionnels liés à l'effort [12, 13]. Chez l'adulte comme chez l'enfant, trois chaînes respiratoires principales agissent dans les muscles squelettiques lors d'une activité physique:

(1) *Les réactions liées à la créatine phosphokinase* comportent la phosphorylation de l'adénosine diphosphate par l'intermédiaire du catabolisme anaérobie de la créatine-phosphate (PC). Elles apportent de l'énergie pour de courtes salves (<10 secondes) d'activité musculaire à intensité maximale et constituent un système énergétique à court terme en raison des quantités limitées de PC stockée.

(2) *La glycolyse anaérobie* implique le catabolisme anaérobie du glycogène musculaire en acide lactique. Elle apporte de l'énergie pour un court effort (<1 minute) d'intensité maximale et représente un système énergétique à court terme, car le produit dérivé majeur (acide lactique), entre

autres déchets métaboliques, interfère avec le couplage excitation/contraction du muscle squelettique.

(3) *La respiration aérobie* comporte le catabolisme complet des substances énergétiques (essentiellement glucose et acides gras) par l'intermédiaire du cycle de l'acide tricarboxylique et d'une phosphorylation oxydative en dioxyde de carbone et eau. Elle apporte de l'énergie pendant une durée prolongée, car il n'existe aucune accumulation de métabolites toxiques.

Chez l'adulte comme chez l'enfant, le principal facteur déterminant les chaînes respiratoires actives au cours d'un exercice physique est l'intensité de l'activité musculaire, et donc le taux de dégradation de l'ATP [12, 16]. La durée de l'effort exerce également une influence car, tandis que l'activité musculaire se poursuit, les stocks intramusculaires et hépatiques de glycogène diminuent de façon sélective tandis que d'autres substrats énergétiques sont de plus en plus recrutés [17, 20]. Une fatigue survient quand la force des contractions musculaires diminue et, à un degré donné d'activité physique, l'intensité ne peut être maintenue. L'épuisement correspond au moment auquel il n'est plus possible de poursuivre l'activité [25]. La fatigue et l'épuisement sont normalement liés à une déplétion des substrats énergétiques, à une accumulation des déchets métaboliques, à une déshydratation et/ou à une hyperthermie [25].

Substrats nécessaires à la production d'énergie

Conformément à l'action des chaînes respiratoires susmentionnées, les principaux substrats énergétiques provenant de l'alimentation et nécessaires à la synthèse de l'ATP dans les muscles en cours d'activité chez l'adulte comme chez l'enfant sont les stocks musculaires propres de PC, glycogène et triglycérides, ainsi que le glucose et les acides gras non estérifiés présents dans le sang [16, 17]. Au cours d'un effort prolongé, les sources d'énergie limitantes de l'organisme sont le glycogène et le glucose provenant des glucides alimentaires [17, 20]. Le taux et l'étendue du catabolisme de ces substrats énergétiques sont régis par l'intensité et la durée de l'effort [26, 27]. Bien que riches en énergie en termes de glucose par masse unitaire, les acides aminés ne contribuent qu'en faible proportion à la synthèse de l'ATP au cours d'une activité physique chez les sujets en bonne santé correctement nourris, sauf dans le cas d'un effort à la fois prolongé (par exemple >90 minutes) et intense (par exemple >75% de la puissance aérobie maximale ou $\dot{V}O_{2max}$) [17, 20].

Un effort prolongé très intensif peut finalement aboutir à une déplétion des stocks musculaires et hépatiques de glycogène, car l'ATP doit être synthétisée à un taux élevé pendant une durée prolongée [20, 27]. Le glycogène musculaire et le glucose sanguin contribuent significativement à une activité physique de ce type. Tandis que les stocks de glyco-

gène diminuent avec la poursuite de l'activité physique, et qu'une hypoglycémie s'ensuit, une diminution du rapport entre les concentrations plasmatiques d'insuline et de glucagon et une augmentation de la cortisolémie stimulent la protéolyse musculaire [21, 28], ce qui aboutit à la libération d'acides aminés non liés. Les muscles actifs sont capables d'extraire et d'oxyder des quantités croissantes d'acides aminés ramifiés (leucine, isoleucine et valine), tandis que d'autres acides aminés peuvent être transaminés afin de produire de l'alanine et de la glutamine pour la glyconéogenèse hépatique [28, 29]. Toutefois, les acides aminés ne sont pas des substrats énergétiques «idéaux» pour la synthèse de l'ATP, car l'augmentation du catabolisme des protéines tissulaires expose à un risque de négativation du bilan azoté. Quand elle est prolongée, cette négativation altère la santé et peut résulter en une immunosuppression, des lésions des tissus mous et une altération de la formation osseuse [4, 21]. En raison de l'importance d'un bilan azoté positif pour la croissance, il est probable que les conséquences nocives pour la santé d'une déplétion en glycogène induite par des activités physiques sont plus importantes chez l'enfant que chez l'adulte.

La mobilisation des lipides et l'oxydation des acides gras s'accroissent également avec la durée de l'effort, tant chez l'enfant que chez l'adulte [26, 30]. Cette augmentation du métabolisme des graisses est suscitée par une multitude de réponses endocriniennes, dont des augmentations des concentrations plasmatiques de cortisol, de catécholamines et d'hormone de croissance et une diminution de l'insulinémie [31, 32]. Il est intéressant de noter que des études ayant utilisé une méthode calorimétrique indirecte afin d'évaluer le rapport d'échange respiratoire non protéique ($\dot{V}O_2/\dot{V}CO_2$) ont indiqué que la contribution de l'oxydation des acides gras à la production d'énergie était plus importante chez l'enfant que chez l'adulte au cours d'un effort de même intensité relative (où cette dernière est exprimée sous forme de $\% \dot{V}O_{2max}$) [33–35]. Cette tendance semble diminuer au cours de l'adolescence, particulièrement chez les garçons [23, 36]. Cette situation implique un rôle des hormones sexuelles, en particulier des androgènes, dans la régulation du métabolisme des substrats énergétiques. Les implications nutritionnelles d'une capacité plus élevée d'oxydation des acides gras en période prépubertaire incluent la conservation du glycogène et du glucose sanguin, ce qui peut réduire les besoins en glucides d'origine alimentaire.

Déterminants physiques et physiologiques des performances physiques

L'excellence des performances sportives dépend de caractéristiques physiques et physiologiques constitutionnelles («bons gènes»), d'un entraînement physique bien struc-

turé destiné à favoriser ces caractéristiques innées et d'une nutrition sensée permettant de faciliter une adaptation optimale à l'entraînement [37]. Les principaux déterminants physiques et physiologiques des performances sportives qui sont influencés par la nutrition sont la force, la vitesse, la puissance et l'endurance. L'importance relative de ces caractéristiques pour les performances sportives varie en fonction du sport et il est peu habituel qu'elles soient toutes des attributs critiques pour la réussite dans un sport donné. Ces caractéristiques physiques et physiologiques sont définies comme suit [37].

La force dénote l'aptitude à générer une puissance musculaire et est régie par la taille de chacun des muscles et muscles agonistes, couplée à la coordination des unités motrices de ceux-ci. La force est un déterminant clef de la *puissance*, qui est égale au produit de la force musculaire par la vitesse de contraction. Les sports qui demandent une force et une puissance maximales sont ceux comportant des pointes de vitesse (course, natation, cyclisme), le saut, le lancer et l'haltérophilie. La gymnastique, la lutte, les sports de raquettes et de nombreux sports d'équipe comportent également des techniques faisant appel à la puissance. L'excellence des performances dans la plupart des sports dépend d'un rapport élevé entre la force (ou la puissance) et la masse corporelle. Il en va particulièrement ainsi pour les sports qui impliquent des mouvements corporels contre les forces dues à la gravité (par exemple course, saut, gymnastique, etc.). En revanche, lors de sports tels que la natation et le cyclisme, où la masse corporelle est soutenue, la force et la puissance absolues sont plus importantes pour les performances. Lors de la pratique de ces sports, l'activité musculaire est principalement soutenue par l'énergie produite par le catabolisme anaérobie des stocks musculaires de créatine phosphate et de glycogène. Ces systèmes respiratoires anaérobies permettent un taux de synthèse de l'ATP substantiellement plus élevé que celui qui pourrait être obtenu par respiration aérobie.

L'endurance traduit la capacité à poursuivre une activité physique sans fatigue et est largement déterminée par la condition cardiorespiratoire ainsi que par la capacité des muscles à extraire et à utiliser l'oxygène en respiration aérobie. Des exemples de sports d'endurance sont la course, la natation et le cyclisme sur de longues distances, l'aviron et le ski de fond. En sus de la nécessité d'une force et d'une puissance, les sports de raquettes et d'équipe demandent également un certain degré d'endurance cardiorespiratoire et musculaire. Les sports d'endurance, ainsi que l'entraînement associé, génèrent les coûts énergétiques les plus élevés parmi toutes les activités physiques. Bien que le taux de dépense énergétique soit moindre pour les sports d'endurance que pour les sports nécessitant force et puissance, la quantité totale d'énergie dépensée au cours d'une activité d'endurance est plus élevée en raison de la plus longue durée

pendant laquelle celle-ci doit être maintenue. Les activités d'endurance sont principalement soutenues par la respiration aérobie, qui utilise diverses sources de substrats énergétiques et métaboliques, telles que régies par l'intensité et la durée de l'effort, ainsi que par l'ordre de grandeur des stocks en glycogène des muscles actifs.

Développement des capacités athlétiques avec la croissance et la maturation

Lors de l'étude des besoins alimentaires des enfants sportifs, il est nécessaire de prendre en compte les facteurs influençant les besoins individuels de ces sujets en énergie et en nutriments spécifiques. Chez l'enfant en période de croissance, ces facteurs incluent la santé générale, les mensurations de l'organisme, l'état de maturation et l'activité physique [1, 22, 23]. Ce dernier facteur est à l'origine de besoins nutritionnels spécifiques ayant trait à l'apport d'énergie nécessaire à l'activité musculaire et à la favorisation d'un environnement anabolique facilitant la récupération après l'effort. Les dimensions corporelles et l'état de maturation sont des déterminants fondamentaux des capacités de performances physiques chez l'enfant et l'adolescent et, tout au long de la période de développement, particulièrement au cours de la puberté, l'augmentation de la force musculaire et de la puissance aérobie favorise l'efficacité sportive [1, 22, 23].

Chez les enfants plus jeunes (<8 ans), les comportements physiques spontanés augmentent l'amélioration des performances physiques liée à la croissance. La course, le saut et les activités acrobatiques sont des caractéristiques naturelles des jeux d'enfants, qui améliorent la coordination, l'adresse motrice, la force musculaire et la puissance aérobie [38]. De plus, en présence d'une nutrition adéquate, ces activités paraissent améliorer l'acquisition prépubertaire de la masse musculaire et osseuse [39]. La figure 1 illustre les différences de densité osseuse entre de jeunes gymnastes âgés de 7 à 8 ans et des enfants à activité normale, et démontre l'effet positif apparent des activités à impact élevé faisant intervenir les articulations porteuses sur l'accrétion régionale des minéraux osseux. Au cours de cette phase précoce du développement, un entraînement intensif est exceptionnel et généralement déconseillé en raison de la sensibilité du système musculosquelettique en croissance à des lésions par sur-utilisation [2]. Toutefois, dans le cas de sports tels que la gymnastique et la danse, un entraînement contrôlé est habituel et essentiel pour favoriser et entretenir la souplesse, qui se dégraderait sinon avec la croissance [2, 40].

Avec l'accroissement de l'âge et de la maturité, l'enfant est capable de soutenir un entraînement physique plus intensif et structuré, particulièrement après l'apparition de la puberté. Avant celle-ci, quelle que soit la nutrition, les mus-

Fig. 1. Taille, poids et densité minérale osseuse (DMO) de surfaces régionales chez des enfants gymnastes des deux sexes (âge 6–8 ans) exprimés sous forme de score normalisé (Z) par rapport à la valeur moyenne chez des enfants non entraînés (témoins) de même sexe et poids. □ = Filles; ▨ = garçons. Les deux groupes d'enfants gymnastes étaient petits et légers pour leur âge, mais présentaient une tendance à une DMO plus élevée que celle des témoins. Les gymnastes féminines s'entraînaient 8–10 heures par semaine et régulièrement depuis 3–4 ans. Les gymnastes masculins s'étaient entraînés 4–6 heures par semaine depuis 1–2 ans. Significativité, gymnastes par rapport aux témoins de même sexe: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$. D'après Zanker et coll. [39].

cles squelettiques ne seront pas à même de présenter une hypertrophie significative, bien que des gains de force à médiation neurologique soient possibles [1, 23]. Il faut attendre le début de la puberté pour que des augmentations rapides des concentrations circulantes d'hormones sexuelles, d'hormone de croissance et de facteurs insuliniques de croissance permettent des réponses hypertrophiques des muscles squelettiques aux activités demandant force et puissance. La force musculaire par unité transversale de surface est comparable entre les enfants, les adolescents et les adultes jeunes des deux sexes; c'est l'environnement endocrinien à différents stades de maturité chez les sujets des deux sexes qui détermine la capacité d'augmentation de la masse musculaire induite par l'exercice physique [1, 23]. Les hormones sexuelles, particulièrement les androgènes, peuvent également favoriser la glycolyse anaérobie dans les muscles squelettiques, car la capacité anaérobie et la production de lactate sont nettement plus importantes chez les adultes de sexe masculin que chez les garçons et les filles en période prépubertaire ou chez les femmes [23, 36]. Des auteurs ont suggéré que les androgènes induiraient les enzymes contrôlant la glycolyse anaérobie et accroîtraient les capacités de stockage du glycogène [23, 36].

Exprimée par rapport à la masse corporelle, la $\dot{V}O_{2\max}$ est indépendante de l'état de maturation mais, quand elle l'est en termes absolus, elle est plus élevée chez les sujets plus corpulents (par exemple chez les adultes comparativement aux enfants) [23, 41]. Cette différence s'explique par le fait que le débit cardiaque maximal est un déterminant majeur de $\dot{V}O_{2\max}$, et que le volume maximal d'éjection est lié aux dimensions cardiaques chez les sujets en bonne santé. $\dot{V}O_{2\max}$ dépend également de la capacité d'une im-

portante masse de muscle en cours d'activité à extraire l'oxygène sanguin et à l'utiliser pour la respiration aérobie. Une fonction pulmonaire et une hémoglobinémie adéquates influencent inévitablement les capacités de transport de l'oxygène [42, 43]. Comparativement à l'adulte et à l'adolescent plus âgé, les enfants plus jeunes font preuve d'une efficacité mécanique et d'une économie d'utilisation de l'oxygène plus basses lors de la marche et de la course [2, 22]. Un exemple en est la mesure de la consommation submaximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$), exprimée par unité de masse corporelle, plus élevée chez l'enfant que chez l'adulte effectuant une activité donnée.

Des auteurs ont suggéré qu'une moindre économie de l'utilisation de l'oxygène chez les enfants plus jeunes était liée à une coordination moins efficace des groupements musculaires agonistes-antagonistes, ce qui aboutissait à un «gaspillage» d'énergie [2, 22]. La $\dot{V}O_2$ étant proportionnelle aux dépenses énergétiques au cours d'une activité physique submaximale à l'état d'équilibre, les tableaux mentionnant les besoins énergétiques liés à diverses activités physiques réalisés à partir de recherches menées chez des adultes [14] sous-estiment habituellement les dépenses énergétiques des enfants effectuant les mêmes activités, même après une mise à l'échelle destinée à prendre en compte les différences de taille et de masse corporelle. Il a été estimé que, chez l'enfant prépubertaire et l'adolescent, les dépenses énergétiques pour une activité donnée excédaient de respectivement 20–25 et 10–15% les valeurs enregistrées chez l'adulte [2, 22].

La principale conclusion pouvant être tirée concernant les effets de l'entraînement physique chez l'enfant en période prépubertaire est qu'un entraînement spécifique peut améliorer le développement de l'adresse motrice, de la force

musculaire et de la puissance aérobie. Toutefois, contrairement à l'adolescent et à l'adulte, le potentiel de l'enfant plus jeune à accroître la puissance aérobie et anaérobie par un entraînement spécifique est comparativement limité [2, 22]. La modulation des apports alimentaires (par exemple par une augmentation de la consommation de protéines au-delà de celles nécessaires au maintien du bilan azoté) ne peut améliorer ces caractéristiques de performance avant la puberté [22, 24]. Au cours de la puberté, les augmentations de la force corporelle totale, de la puissance musculaire et de l'endurance sont d'un ordre de grandeur substantiellement plus élevé chez les garçons que chez les filles, tant exprimées en termes absolus que par rapport à la masse corporelle [2, 22]. Ces différences en fonction du sexe s'expliquent par des différences de taille corporelle, de composition de l'organisme et de métabolisme entre les adolescents et les adultes. Tandis que les androgènes (particulièrement la testostérone) stimulent la croissance de la totalité du corps et augmentent la masse tissulaire maigre chez l'adolescent, les œstrogènes accroissent le dépôt de graisse corporelle et le rapport entre les tissus adipeux et maigres chez l'adolescente. De plus, les effets anabolisants des œstrogènes sont significativement moindres que ceux des androgènes [2, 22]. Les différences en fonction du sexe de l'étendue du développement des attributs des performances physiques au cours de l'adolescence rendent compte des différences bien établies des potentiels de performances sportives entre les hommes et les femmes adultes [2, 43].

Rôle de l'alimentation et des facteurs influençant les besoins nutritionnels fondamentaux de l'adulte et de l'enfant

L'alimentation apporte les substrats énergétiques indispensables au métabolisme et à l'entretien de l'homéostasie. Le bilan énergétique, qui représente la différence entre les apports et les dépenses énergétiques, est fondamental pour la santé et les performances physiques. Chez l'adulte, les besoins énergétiques alimentaires traduisent les coûts en énergie du métabolisme de base, l'effet thermique des aliments, la thermorégulation et l'activité physique [8, 13]. Cette dernière inclut les activités quotidiennes de routine ainsi que les sports et activités physiques structurés. L'activité physique exerce un effet important sur les dépenses énergétiques, et les exercices qui comportent le recrutement d'importantes masses musculaires élèvent fortement le métabolisme de repos (MR). Par exemple, chez l'adulte, le MR peut augmenter de 10 à 20 fois au cours d'une activité aérobie prolongée (>5 minutes) impliquant le corps entier, mais peut être momentanément multiplié par 40 à 50 lors d'une courte (<1 minute) activité anaérobie d'intensité maximale [13]. En conséquence, des exercices physiques très intenses et réité-

rés à des fins d'entraînement physique pourraient susciter un déficit énergétique, sauf si ce dernier est équilibré par des apports énergétiques alimentaires adéquats.

Chez l'enfant, de l'énergie est nécessaire pour les mêmes fonctions que chez les adultes; toutefois, une quantité supplémentaire allant au-delà des demandes liée au MR est requise afin de soutenir la croissance et la maturation. La croissance dépend de la synthèse nette et des dépôts tissulaires et est donc un processus anabolique qui incorpore l'énergie chimique d'origine alimentaire dans les composants structuraux des organes. Le taux de renouvellement tissulaire étant nettement plus élevé chez l'enfant que chez l'adulte, les dépenses énergétiques par unité de masse corporelle sont également plus importantes chez l'enfant [22, 44]. De plus, afin de maintenir une croissance et une maturation normale, le bilan azoté doit demeurer positif chez l'enfant, ce qui nécessite des apports en azote (à partir d'aliments protéiques) excédant l'utilisation de cette substance pour les activités de synthèse et la production d'énergie. Un bilan énergétique négatif aboutit inévitablement à une négativation du bilan azoté car les protéines sont catabolisées afin de produire des acides aminés destinés à être utilisés en tant que substrats énergétiques métaboliques [21, 45]. La conséquence de ce catabolisme est une perte de poids, portant tant sur les tissus maigres qu'adipeux, chez l'adulte et également chez l'enfant. Toutefois, en cas de persistance d'un déficit énergétique et d'un bilan azoté négatif chez l'enfant, un ralentissement associé de la croissance peut se produire, résultant en une petite taille pour l'âge chronologique. Ce «nanisme nutritionnel» se caractérise par un déclin du taux de croissance linéaire avec un gain pondéral inadéquat et un délai, un retard ou même un arrêt de la puberté [7, 40].

Une insuffisance nutritionnelle au cours de l'adolescence, particulièrement quand elle porte sur l'énergie et les protéines, crée un environnement catabolique qui nuit aux événements anaboliques nécessaires à une croissance et une maturation normales. Au cours de la poussée de croissance pubertaire, l'énergie d'origine alimentaire et les demandes protéiques atteignent un pic destiné à assurer la positivité du bilan azoté [22, 24]. Tout au long de cette phase du développement, particulièrement chez les adolescentes, l'hypothalamus est particulièrement sensible à un déficit aigu ou chronique en énergie, à une hypoglycémie et à une diminution des stocks adipeux. Ces anomalies nutritionnelles perturbent les variations diurnes normales des concentrations circulantes d'insuline, de 3,5,3'-triiodothyronine, de cortisol et de leptine [4, 46]. Cette dernière paraît informer l'hypothalamus de la disponibilité de l'énergie et réguler indirectement la fonction hypophysaire ainsi que les activités des glandes endocrines périphériques [4, 47]. Les effets nocifs d'une privation en énergie et en protéines sur la croissance et le développement pubertaire sont imputables à un

dysfonctionnement neuroendocrinien qui aboutit à des perturbations très étendues de la synthèse et du métabolisme des hormones, situation dont les conséquences sont très importantes [4, 7]. Une inhibition secondaire de la fonction gonadique, couplée à des altérations du métabolisme ou des actions périphériques des hormones thyroïdiennes et de l'hormone de croissance, nuit particulièrement à l'intégrité du squelette. Chez l'enfant en bonne santé, 30 à 40% de la masse osseuse adulte sont normalement acquis au cours de la puberté sous l'influence anabolique d'hormones sexuelles, de facteurs de croissance insuliniques et de la leptine [48, 49]. Un déficit en ces hormones dans des conditions de privation d'énergie altère l'accrétion osseuse. Il en résulte une faible masse osseuse et une fragilisation de la structure des os à l'âge adulte [4, 49].

Avec une rééducation nutritionnelle, un enfant précédemment sous-nutri gagne habituellement du poids, ce qui lui permet de bénéficier d'une croissance de «rattrapage» et d'achever sa maturation pubertaire [7, 40]. Toutefois, si l'insuffisance nutritionnelle persiste pendant de nombreuses années, la croissance osseuse et l'acquisition de minéraux peuvent être définitivement altérées et la taille adulte génétiquement «programmée» peut ne jamais être atteinte. Dans ces circonstances, la maturation pubertaire est incomplète et l'aptitude à la reproduction est absente [7, 40]. Si l'insuffisance nutritionnelle survient vers l'âge attendu de la puberté, la poussée de croissance pubertaire et la maturation consécutive sont retardées ou inhibées [7, 40]. Plus la sévérité de la privation énergétique au cours de l'enfance est élevée, et plus cette situation persiste, plus le pronostic concernant l'obtention prospective d'une croissance et d'une maturation normales est sombre. De ce fait, en matière de besoins nutritionnels des jeunes sportifs, il est important de comprendre que l'alimentation de ces sujets doit couvrir les besoins nutritionnels spécifiques de la croissance et de la maturation, en sus des besoins énergétiques dus à l'entraînement physique.

Il faut néanmoins noter que certains enfants qui excellent dans certains sports (par exemple gymnastique et danse) peuvent obtenir ces performances en raison d'une petite taille héréditaire et d'une puberté tardive. Ces enfants ont souvent des parents et une fratrie de petite taille et présentent un retard constitutionnel de croissance (retard constitutionnel de la chronologie de la croissance linéaire et du gain de poids); ils peuvent toutefois être adéquatement nourris et en bonne santé [7, 40]. A l'heure actuelle, des données limitées suggèrent que les retards de croissance et de maturation observés dans diverses cohortes d'enfants sportifs sont directement imputables à l'entraînement physique en lui-même. En revanche, si les besoins en énergie et en nutriments spécifiques liés à l'entraînement sont équilibrés par une nutrition adéquate, la croissance et la maturation progressent dans les limites de la normale [3, 50].

Troubles alimentaires chez les enfants sportifs

Chez les enfants physiquement actifs des sociétés industrialisées, l'insuffisance nutritionnelle primaire est habituellement due à des restrictions alimentaires délibérées et auto-infligées plutôt qu'à un accès limité aux aliments. Le terme de «troubles alimentaires» décrit un profil de comportement alimentaire non orthodoxe qui peut satisfaire à un nombre plus ou moins élevé de critères diagnostiques formels de troubles cliniques de l'alimentation tels que l'anorexie mentale ou la boulimie nerveuse [51, 52]. Bien que ces troubles alimentaires soient habituellement d'origine psychogène, ce comportement peut être perpétué par une malnutrition et des adaptations métaboliques associées qui nuisent aux fonctions cognitives. Les troubles cliniques de l'alimentation sont plus fréquents chez les filles que chez les garçons et surviennent habituellement après le début de la puberté, quand une augmentation rapide des concentrations circulantes des hormones sexuelles se traduit par des modifications accélérées des formes du corps et du rapport entre les masses grasses et maigres et par une instabilité émotionnelle. Les troubles cliniques de l'alimentation se caractérisent par des comportements alimentaires ritualisés fréquemment associés à d'autres traits obsessionnels et compulsifs tels qu'une dépendance à l'activité physique [51, 52].

Des restrictions alimentaires et une activité physique «excessive» mais futile sont particulièrement nocives pour la croissance, la maturation et la santé future des adolescents. Des publications indiquent que les troubles à type de restriction de l'alimentation sont plus répandus dans certaines cohortes de sportifs (par exemple coureurs de fond, gymnastes, danseurs et lutteurs) que chez les sujets ayant une activité normale [51, 52]. Ces observations pourraient s'expliquer par la pression rencontrée ou perçue par ces jeunes adultes afin d'atteindre et de maintenir une minceur physique, pour l'amélioration des performances ou des qualités esthétiques. Il est cependant également possible que les adolescents ayant une personnalité obsessionnelle ou autrement vulnérable se «sélectionnent eux-mêmes» pour des sports de ce type. Pour ces adolescents, un entraînement physique structuré peut satisfaire à un besoin de routine et de rituel, et les clubs sportifs apportent un environnement dans lequel la minceur et les efforts réitérés sont attendus et acceptés [51, 52].

Une insuffisance nutritionnelle chez un jeune sportif en période de croissance peut également être due à un simple manque d'information ou à une mauvaise compréhension du sujet, de ses parents ou de ses entraîneurs de l'importance de l'alimentation pour le maintien des performances et de la santé. La confusion et l'incertitude entourant les besoins alimentaires du jeune sportif sont compréhensibles en raison du faible nombre d'études publiées en ce domaine.

Les enfants et les adolescents, ces derniers particulièrement, peuvent adopter des pratiques alimentaires dangereuses, car ils sont soumis à des conseils diététiques trompeurs ou sans fondement issus des médias et de magazines populaires. De ce fait, les enfants sportifs doivent être attentivement conseillés par des personnes possédant l'expertise diététique appropriée. Les adolescents tendent à être exceptionnellement sensibles à leur image physique et leurs conceptions en matière d'aliments et d'alimentation peuvent être déformées. Plutôt que de comprendre que l'alimentation est essentielle à l'obtention d'un métabolisme normal, ils peuvent considérer les aliments comme des «ennemis» qui favorisent un gain de poids indésirable [24, 51, 52]. De ce fait, les enfants sportifs doivent être éduqués par des personnes ayant autorité (par exemple entraîneurs et parents) en ce qui concerne l'importance des aliments en tant que source vitale d'énergie pour des performances et une santé optimales.

Nutrition générale et sport: importance particulière de la nutrition chez le sportif

Une alimentation bien équilibrée est essentielle à l'entretien des performances physiques et à la préservation de la santé chez tous les sujets qui s'adonnent à un entraînement physique, quel que soit leur âge. L'alimentation apporte les éléments chimiques nécessaires à la production d'énergie par les muscles squelettiques en activité, la restauration des stocks énergétiques après l'effort et la régénérescence des muscles endommagés. La nutrition module également les concentrations circulantes d'hormones anabolisantes et catabolisantes qui influencent le métabolisme en cours d'effort des substances énergétiques stockées et l'aptitude à la récupération après l'activité physique [21, 53]. Chez les sujets dont les dépenses énergétiques liées à l'effort sont élevées, la préoccupation nutritionnelle fondamentale est d'assurer des apports adéquats en énergie. Ces sujets nécessitent une énergie et des nutriments spécifiques excédant les besoins de leurs homologues de mêmes âge et sexe [8]. Ces besoins sont régis par le degré d'accroissement des dépenses énergétiques au-dessus du MR sous l'effet de l'exercice physique, la durée pendant laquelle la dépense énergétique est élevée, le coût énergétique total «supplémentaire» d'un exercice régulier et la consommation associée ainsi que la déplétion éventuelle de substrats énergétiques spécifiques. Le régime alimentaire, le bilan énergétique et l'entraînement physique régulent également la masse et la composition corporelles, qui influencent l'aptitude aux performances sportives [8, 37].

Les enfants et les adultes impliqués dans un entraînement physique régulier bénéficieront probablement d'une augmentation des apports en macro- et micronutriments spécifiques à des valeurs supérieures à celles recommandées pour les sujets sédentaires. L'objectif est d'assister la produc-

Tableau 1. Principaux facteurs influençant les dépenses énergétiques et le métabolisme des substrats énergétiques au cours d'une activité physique

Intensité et durée de l'activité, qui influencent le degré auquel les systèmes énergétiques musculaires aérobie et/ou anaérobie sont impliqués et donc le «choix» du substrat énergétique métabolique [26, 27]

La fréquence des séances d'entraînement, qui influence la capacité à récupérer des stocks d'énergie entre des sessions répétées d'activité physique [17, 20]

L'ordre de grandeur des stocks d'énergie, qui se composent principalement de glycogène et de triglycérides, dans les fibres musculaires recrutées avant et après l'effort [17, 20]

La glycémie, qui influence la libération d'hormones maintenant le contrôle glycémique telles que l'insuline, le cortisol, les catécholamines et l'hormone de croissance [31, 32]

Le régime alimentaire habituel, particulièrement les apports en macronutriments, qui influence également l'ordre de grandeur des stocks énergétiques musculaires et la glycémie [17, 20]

Le type de fibre musculaire, tel que défini par des propriétés structurales et biochimiques, dont l'activité d'enzymes qui contrôlent le catabolisme et le stockage des substrats énergétiques métaboliques [12, 17]

Le «type» d'entraînement, tel que défini par le degré d'adaptation métabolique à des exercices réitérés spécifiques, particulièrement dans les muscles squelettiques recrutés [12, 17]

Les concentrations circulantes d'hormones sexuelles, qui sont négligeables avant la puberté et augmentent à l'apparition de celle-ci [23, 36]

tion d'énergie pour l'effort et la régénérescence tissulaire après celui-ci. Le tableau 1 illustre les principaux facteurs influençant les dépenses en énergie et le métabolisme des substrats énergétiques au cours de l'activité physique.

Plus la masse des muscles en exercice est importante et plus la puissance dégagée par ceux-ci est élevée, plus le taux des dépenses énergétiques augmente. Une intensité d'effort et des dépenses énergétiques plus élevées s'accompagnent également d'un catabolisme et d'une utilisation plus importante du glycogène par rapport aux graisses comme source d'énergie musculaire chez l'adulte comme chez l'enfant [26, 44]. Un exercice prolongé d'intensité élevée en l'absence d'ingestion de glucides aboutit à une réduction substantielle des stocks musculaires et hépatiques de glycogène [16, 17]. De ce fait, afin de prévenir une déplétion en glycogène et une fatigue, tous les sujets qui entreprennent régulièrement ce type d'activité physique nécessitent un régime alimentaire équilibré en énergie, dont au moins 55% doit provenir de glucides [8, 24]. Les activités physiques réitérées qui font intervenir les mêmes groupes musculaires accroissent le risque de déplétion en glycogène dans les fibres muscu-

lares spécifiquement recrutées. De ce fait, la satisfaction des demandes nutritionnelles liées à l'entraînement physique dépend fortement de la disponibilité en glucides sous forme de glucose sanguin et de glycogène hépatique et musculaire [16, 17]. En raison de l'abondance des stocks de graisses corporelles comparativement au glycogène chez l'adulte et l'enfant en bonne santé, la disponibilité des lipides ne limite normalement pas les performances à l'effort. De ce fait, une alimentation riche en lipides n'a qu'une efficacité limitée pour l'activité musculaire, les performances physiques, la récupération après l'effort et les capacités d'entraînement chez les sujets physiquement actifs [20–22].

Les différences concernant le métabolisme des substrats énergétiques au cours d'une activité physique entre l'adulte et l'enfant sont principalement imputables à celles concernant les mensurations de l'organisme et aux différences de concentration des hormones sexuelles circulantes [22, 23]. Ces hormones influencent le métabolisme des substrats énergétiques par leurs effets sur les mensurations et la composition corporelles, l'importance des stocks énergétiques intra- et extramusculaires et l'activité de diverses enzymes qui contrôlent les chaînes respiratoires dans les muscles squelettiques. Les différences entre les concentrations circulantes des diverses hormones sexuelles peuvent également sous-tendre les variations du métabolisme énergétique observées entre les hommes et les femmes au cours d'une activité physique d'une intensité relative donnée [18, 19].

Récupération après activité physique

L'entraînement physique est le stimulus essentiel pour l'obtention de modifications adaptatives de la physiologie et du métabolisme, qui peuvent être bénéfiques aux performances et à la santé, ou les altérer [53, 54]. La nutrition, le bilan énergétique et la concentration circulante des substrats énergétiques métaboliques jouent un rôle central dans le processus de récupération après effort. Ce dernier est la restauration de l'homéostasie après une activité physique et implique la reconstitution des stocks d'énergie ainsi que la synthèse de protéines structurelles et d'enzymes [53, 54]. L'efficacité de la récupération après une activité physique détermine la nature de l'adaptation métabolique et fonctionnelle à une séance sportive consécutive. Des exercices prolongés et très intenses, en particulier, imposent une contrainte considérable à des appareils et organes majeurs et suscitent un catabolisme très étendu. Après l'effort, ce catabolisme disparaît sous l'effet combiné du repos et d'une nutrition équilibrée permettant un anabolisme net. Ce dernier favorise des adaptations positives de la fonction des tissus éprouvés par l'activité physique [53, 54]. Une caractéristique importante du repos lors d'un programme d'entraînement est qu'il s'accompagne d'un profil du métabolisme des subs-

Tableau 2. Principales fonctions de la nutrition favorisant des adaptations bénéfiques à l'entraînement physique

Apport de substrats énergétiques métaboliques aux muscles squelettiques au cours de l'activité physique afin d'équilibrer la production et l'utilisation de l'énergie et donc d'éviter une fatigue [13, 16]

Restauration des stocks d'énergie après l'effort, particulièrement du glycogène musculaire et hépatique, qui est stocké en quantités limitées dans l'organisme comparativement aux graisses [13, 16]

Restauration de l'homéostasie après l'effort, qui inclut un remplacement des liquides et électrolytes et une normalisation de la glycémie [21, 53]

Régénérescence et réparation des tissus du système musculosquelettique lésé par des microtraumatismes induits par l'activité physique, afin de favoriser une «supercompensation» (c'est-à-dire une réponse anabolique supérieure) [21, 53]

trats énergétiques dans les muscles squelettiques différent de celui observé lors de l'activité physique [26, 53]. Plutôt que le glycogène catabolisé en d'importantes quantités, le substrat énergétique prédominant pour les muscles squelettiques au repos est représenté par les lipides. De faibles taux d'oxydation du glucose et du glycogène favorisent une nouvelle synthèse de ces derniers et donc la restauration de leurs stocks [26, 53].

L'alimentation joue un rôle important dans les adaptations à l'entraînement physique. La non-restauration des stocks énergétiques après une activité physique, particulièrement le glycogène musculaire et hépatique, s'oppose à une inversion du catabolisme induit par l'effort, limite l'aptitude à des activités physiques supplémentaires et peut susciter des réponses défavorables mal adaptées [21, 54]. Une inadaptation persistante ou réitérée peut également aboutir à des manifestations de «surentraînement», caractérisées par des perturbations de la physiologie, du métabolisme et de l'humeur qui altèrent les performances, la santé et le bien-être [54, 55]. Bien que la majorité des études de l'effet de l'interaction entre alimentation et entraînement physique sur les performances et la santé ait été menée chez des adultes et non chez des enfants, et en raison des besoins particuliers d'une nutrition optimale pour la croissance, il est logique de penser que la sensibilité de l'enfant à des effets indésirables pour la santé est plus élevée que celle de l'adulte lors de tentatives d'équilibrage des demandes concurrentielles de la croissance et de l'entraînement physique. De ce fait, la nutrition est un facteur décisif pour l'aptitude à bénéficier d'un entraînement physique, en raison de ses effets régulateurs sur l'équilibre anabolique/catabolique prévalent.

Les principales fonctions de la nutrition favorisant des adaptations bénéfiques à l'entraînement physique sont résumées au tableau 2.

Différences entre les besoins nutritionnels de l'enfant et de l'adulte sportifs

Bien que les données soient limitées, il semblerait que les principales caractéristiques physiologiques et métaboliques de l'activité physique chez l'enfant différenciant les besoins nutritionnels de ce dernier par rapport de ceux de l'adulte soient les suivantes:

(1) Augmentation de l'oxydation des lipides par rapport à celle des glucides au cours d'une activité physique sub-maximale d'une intensité relative donnée, qui réduit le recours au glycogène en tant que source d'énergie musculaire et peut donc diminuer l'importance des glucides alimentaires à cette fin [35, 44].

(2) Diminution de l'efficacité mécanique au cours des activités impliquant un soutien du poids corporel, telles que la marche et la course, ce qui résulte en une dépense énergétique plus élevée par unité de masse corporelle et restreint l'intérêt des tableaux des dépenses énergétiques lors de différentes activités, éléments issus de données expérimentales obtenues chez l'adulte et extrapolées à l'enfant [22, 56].

(3) Moindres sudation et aptitude à dissiper la chaleur et à réguler la température corporelle profonde, ce qui augmente les besoins liquidiens [22, 57].

Ces différences entre enfant et adulte se réduisent au cours de l'adolescence ainsi qu'avec la croissance de l'organisme et la maturation pubertaire [2, 23]. A ce jour, des études ont conclu que l'enfant en période prépubertaire dispose des capacités métaboliques et physiologiques nécessaires à des performances efficaces lors d'exercices aérobies prolongés et d'activités impliquant de brefs épisodes (<10 secondes) d'activité intense, qui sont régis par l'énergie provenant du catabolisme de l'ATP et de la créatine-phosphate, par exemple le saut, le lancer et la course rapide et brève. Il semblerait toutefois que les enfants en période prépubertaire ne soient pas suffisamment bien équipés au plan physiologique pour effectuer les activités soutenues par une glycolyse anaérobie [22, 23]. Tout au long de l'adolescence, particulièrement chez les garçons, existe une amplification de la capacité de la glycolyse anaérobie, qui peut être médiée par un développement du contrôle enzymatique de cette chaîne respiratoire et/ou par une augmentation de la capacité à stocker le glycogène [22, 23]. Au cours d'exercices aérobies d'intensité croissante, les enfants comme les adultes métabolisent une quantité relativement plus élevée de stocks de glucides endogènes (par exemple glycogène musculaire et glucose sanguin) et proportionnellement moins de lipides [22, 44]. Il est toutefois intéressant de noter que les enfants paraissent oxyder des quantités relativement plus importantes de glucides exogènes ingérés au cours d'un effort comparativement aux adultes [34, 35]. Il peut en être ainsi parce que la capacité à cataboliser le glycogène endogène pour l'utiliser comme substrat énergétique sous l'effet

de l'activité musculaire est moindre chez l'enfant que chez l'adulte.

Les besoins en énergie et en nutriments spécifiques des jeunes sujets dont l'activité physique est élevée, particulièrement ceux effectuant un entraînement physique très intensif en vue de compétitions sportives, excèdent ceux de leurs homologues sédentaires ou normalement actifs. Actuellement toutefois, en raison des données limitées issues d'études, il est difficile de savoir précisément à quel point les besoins nutritionnels diffèrent entre ces deux groupes définis en fonction de l'activité physique. Chez l'adulte, des stratégies nutritionnelles spécifiques comportant la consommation de lipides avec ou sans protéines, avant, pendant ou après l'activité physique ont favorisé les performances lors de celle-ci et la récupération après l'effort [21, 58]. Les stratégies nutritionnelles reposant sur les glucides augmentent le stockage du glycogène avant et après l'activité physique, ce qui facilite le maintien d'une glycémie adéquate et limite le catabolisme du glycogène et des protéines au cours de l'effort [20, 28]. A l'heure actuelle, le degré auquel ce type d'intervention diététique améliore les performances et la récupération après effort chez les sujets jeunes est largement hypothétique. La prudence a été recommandée quant à l'utilisation de suppléments alimentaires chez l'enfant [59] comme chez l'adulte [8].

Equilibre liquidien et thermorégulation

L'équilibre liquidien et électrolytique est capital pour l'entretien de l'homéostasie et des performances physiques. L'activité musculaire est largement inefficace, plus de 75% de l'énergie provenant de substances énergétiques métaboliques étant transformées en chaleur et non en énergie mécanique. Il en est particulièrement ainsi chez l'enfant, dont le rendement mécanique est plus bas que celui de l'adulte au cours de la marche et de la course [22, 56]. Un stockage excessif de la chaleur dans l'organisme entraîne une hyperthermie et un coup de chaleur. Ce phénomène se produit malgré l'entrée en action de réponses compensatrices à une élévation de la température corporelle totale, qui incluent une vasodilatation, ce qui augmente la convection de la chaleur vers la surface cutanée, et une sudation, qui accroît les pertes de chaleur par évaporation et refroidit la peau.

Le non-remplacement des liquides et électrolytes (particulièrement le sodium) perdus par la sudation aboutit à une déshydratation et à des déséquilibres électrolytiques (par exemple hyponatrémie) [22, 57]. De plus, l'enfant est exposé à un risque plus élevé de coup de chaleur que l'adulte en raison d'un rapport plus élevé entre la surface et le volume, d'un plus bas débit cardiaque, d'un rendement mécanique plus faible et de l'immaturité des réponses compensatrices à une hyperthermie [22, 57]. Le risque de coup de chaleur et

de déshydratation est maximal quand la température ambiante excède 37°C et quand le degré d'humidité est trop élevé pour permettre une perte de chaleur efficace par évaporation. Les signes de réaction incluent l'excrétion de petites quantités d'urine rougeâtre et foncée, une léthargie, des nausées, des céphalées et une confusion.

Le remplacement des liquides perdus est nécessaire au maintien du débit cardiaque, de la pression artérielle et de la perfusion tissulaire. Cette dernière favorise l'apport de nutriments et d'oxygène et l'élimination des déchets métaboliques. La soif étant généralement un mauvais indice de besoin de liquide chez l'adulte comme chez l'enfant, il est important d'inciter à consommer des liquides avant, pendant et après l'activité physique afin d'éviter une déshydratation. L'ajout de petites quantités de chlorure de sodium à l'eau sensibilise le mécanisme de soif par le maintien de l'osmolalité plasmatique et réduit l'effet diurétique de la consommation d'eau sans ajout [8, 22, 57]. Pour les séances d'activité physique excédant 1 heure, comme cela a été montré chez des adultes, l'ajout de glucides (8–10%) est susceptible de prévenir une hypoglycémie et peut améliorer tant les performances que la récupération après l'effort [8, 22, 57].

Recommandations pratiques

L'objectif principal du présent article est de justifier les besoins nutritionnels des jeunes sportifs sur la base des besoins physiologiques et métaboliques nécessaires à la survie, à la croissance et à l'activité physique. Néanmoins, des domaines pratiques évidents sont à prendre en compte lors de l'incitation à la consommation d'un régime alimentaire adéquat chez ces sujets. Ces domaines suscitent la préoccupation des parents, des entraîneurs et des jeunes sportifs eux-mêmes, pour lesquels des données scientifiques doivent être traduites en pratique comportementale. Les moyens pratiques d'obtenir une alimentation équilibrée ont été précédemment présentés de façon détaillée [22, 24]. Des conseils informatifs peuvent également être obtenus sur des sites Internet tels que celui du Gatorade Sport Science Institute (www.gssiweb.com) et de l'United States Department of Agriculture Center for Nutrition Policy (www.usda.gov/cnpp). Ce dernier donne des informations sur le schéma de la pyramide alimentaire (www.mypyramid.gov), dont le but est de présenter au grand public des moyens facilement compréhensibles de parvenir à une alimentation nutritive et bien équilibrée. Ce guide classe les aliments en fonction de leur source et de leurs composantes nutritionnelles principales (par exemple produits laitiers, viande/poisson, légumes, fruits, céréales) et recommande des quantités à consommer par les adultes et les enfants en fonction des dimensions des rations qui fournissent un apport adéquat en tous

les nutriments essentiels. Pour les adolescents plus âgés (16–18 ans), les recommandations diététiques présentées dans le Joint Position Statement on Nutrition and Athletic Performance de l'ACSM, de l'ADA et de DC [8] sont applicables et précieuses.

Comme exposé plus haut, l'énergie et les protéines d'origine alimentaire sont tout particulièrement pertinentes pour le maintien de la santé et des performances physiques chez les athlètes en période de croissance. La quantité d'énergie «supplémentaire» nécessaire à la croissance varie en fonction des mensurations corporelles et de la maturité et il est adéquat de la prescrire par référence à la masse corporelle chez l'enfant non obèse. Les besoins en énergie et en protéines sont les plus élevés au cours de la poussée de croissance pubertaire et sont plus importants chez les garçons que chez les filles en raison d'une augmentation plus importante de la masse corporelle chez les premiers [1, 24]. Au cours de cette phase du développement, qui survient typiquement vers l'âge de 8–10 ans, les filles et les garçons ayant des activités normales doivent habituellement consommer 65–75 kcal/kg/jour, ainsi que recevoir des apports protéiques de 1,1–1,2 g/jour. Vers l'âge de 12–13 ans, les besoins en énergie et protéines diminuent respectivement à 50–60 kcal/kg/jour et 1,0–1,1 g/jour et, vers l'âge de 16–17 ans, à 40–50 kcal/kg/jour et 0,9–1,0 g/jour [22, 24]. Les plus élevés de ces besoins énergétiques et protéiques s'appliquent généralement aux garçons en raison de leur taille et poids plus importants. Le coût énergétique de l'entraînement physique doit être pris en compte et ajouté à ces besoins.

Chez l'enfant en bonne santé, la demande élevée en énergie associée à l'entraînement physique est habituellement satisfaite par une augmentation naturelle de l'appétit, et il est important que cette énergie provienne d'une alimentation nourrissante et bien équilibrée. Le respect des recommandations de la pyramide des aliments fournit une énergie provenant des macronutriments dans des proportions approximatives de 55–60% de glucides, 12–15% de protéines et 25–30% de lipides. A l'heure actuelle, peu de données permettent de définir les effets de l'entraînement physique sur les besoins protéiques chez les jeunes sportifs en période de croissance. Toutefois, comme montré chez des sportifs matures [21], les jeunes sportifs pourraient nécessiter des apports protéiques 50–80% plus élevés que ceux adéquats chez leurs homologues ayant une activité normale, afin de prévenir une négativation du bilan azoté. Il est néanmoins probable que, si l'entretien du bilan énergétique et les proportions sus-mentionnées de macronutriments sont assurés, l'alimentation couvrira adéquatement les besoins en protéines et glucides additionnels du jeune sportif en période de croissance. Ces glucides exercent un effet «d'épargne protéique», car ils limitent l'utilisation des protéines à titre de substrats pour la synthèse de l'ATP et la glyconéo-

genèse [8, 24]. Un risque de carence protéique est possible chez l'enfant et l'adolescent qui suit un régime végétarien, particulièrement quand celui-ci exclut le poisson et les produits laitiers, qui, comme la viande, contiennent tous les acides aminés essentiels. Pour les jeunes sportifs végétariens, un choix prudent d'aliments protéiques mixtes (par exemple plantes légumineuses, céréales et noix) est essentiel afin d'assurer des apports équilibrés et adéquats en tous les acides aminés essentiels.

La croissance et des activités physiques régulières demandent également la consommation d'aliments apportant des quantités suffisantes de micronutriments pour contrôler des voies métaboliques essentielles intervenant dans la synthèse de l'ATP et la constitution de nouveaux tissus. Au cours de la croissance, le fer et le calcium sont nécessaires en quantités croissantes respectivement pour la synthèse de l'hémoglobine et la formation de la structure minérale osseuse. Il est important de noter que des études portant sur la nutrition d'enfants ayant une activité normale aux États-Unis [24] et au Royaume-Uni [60] ont démontré des carences en ces minéraux particuliers, et également en vitamines C, E et B₆. Bien que ces carences soient largement imputables à des apports alimentaires insuffisants, une augmentation de la demande en ces micronutriments sous l'effet de la croissance est également un facteur contributif. Les enfants et adolescents physiquement actifs devraient être incités à boire régulièrement (100–150 ml/h) toute la journée et, en fonction de leur stature, à consommer un volume supplémentaire de 200–400 ml d'eau au cours des 2 heures précé-

dant l'entraînement, de 150–200 ml toutes les 15–20 minutes pendant celui-ci et de 400–600 ml immédiatement après [57]. Le maintien de l'équilibre liquidien et de l'hydratation chez ces jeunes sportifs peut être amélioré par l'offre de boissons agréables en bouche (par exemple aromatisées).

Conclusions

Les objectifs essentiels de l'enfance et de l'adolescence sont une croissance et une maturation optimales, qui demandent toutes deux des bilans énergétique et azoté positifs. L'alimentation des enfants et adolescents pratiquant des sports intensifs doit donc adéquatement satisfaire les demandes nutritionnelles liées tant à l'entraînement physique qu'à la croissance normale. Les besoins alimentaires des enfants et adolescents physiquement actifs se modifient avec la croissance staturale et la progression de la puberté. Le degré de maturation influence l'aptitude aux performances physiques et les besoins diététiques par ses effets sur les réponses métaboliques et physiologiques à l'effort. Les enfants en période prépubertaire sont physiologiquement bien équipés pour effectuer des séances prolongées d'activité aérobie, mais leurs performances anaérobies sont limitées. Comme chez les adultes physiquement actifs, les besoins alimentaires en énergie, glucides, protéines et eau sont plus élevées chez les enfants et adolescents s'adonnant à des activités physiques que chez leurs homologues sédentaires ou ayant une activité normale.

Références

- 1 Malina RM: Physical growth and biological maturation of young athletes. *Exerc Sports Sci Rev* 1994;22:389–433.
- 2 Naughton G, Farpur-Lambert NJ, Carlson J, Bradney M, Van Praagh E: Physiological issues surrounding the performance of adolescent athletes. *Sports Med* 2000;30:309–325.
- 3 Roemmich JN, Richmond EJ, Rogel AD: Consequences of sport training during puberty. *J Endocrinol Invest* 2001;24:708–715.
- 4 Zanker CL, Cooke CB: Energy balance, endocrine function and bone health. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36:1372–1381.
- 5 Soyka LA, Grinspoon S, Levitsky LL, Herzog DB, Klibanski A: The effects of anorexia nervosa on bone metabolism in female adolescents. *J Clin Endocrinol Metab* 1999;84:4489–4496.
- 6 Warren MP: The effects of exercise on pubertal progression and reproductive function in girls. *J Clin Endocrinol Metab* 1980;51:1150–1157.
- 7 Rogol AD, Clark PA, Roemmich JN: Growth and pubertal development in children and adolescents: effects of diet and physical activity. *Am J Clin Nutr* 2000;72(suppl):521S–528S.
- 8 Manore MM, Barr SI, Butterfield GE: Nutrition and Athletic Performance. Joint Position Statement of ACSM/ADA/DC. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:2130–2145.
- 9 Medical Research Council Ethics Guide. Medical Research Involving Children. London, Medical Research Council, 2004.
- 10 McIntosh N, Bates P, Brykczynska G, Dunstan G, Goldman A, Harvey D, Larcher V, McCrae D, McKinnon A, Patton M, Saunders J, Shelley P: Guidelines for the ethical conduct of medical research involving children. Royal College of Paediatrics and Child Health: Ethics Advisory Committee. *Arch Dis Child* 2000;82:177–182.
- 11 International Ethical Guidelines for Biomedical Research Involving Human Subjects. Geneva, Council for International Organizations of Medical Sciences, 2002.
- 12 De Feo P, Di Loreto C, Lucidi P, Murdolo G, Parlanti N, De Cicco A, Piccioni F, Santeusano F: Metabolic response to exercise. *J Endocrinol Invest* 2003;26:851–864.
- 13 Hagerman FC: Energy metabolism and fuel utilization. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:S309–S314.
- 14 Ainsworth BE, Haskell WL, Whitt MC, Irwin ML, Schwartz AM, Strath SJ, O'Brien WL, Bassett DR Jr, Schmitz KH, Emplaincourt PO, Jacobs DR Jr, Leon AS: Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:S498–S504.
- 15 Hendricks KM, Duggan C, Walker WA: Manual of Pediatric Nutrition, ed 3. Hamilton, Decker, 2000, p 142.
- 16 Brooks GA: Mammalian fuel utilization during sustained exercise. *Comp Biochem Physiol Biochem Mol Biol* 1998;120:89–107.
- 17 Coyle EF: Substrate utilization during exercise in active people. *Am J Clin Nutr* 1995;61(suppl):S968–S979.

- 18 Tarnopolsky LJ, MacDougall JD, Atkinson SA, Tarnopolsky MA, Sutton JR: Gender differences in substrate for endurance exercise. *J Appl Physiol* 1990;68:302–308.
- 19 Horton TJ, Pagliassotti MJ, Hobbs K, O'Hill J: Fuel metabolism in men and women during and after long-duration exercise. *J Appl Physiol* 1998;85:1823–1832.
- 20 Spriet LL, Peters SJ: Influence of diet on the metabolic responses to exercise. *Proc Nutr Soc* 1998;57:25–33.
- 21 Kreider RB, Miriel V, Bertun E: Amino acid supplementation and exercise performance. Analysis of the proposed ergogenic value. *Sports Med* 1993;16:190–206.
- 22 Bar-Or O: Nutritional considerations for the child athlete. *Can J Appl Physiol* 2001;26 (suppl):S186–S191.
- 23 Boisseau N, Delamarche P: Metabolic and hormonal responses to exercise in children and adolescents. *Sports Med* 2000;30:405–422.
- 24 Steen SN: Nutrition for the school age athlete; in Berning JR, Steen SN (eds): *Nutrition for Sport and Exercise*. Gaithersburg, Aspen, 1998, pp 217–245.
- 25 Green HJ: Mechanisms of muscle fatigue in intense exercise. *J Sports Sci* 1997;15:247–256.
- 26 Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, Gastaldelli A, Hoewitz JF, Endert E, Wolfe RR: Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am J Physiol* 1993;265:E380–E391.
- 27 Brooks GA, Mercier J: Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the 'crossover' concept. *J Appl Physiol* 1994;76:2253–2261.
- 28 Wagenmakers AJM, Beckers EJ, Brouns F, Kuipers H, Soeters PB, Van Der Vusse GJ, Saris WHM: Carbohydrate supplementation, glycogen depletion and amino acid metabolism during exercise. *Am J Physiol* 1991;260: E883–E890.
- 29 Kasperek GJ, Snider RD: Effect of exercise intensity and starvation on activation of branched-chain keto-acid dehydrogenase by exercise. *Am J Physiol* 1987;252:E33–E37.
- 30 Zanker CL, Swaine IL, Castell L, Newsholme EA: Responses of plasma glutamine, free tryptophan and branched-chain amino acids to prolonged exercise after a regime designed to reduce muscle glycogen. *Eur J Appl Phys* 1997;75:543–548.
- 31 Galbo H: Exercise physiology: humoral function. *Sport Sci Rev* 1992;1:65–93.
- 32 Viru A: Stability and variability in hormonal responses to prolonged exercise. *Int J Sports Med* 1992;13:230–234.
- 33 Martinez LR, Haymes EM: Substrate utilization during treadmill running in prepubertal girls and women. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:975–983.
- 34 Riddell MC, Bar-Or O, Wilk B, Parolin ML, Heigenhauser GJ: Substrate utilization during exercise with glucose and glucose plus fructose ingestion in boys ages 10–14 yr. *J Appl Physiol* 2001;90:903–911.
- 35 Timmons BW, Bar-Or O, Riddell MC: Oxidation rate of exogenous carbohydrate during exercise is higher in boys than in men. *J Appl Physiol* 2002;94:278–284.
- 36 Berg A, Keul J: Biochemical changes during exercise in children; in Malina RM (ed): *Young Athletes: A Biological, Psychological and Educational Perspective*. Champaign, Human Kinetics, 1988, pp 61–67.
- 37 Astrand PO, Rodahl K: *Textbook of Work Physiology: Physiological Bases of Exercise*. New York, McGraw-Hill, 1986, pp 295–353.
- 38 Biddle S, Sallis J, Cavill N: *Young and Active? Young People and Health-Enhancing Physical Activity: Evidence and Implications*. London, Health Education Authority, 1998.
- 39 Zanker CL, Gannon L, Cooke CB, Gee KL, Oldroyd B, Truscott JG: Differences in bone density, body composition, physical activity and diet between child gymnasts and untrained children aged 7–8 years. *J Bone Miner Res* 2003;18:1043–1050.
- 40 Caine D, Lewis R, O'Connor P, Howe W, Bass S: Does gymnastics training inhibit growth of females? *Clin J Sport Med* 2001;11:260–270.
- 41 Armstrong N, Welsman JR: Developmental aspects of aerobic fitness in children and adolescents; in Holloszy JO (ed): *Exercise and Sports Science Reviews*. Baltimore, Williams & Wilkins, 1994, pp 435–476.
- 42 Saltin B: Oxygen transport by the circulatory system during exercise in man; in Keul J (ed): *Limiting Factors of Physiological Performance*. Stuttgart, Thieme, 1973, pp 235–252.
- 43 Pate RR, Kriska A: Physiological basis of the sex difference in cardiorespiratory endurance. *Sports Med* 1984;1:87–90.
- 44 Foricher JM, Ville N, Gratas-Delamarche A, Delamarche P: Effects of submaximal intensity cycle ergometry for one hour on substrate utilization in trained prepubertal boys versus trained adults. *J Sports Med Phys Fitness* 2003;43:36–43.
- 45 Golden K, Waterlow JC, Picou D: The relationship between dietary intake, weight change, nitrogen balance and protein turnover in man. *Am J Clin Nutr* 1977;30:1345–1348.
- 46 Matkovic V, Ilich J, Skugor M, Badenhop NE, Goel P, Clairmont A, Klisovic D, Nahhos RW, Landoll JD: Leptin is inversely related to age at menarche in human females. *J Clin Endocrinol Metab* 1997;82:3239–3245.
- 47 Welt CK, Chan JL, Bullen J, Murphy R, Smith P, DePaoli AM, Karalis A, Mantzoros CS: Recombinant human leptin in women with hypothalamic amenorrhea. *N Engl J Med* 2004;351:987–997.
- 48 Bonjour J, Theintz G, Buchs B, Slosman D, Rizzoli R: Critical years and stages of puberty for spinal and femoral bone mass accumulation during adolescence. *J Clin Endocrinol Metab* 1991;73:555–563.
- 49 Weaver CM: Adolescence: the period of dramatic bone growth. *Endocrine* 2002;17:43–48.
- 50 Baxter-Jones ADG, Helms PJ: Effects of training at a young age: review of the training of young athletes study. *Pediatr Exerc Sci* 1996;8:310–327.
- 51 Wilson GT, Eldridge KL: Pathology and development of eating disorders: implications for athletes; in Brownell KD, Rodin J, Wilmore JH (eds): *Eating, Body Weight and Performance in Athletes. Disorders of Modern Society*. Philadelphia, Lea & Febiger, 1992, pp 115–127.
- 52 Sundgot-Borgen J: Risk and trigger factors for the development of eating disorders in female elite athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1994;26:414–419.
- 53 Viru A: Post-exercise recovery period: carbohydrate and protein metabolism. *Scand J Med Sci Sports* 1996;6:2–14.
- 54 Kuipers H, Keizer HA: Overtraining in elite athletes: a review and directions for the future. *Sports Med* 1988;6:79–92.
- 55 Fry RW, Morton AR, Keast D: Overtraining in athletes: an update. *Sports Med* 1991;12: 32–65.
- 56 Frost G, Dowling J, Dyson K, Bar-Or O: Co-contraction in three age groups of children during treadmill locomotion. *J Electromyog Kinesiol* 1997;7:179–186.
- 57 Rivera-Brown AM, Gutierrez R, Gutierrez JC, Frontera WR, Bar-Or O: Drink composition, voluntary drinking and fluid balance in exercising, trained, heat-acclimatized boys. *J Appl Physiol* 1999;86:78–84.
- 58 Zawadzki KM, Yaspelkis BB, Ivy JL: Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J Appl Physiol* 1992;72:1854–1859.
- 59 Johnson WA, Landry GL: Nutritional supplements: fact vs. fiction. *Adolesc Med* 1998; 9:501–513.
- 60 Gregory J, Lowe S, Bates CJ, Prentice A, Jackson LV, Smithers G, Wenlock R, Farron M: *National Diet and Nutrition Survey: Young People Aged 4 to 18 Years. Vol 1: Report of the Diet and Nutrition Survey*. London, TSO, 2000.