



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

LA CAPACITE AEROBIE.

SON EVALUATION ET SON DEVELOPPEMENT CHEZ L'ENFANT ET CHEZ L'ADOLESCENT

LEGER Luc et CAZORLA Georges

**Cours DU Faculté des Sciences du Sport :
Evaluation et Préparation Physique Bordeaux 2006**

LA CAPACITE AEROBIE.

SON EVALUATION ET SON DEVELOPPEMENT CHEZ L'ENFANT ET CHEZ L'ADOLESCENT

LEGER Luc et CAZORLA Georges

INTRODUCTION

Avant d'aborder les problèmes spécifiques de l'évaluation et du développement de l'aptitude aérobie au cours de la croissance, il convient de préciser ce qu'est l'aptitude aérobie et qu'elles en sont ses composantes. Pour chacune d'entre elles, il semble indispensable aussi de souligner leur importance respective, présenter leurs valeurs types et commenter leur degré d'entraînement afin ensuite d'aborder leurs principes et leurs méthodes de mesure et d'entraînement.

Dans cet exposé, nous essaierons de mettre l'accent sur certaines problématiques susceptibles d'avoir des répercussions spécifiques pour le jeune. Nous verrons que ces problèmes tirent souvent leur origine des méthodes utilisées pour mesurer les composantes de l'aptitude aérobie, des unités et de la terminologie utilisées pour exprimer les résultats ou encore des principes et méthodes utilisés pour développer les aptitudes aérobies. Cela peut paraître paradoxal, mais c'est normal puisque les nouvelles méthodes développées visent à pallier les lacunes des précédentes mais qu'elles mêmes finiront par apparaître insatisfaisantes. L'intervenant responsable doit être en mesure de situer ses activités face à cette problématique et à la panoplie d'outils qui lui sont offerts.

APTITUDE AEROBIE – CONCEPTS – COMPOSANTES – IMPORTANCE – VALEURS TYPES

Avant de démontrer l'importance de l'aptitude aérobie, rappelons quelles en sont ses composantes.

L'aptitude aérobie est la capacité d'accomplir une performance de longue durée à intensité élevée, sous la dépendance principale du métabolisme aérobie. Les courses de moyenne et longue distances sont des activités typiques qui requièrent un haut niveau d'aptitude aérobie. L'aptitude aérobie semble aussi liée à l'état de santé en général, particulièrement la santé cardiovasculaire.

L'aptitude aérobie est composée de trois éléments:

1. La consommation maximale d'oxygène (VO_2max) ou la puissance aérobie maximale (PAM),
2. le rendement mécanique ou l'économie des processus d'énergie aérobie,
3. l'endurance aérobie.

VO₂max et PAM (ou VAM)

Concept

Après deux ou trois minutes d'un exercice à intensité constante, la consommation d'oxygène (VO₂) de l'organisme atteint un régime relativement stable, indiquant que toute l'énergie requise par cet exercice provient du métabolisme aérobie. Si l'intensité augmente, la consommation d'oxygène s'ajuste et un nouveau régime stable est atteint. Il existe cependant une limite à ce processus. En effet, à partir d'une certaine intensité, VO₂ n'augmente plus. L'individu atteint alors son VO₂max et la puissance réalisée est qualifiée de puissance maximale aérobie (PAM) ou VAM si l'on fait référence à la vitesse de locomotion plutôt qu'à la puissance.

Ces notions de PAM et VAM sont importantes puisque les praticiens s'en servent pour doser et contrôler l'intensité de l'entraînement ou mesurer l'endurance à partir du temps limite (Tlim) maintenu à 100% VAM. Même si la VAM est atteinte en même temps que VO₂max, elle n'en est pas pour autant synonyme puisqu'elle dépend aussi d'une autre composante : l'économie de locomotion que nous étudierons dans un des chapitres suivants.

Importance et valeurs types

Les données de la littérature sont parfois confuses. Certains auteurs rapportent des corrélations élevées entre la performance et le VO₂max et d'autres non!...C'est que la corrélation n'est peut-être pas l'indice statistique idéal pour rendre compte de l'importance du VO₂max. En effet, pour démontrer un lien entre deux variables comme la performance et le VO₂max, faudrait-il encore que ces variables " varient ". On obtient une corrélation élevée lorsque deux variables augmentent en même temps. Ceci n'est pas toujours le cas. Par exemple, avec un groupe homogène d'athlètes de même niveau de performance et de VO₂max, il n'est guère possible de démontrer que la performance augmente à mesure que VO₂max augmente puisque même si VO₂max ne varie pas, la performance, elle, peut varier en raison d'une endurance et/ou d'une économie de locomotion différentes. Cela fut démontré par Sjodin et Svedenhag (1985). Ces auteurs obtinrent une faible corrélation entre ces deux variables au marathon pour les athlètes classés " élite " ($r = 0,01$) mais une excellente corrélation lorsque toutes les sujets de niveaux très hétérogènes ayant participé au marathon furent regroupées ($r = 0,78$) (fig.1). En tenant compte du degré d'homogénéité des populations étudiées, une revue des corrélations publiées témoigne du même phénomène sur différentes distances (fig.2).

En fait, si l'on faisait le suivi longitudinal d'athlètes, la corrélation obtenue pour chacun d'entre eux entre VO₂max et performance, serait probablement très élevée (fig.3-b) alors que la corrélation pour l'ensemble des athlètes, mesurée à un moment de leur carrière athlétique serait nettement moindre (fig.3-a).

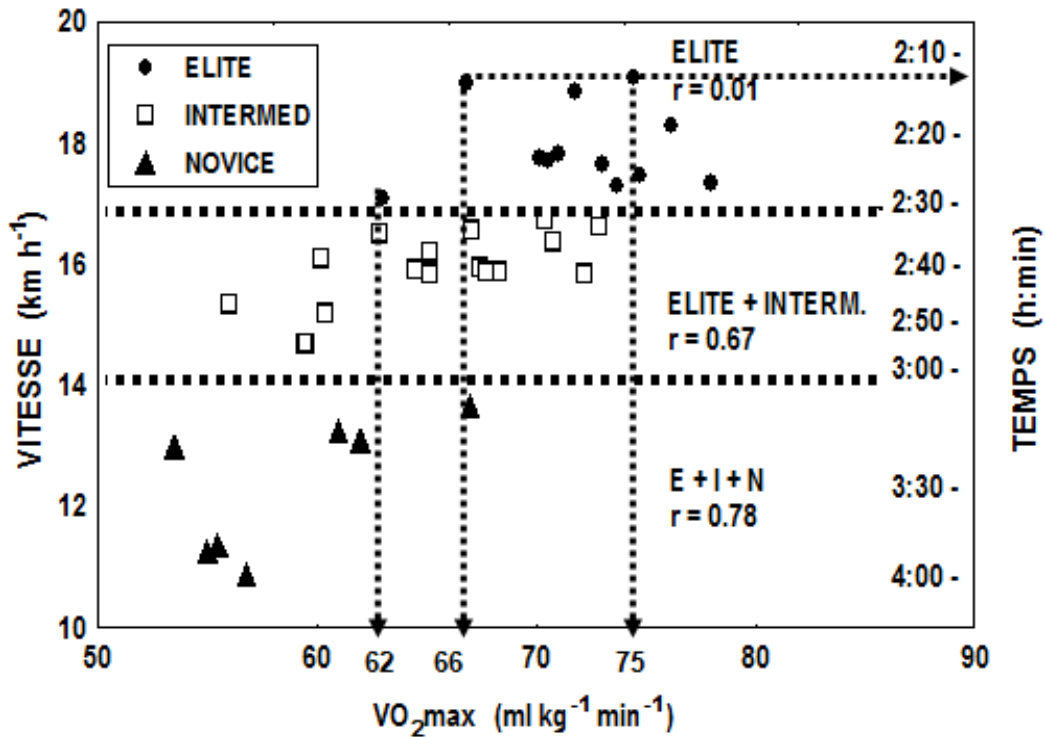


Fig. 1 : Corrélations entre VO_2max et la performance au marathon. Influence de l'homogénéité des groupes "élite" seulement (E), "élite et intermédiaire" (E + I) et "élite, intermédiaire et novice" (E + I + N) sur la corrélation. On peut aussi remarquer que la consommation maximale d'oxygène la plus faible des marathoniens du groupe élite se situe tout de même à $62 \text{ ml min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Par ailleurs les marathoniens du groupe « élite » qui réalisent la meilleure performance présentent des VO_2max bien différents, respectivement: 75 et $66 \text{ ml min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ alors que cette dernière valeur est aussi présentée par un marathonien du dernier groupe. Le VO_2max semble donc être une des conditions nécessaires mais non suffisantes pour réaliser une performance de longue durée.

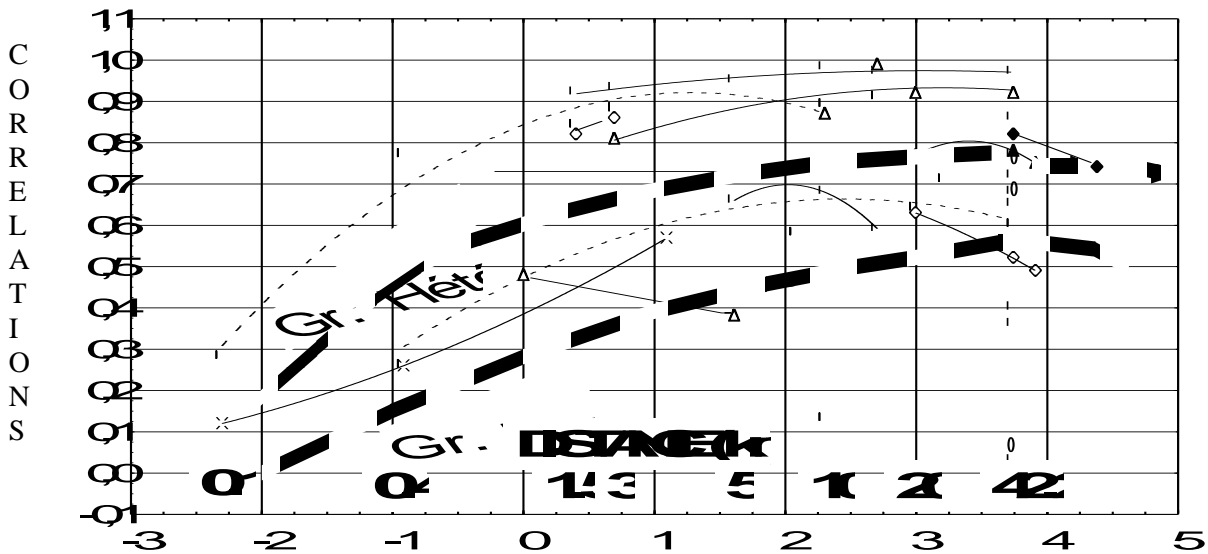
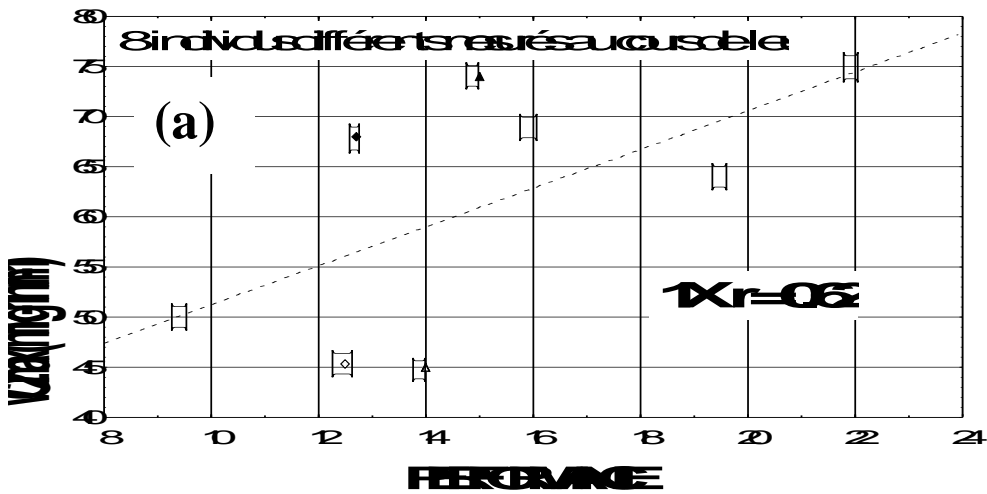
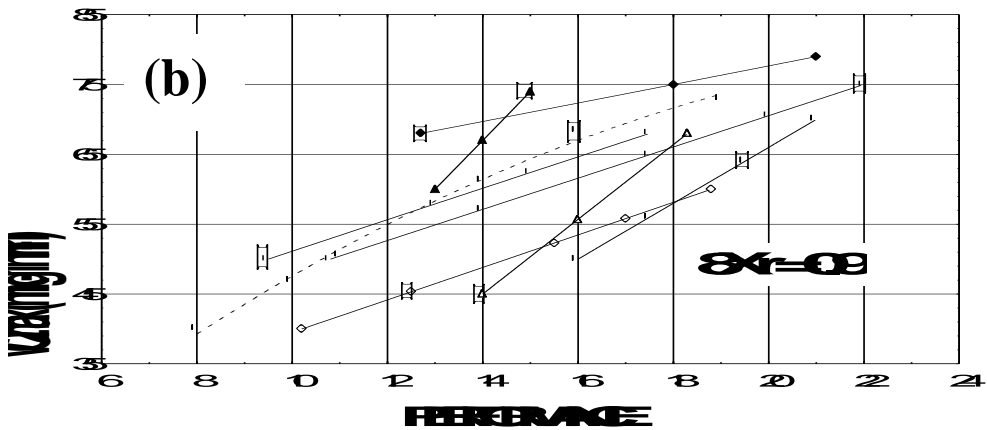


Figure 2 : Corrélations entre VO_2max et performances réalisées sur différentes distances pour des groupes homogènes et hétérogènes. Notons l'importance de VO_2max du 800m au marathon. Léger et Mercier (1989), non publié à partir d'une quinzaine d'études répertoriées dans Mercier (1988).

CORRÉLATIONS



CORRÉLATIONS INDIVIDUELLES



Figures 3a et 3b : Corrélations entre VO_2max et performances réalisées par différents individus à un moment de leur carrière (a) et ensemble de régressions et corrélations entre VO_2max et performances réalisées par les mêmes individus à différents moments de leur carrière (b). Autrement dit, pour un individu donné (même endurance, même économie de locomotion, même motivation, même aptitude anaérobie), VO_2max est nettement mieux corrélé avec la performance.

Qu'en est-il pour l'enfant et l'adolescent ?

En ce qui concerne le jeune, nous savons qu'il n'est pas un sédentaire vrai par rapport aux critères habituellement utilisés pour l'adulte. De ce fait, il est plutôt actif et même " non entraîné " le jeune présente des valeurs qui se situent autour de $50 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$, valeurs qui restent relativement stables au cours de la croissance et qui peuvent augmenter autour de $60 - 70 \text{ ml kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ chez le jeune qui s'entraîne dans les sports d'endurance aérobie (fig.4).

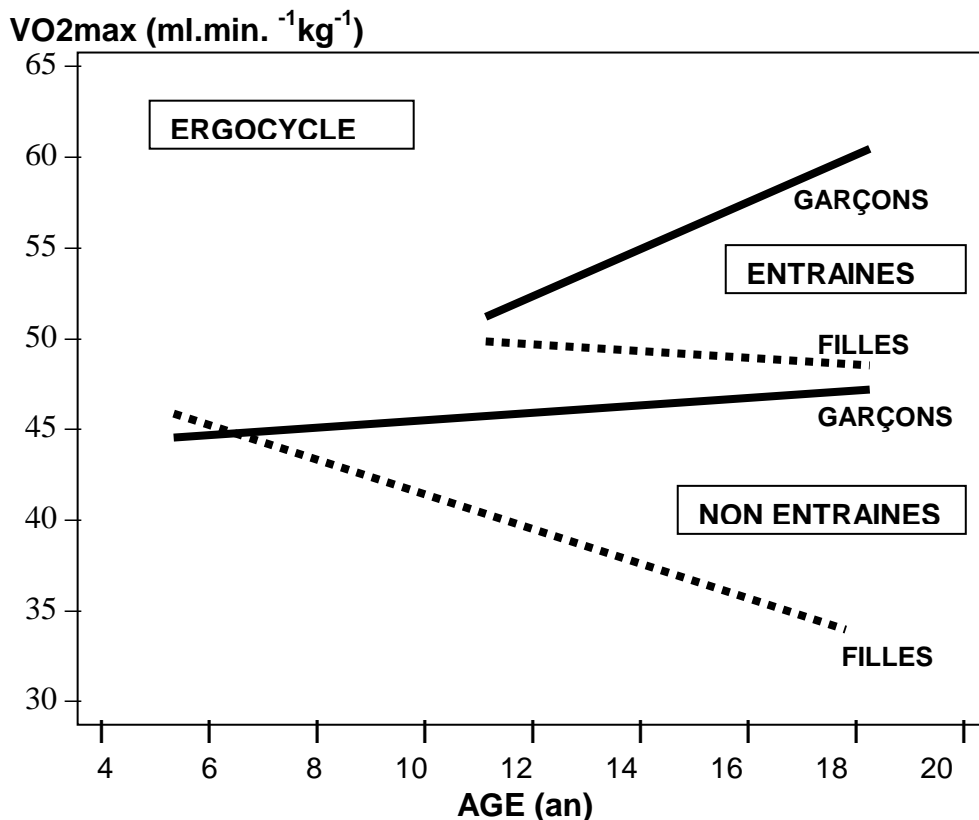


Figure 4 : Valeurs types de VO_2max au cours de la croissance pour jeunes " non entraînés " et entraînés en endurance. Les valeurs supérieures des enfants entraînés supportent l'idée que l'enfant est sensible à l'entraînement bien qu'un processus de sélection naturelle ne soit pas exclu, les enfants génétiquement avantageés étant ceux qui auraient spontanément choisi de s'adonner à des activités d'endurance. Adapté de Falgairette (1989).

Spécificité du VO_2max mesuré en natation, cyclisme et course à pied

On sait que le VO_2max mesuré diffère en fonction du type d'activité ou d'ergomètre utilisé pour le mesurer. En général, cela est attribué à la masse musculaire mise en jeu mais ce n'est pas le seul facteur. Ainsi, les différences observées en faveur de la course par rapport au cyclisme ou la natation peuvent aussi s'atténuer si les mesures sont obtenues sur des adeptes du cyclisme ou de la natation, plutôt que sur des coureurs à pied. D'ailleurs, cela peut expliquer pourquoi les différences observées varient beaucoup d'une étude à l'autre (tab.1).

Concrètement, cela veut dire qu'il est impossible d'estimer le VO_2max d'une discipline avec la mesure obtenue dans une autre discipline. Si l'on veut faire un suivi de l'entraînement efficace d'un athlète dans chacune des 3 disciplines, il faut mesurer le VO_2max dans chacune des 3 disciplines du triathlon. Idéalement, il serait préférable de mesurer VO_2 à vélo sur piste puisque la valeur obtenue est inférieure à celle obtenue sur ergocycle (Ricci et Léger, 1983) ou s'assurer de trouver un ergomètre vraiment spécifique dictant les mêmes valeurs de VO_2max que sur piste ou sur route.

Tableau .1 : Différences de VO_2 max. observées en faveur du tapis roulant par rapport au cycloergomètre avec les membres inférieurs (d'après Mombiedro,1991) et à la nage (d'après Cazorla et Montpetit 1983).

Références	Différences course-cycloergomètre
Astrand et Saltin, 1961	5% à 15%
Glassford et al., 1965	8%
Chase et al., 1966	15%
Hermansen et Saltin, 1969	7%
McArdle et al., 1970	9,9%
Faulkner et al., 1971	11%
Hamond et Pandolf, 1972	3,6% à 6%
McArdle et al., 1973	10,2% à 11,2%
Mckay et Banister, 1976	7,6%
Wicks et al., 1978	17%
	Course-natation
Cazorla et Montpetit 1983	8 à 12 % (nageurs de bon niveau)

ECONOMIE DE LOCOMOTION

Concepts

- **Courbe VO_2 - Vitesse**

L'individu efficace est celui qui requiert le moins d'énergie pour développer une puissance donnée. Le VO_2 requis pour une certaine vitesse de déplacement varie parfois beaucoup d'un individu à l'autre. Par conséquent, à VO_2 max égal, la PAM ou la VAM atteinte sera supérieure pour l'individu le plus économique (fig.5). Il en sera ainsi pour la performance réalisée en compétition. S'il est facile de voir que la position verticale de la courbe VO_2 -Vitesse reflète l'économie de locomotion, cela n'est guère pratique tant qu'on ne représente pas cette courbe par une valeur chiffrée unique.

VO_2 (ml.min.⁻¹kg⁻¹)

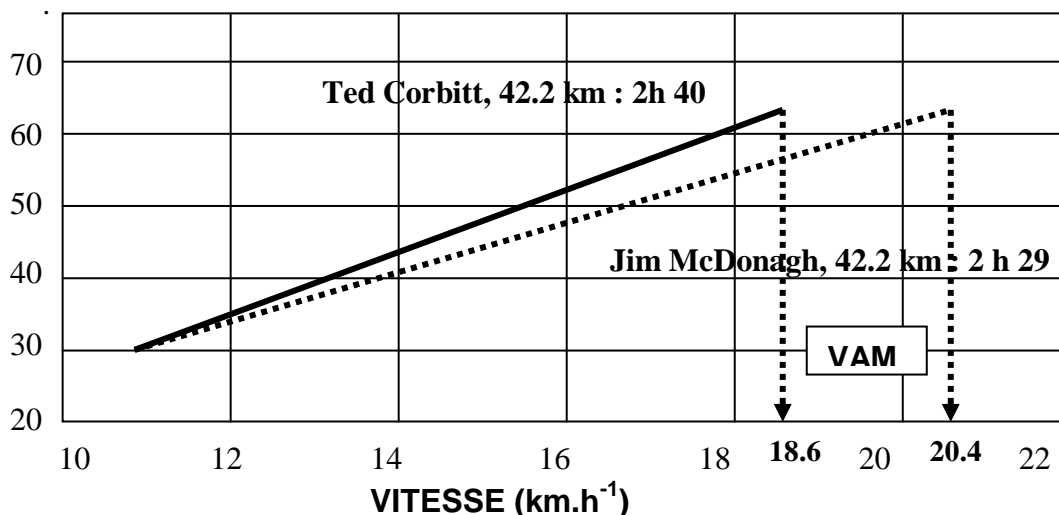


Figure 5 : Importance de l'économie de course dans la réalisation d'une performance de longue durée : au même VO_2 le sportif le plus « économe » est capable de courir à une vitesse nettement supérieure (Adapté de Noakes, Med Sci Sports Exerc 20 (4) : 319-330, 1988).

- **Coût énergétique d'un km (CE)**

Certains (Di Prampero et al., 1986) divisent le VO_2 requis en $ml\ kg^{-1}\ min^{-1}$ par la vitesse en $km.min^{-1}$ pour exprimer l'économie de mouvement en $ml\ kg^{-1}\ km^{-1}$. Autrement dit, il s'agit du coût énergétique (CE) pour parcourir un km. Mais, pour effectuer ce calcul, il faut prendre la valeur de VO_2 , obtenue à une vitesse donnée.

Pour des raisons mathématiques qu'il serait trop long d'expliquer ici, il faut savoir que l'économie de mouvement ainsi calculée peut varier uniquement en fonction de la vitesse à laquelle elle est calculée sans que le rendement mécanique n'ait vraiment changé. C'est pourquoi certains auteurs (Sjodin et Svedenhag, 1985) préconisent de mesurer le coût énergétique d'un km toujours à la même vitesse, c'est à dire $15\ km\ h^{-1}$. Pourquoi $15\ km\ h^{-1}$? Parce que c'est la vitesse maximale que la plupart des athlètes, même débutants peuvent maintenir en régime stable, c'est à dire au moins 5 min. afin d'observer une stabilisation dans la mesure de VO_2 . Pourquoi la vitesse la plus élevée ? Afin d'être le plus spécifique possible aux vitesses réalisées en compétition. Mais, pour les athlètes de très haut niveau ou encore pour les athlètes concourant en demi-fond, $15\ km/h$ n'est guère spécifique.

D'autre part, il faut réaliser que des enfants et des adolescents, même athlètes, ne peuvent maintenir une telle vitesse suffisamment longtemps (5 min.) pour permettre d'atteindre un état stable. On pourrait choisir une vitesse inférieure pour les enfants mais en mesurant CE à des vitesses différentes en période de croissance, il devient impossible de faire le suivi longitudinal de CE puisque les changements observés pourraient être dus aussi bien à la vitesse choisie afin de mesurer CE qu'à de véritables différences entre les différents groupes d'âge.

- **Fraction de VO_{2max} utilisée**

D'autres préconisent d'exprimer le VO_2 requis à une vitesse donnée en pourcentage de VO_{2max} [$\% VO_{2max} = 100 (VO_2\ requis / VO_{2max})$]. Cela n'est pas dénué d'intérêt mais engendre une certaine confusion en qualifiant ce rapport, d'économie relative de mouvement. En effet, la valeur de pourcentage de VO_{2max} peut varier uniquement à cause d'un changement de VO_{2max} (le dénominateur) sans que l'économie (numérateur) ne change.

En fait, la valeur que ce pourcentage de VO_{2max} représente, est la combinaison de VO_{2max} et de l'économie, tout comme la VAM. d'ailleurs ! Il ne faut donc pas être surpris que l'économie relative ($r = 0.81$) ou la VAM ($r = 0.92$) mesurée sur tapis roulant soit mieux corrélée à la performance réalisée au 10 km d'un triathlon que ne le sont séparément VO_{2max} ($r = 0.77$, Babineau et Léger, 1999). Des résultats semblables furent obtenus au marathon avec une corrélation plus élevée pour le pourcentage de VO_{2max} à $15\ km/h$ ($r = 0.94$) que pour VO_{2max} ($r = 0.78$) ou VO_2 à $15\ km/h$ ($r = 0.55$) (Sjodin et Svedenhag, 1985).

Pour les personnes peu initiées à ces concepts, la fraction de VO_{2max} ou le pourcentage de VO_{2max} prête aussi à confusion pour une autre raison. En effet dans l'exemple ci-dessus, il s'agit du pourcentage de VO_{2max} pour une vitesse donnée. Plus cette valeur est faible, meilleure serait l'économie. Ceci veut dire en effet, qu'à une vitesse donnée, l'athlète est encore loin de son maximum. Mais, la fraction de VO_{2max} est aussi utilisée pour indiquer quel pourcentage de VO_{2max} , un athlète peut maintenir en compétition (donc pour une distance donnée plutôt que pour une vitesse donnée). Dans ce cas, plus la valeur est élevée, plus la quantité d'oxygène disponible pour le

travail musculaire est importante et meilleure sera la performance. En fait, la même expression : la fraction de $VO_2\text{max}$ utilisée ou le pourcentage de $VO_2\text{max}$ pouvant être maintenu en compétition sur une distance donnée, représente aussi la troisième composante de l'aptitude aérobie, c'est à dire l'endurance (voir plus loin).

- **Indices biomécaniques**

On a constaté qu'à vitesse donnée, l'individu le moins technique exécutait un plus grand nombre de mouvements de bras ou de jambes. En corollaire, la distance parcourue par cycle locomoteur, normalisée ou non par la longueur des segments est souvent utilisée comme indice de l'économie de locomotion.

- **Importance de l'économie de locomotion**

Dans les faits, rien ne vaut la courbe VO_2 / Vitesse pour juger des variations intra ou interindividuelles d'économie de locomotion. Ceci étant dit et malgré les réserves émises au sujet de CE (coût énergétique d'un km), Millet et al., (1999) citent plusieurs études, sans toutefois rapporter les valeurs, qui indiquent de bonnes corrélations entre CE et la performance en natation, cyclisme et course à pied. En cyclisme sur piste intérieure, dans les conditions environnementales et d'équipement semblables, à vitesse égale, les meilleurs cyclistes consomment nettement moins d'oxygène que les autres, (Marion et Léger, 1989). Millet et al. (1999) rapportent les valeurs de CE inférieures pour des triathlètes élites, seniors, hommes ou femmes (CE = 177.4 et 173.7 ml/kg/km) par rapport à celles des juniors (CE = 183.9 et 179.1) et pour les élites hommes seniors " longue distance " (CE = 147.0) par rapport à la " courte distance " (CE = 177.4) en triathlon. Par conséquent, plus que le $VO_2\text{max}$. le CE semble mieux discriminer les athlètes. Cependant, CE fut mesuré à des vitesses plus lentes au cours des triathlons " longue distance " et pour les juniors et tel que mentionné précédemment, il n'est pas exclu que ce facteur explique en partie du moins, les résultats rapportés. Enfin, citant une étude de Dengel et al. (1988), Millet et al. (1999) rapportent que les fractions de $VO_2\text{max}$ soutenues à une vitesse donnée en natation, en cyclisme et en course à pied sont respectivement fortement corrélées à la performance de chacune des épreuves du triathlon ($r = 0.9$ en natation, 0.78 en cyclisme et 0.86 en course à pied). Une revue récente de Hauswirth et Brisswalter (1999) souligne de façon détaillée l'importance de l'économie de locomotion.

En ce qui concerne les indices biomécaniques, particulièrement en natation, la performance serait davantage déterminée par l'efficacité motrice que par $VO_2\text{max}$ (Kohrt et al., 1987 cité par Millet et al., 1999). Babineau et Léger (1999) rapportent aussi des corrélations élevées entre la performance réalisée en natation ou en course à pied et la distance parcourue respectivement en natation par cycle de bras (DB) et en course, par cycle de jambes (DJ), normalisée (N) ou non par la longueur des segments ; DB : $r = 0.72$, et DBN : $r = 0.62$ en natation et DJ : $r = 0.56$ et DJN : $r = 0.75$ en course).

En résumé, tout comme $VO_2\text{max}$, l'économie de locomotion apparaît comme un facteur clé de la performance de longue durée.

ENDURANCE AEROBIE

Concept

Un individu endurant est celui qui, à $VO_2\text{max}$ et à économie de locomotion égaux peut maintenir une certaine vitesse de locomotion nettement plus longtemps qu'un autre ; tellement plus longtemps que ni la motivation, ni l'aptitude anaérobie ne peuvent expliquer cette différence. Toutefois, si les différences sont petites, l'ambiguïté est entière et au lieu de mesurer t_{lim} à 100% de $VO_2\text{max}$, on aura recours à de nombreuses autres approches ; comme le « seuil » anaérobie (lactique, ventilatoire ou pulsatif), la puissance critique ou la pente de la relation pourcentage de $VO_2\text{max}$ / durée, tel qu'on observe en compétition sur différentes distances pour le même athlète.

Problème du « seuil » lactique de 4mM pour les enfants

Sans couvrir en détail toutes ces méthodes, précisons seulement que le « seuil anaérobie » est souvent mesuré comme étant la vitesse de locomotion correspondant à une concentration de lactate sanguin de 4mM. Si cela correspond à peu près au point d'inflexion de la courbe Lactate / Vitesse chez l'adulte, tel n'est absolument pas le cas en période de croissance (Williams et Armstrong, 1991), de sorte que cette méthode est tout à fait inappropriée pour faire le suivi longitudinal ou encore pour doser l'intensité de l'entraînement en période de croissance (Léger, Bosquet, Folch, 1999).

Importance de l'endurance

Que l'on mesure le temps limite à tel ou tel pourcentage de $VO_2\text{max}$ ou que l'on mesure le pourcentage de $VO_2\text{max}$ soutenu pour une durée donnée revient pratiquement au même. Selon une compilation de données de la littérature effectuée par Millet et al. (1999), notons alors que les fractions de $VO_2\text{max}$ soutenues sur des triatlons " courte distance " par des athlètes moyennement entraînés sont de 64 à 74%, en cyclisme et de 78 à 83% en course à pied. Pour une course de marathon, Sjodin et Svedenhag (1985) avaient rapporté des corrélations qui variaient entre 0.55 et 0.70 avec la fraction de VO_2 utilisée durant la course. Fait étonnant dans cette étude, les marathonniens réussissent à se maintenir à 75-85% $VO_2\text{max}$ pour la durée du marathon et donc à un % $VO_2\text{max}$ semblable à celui rapporté plus haut pour les triathlètes sur une distance quatre fois plus courte sur 10 km, effectuée, il faut le préciser, après les épreuves de nage et de cyclisme.

Sjodin et Svedenhag (1985) ont aussi démontré que la vitesse correspondant au seuil lactique 4mM était fortement corrélée à la performance du marathon, que le groupe, soit hétérogène (élite + intermédiaire + novice, $r = 0.96$) ou même homogène (élite seulement, $r = 0.83$). Cependant, il faut remarquer que si le seuil est exprimé en km h^{-1} ceci équivaut à mesurer simultanément les trois composantes de l'aptitude aérobie ($VO_2\text{max}$, économie gestuelle et endurance) ce qui explique les corrélations élevées. Quand le seuil est normalisé pour tenir compte de $VO_2\text{max}$ et de l'économie de course et est ainsi exprimée en pourcentage de $VO_2\text{max}$ plutôt qu'en km h^{-1} , sa corrélation avec la performance au marathon est nettement moindre et est alors similaire à celle obtenue pour $VO_2\text{max}$ (Sjodin et Svedenhag, 1985). L'importance du facteur endurance demeure cependant considérable.

PROBLEMES D'UNITES

Est-il justifié d'exprimer VO_2 ou VO_{2max} en $ml\ kg^{-1}\ min^{-1}$.? Pourquoi exprime t-on VO_2 et VO_{2max} par rapport au poids du corps ? Dans la plupart des activités de locomotion, c'est l'élévation de la vitesse déplacement de la masse corporelle qui engendre une augmentation du VO_2 d'où ce choix de l'unité $ml\ kg^{-1}\ min^{-1}$. Afin de maintenir la dépense d'énergie pour une vitesse donnée, on divise donc le VO_2 consommé ($L\ min^{-1}$) par le poids corporel. Il en est ainsi pour VO_{2max} absolu ($L\ min^{-1}$) qui, à niveau d'entraînement égal, est plus élevé chez le sujet présentant une plus grande masse musculaire. Cependant, un VO_{2max} absolu n'est avantageux que pour travailler sans déplacement contre une résistance extérieure de freinage mécanique (ergocycle) alors qu'en course ou même en cyclisme où la masse corporelle doit être déplacée contre la résistance de l'air, cet avantage est perdu car la dépense d'énergie dépend du poids ou du volume du sujet. Par conséquent, pour mieux rendre compte du potentiel d'individus de gabarits différents à réaliser des performances de longue durée où le poids du corps est un facteur de résistance, on divise VO_{2max} absolu ($L\ min^{-1}$) par le poids du corps (VO_{2max} relatif en $ml\ kg^{-1}\ min^{-1}$).

Il en est de même en période de croissance. VO_{2max} absolu augmente chez les garçons du début à la fin de la croissance et jusqu'au pic pubertaire chez les filles (fig. 6a), mais pour savoir si cette augmentation résulte de celle de la masse musculaire ou d'une véritable amélioration de la fonction cardiovasculaire ou du métabolisme aérobie, on divise VO_{2max} absolu par le poids du corps.

On constate alors que VO_{2max} relatif reste constant chez les garçons et diminue légèrement chez les filles (fig. 6b). Pour la dépense énergétique à une vitesse de course donnée, on observe une diminution en fonction de la croissance (fig. 7). Pour une vitesse donnée, les jeunes d'âges plus avancés possèdent donc une plus grande " réserve " étant encore loin de leur maximum.

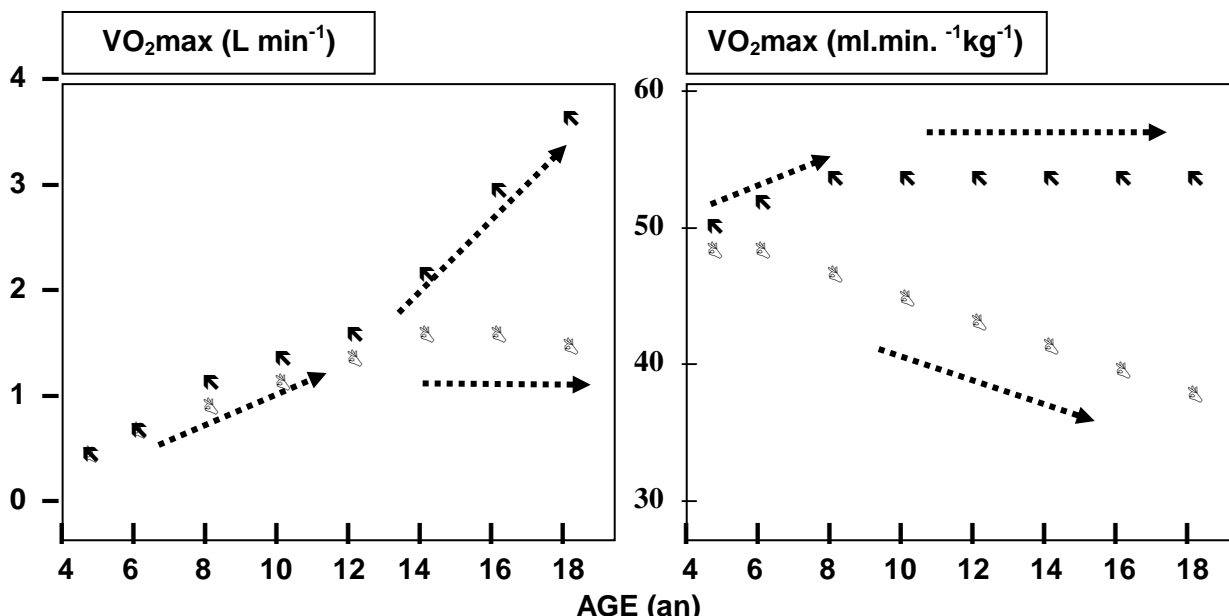


Figure 6 : Exprimé en litre par minute $L.min^{-1}$ le VO_{2max} absolu augmente linéairement jusqu' à 18 ans chez les garçons et jusqu' à 14 -15 ans chez les filles... alors que, exprimé en millilitre par minute et par kg de poids ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$) le VO_{2max} relatif semble ne pas augmenter chez les garçons, et diminue chez les filles.

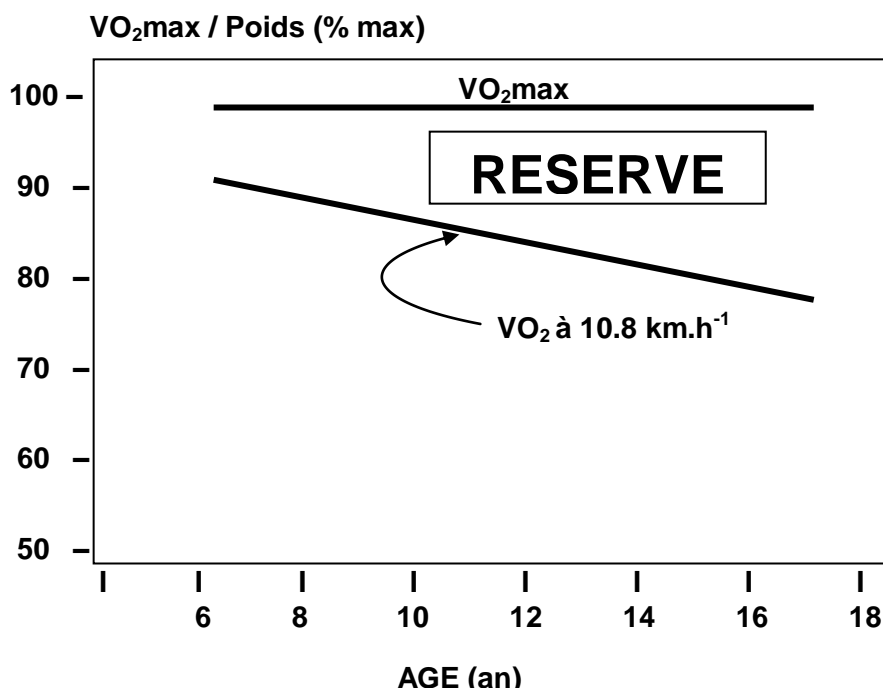


Figure 7 : Augmentation de la réserve fonctionnelle aérobie en période de croissance. Adapté de Bar Or, 1987.

Winter (1992), qui a recensé les différentes façons d'exprimer le VO₂max, considère que les équations allométriques constituent la meilleure façon de normaliser les données des enfants. Ainsi, le VO₂max (Y) est lié au poids corporel (X) élevé à la puissance b :

$$Y = aX^b \quad (1)$$

Cette équation est facilement obtenue en calculant une régression linéaire avec le logarithme naturel (ln) de chaque variable :

$$\ln Y = a + b \ln X \quad (2)$$

ce qui, algébriquement, équivaut à :

$$Y = e^{(a + b \ln X)} \quad (3)$$

ou

$$Y = e^a e^{b \ln X} \quad (4)$$

ou

$$Y = a' X^b \quad (5)$$

ce qui nous ramène à l'équation (1).

En utilisant cette approche allométrique, Bergh et al. (1991) ont trouvé que le VO₂ sous-maximal et le VO₂max étaient liés à la masse corporelle élevée des puissances de 0.76 et 0.71, respectivement. Ces valeurs ont été obtenues chez des sujets adultes, mais Bergh et al. ont calculé un exposant similaire (0.74) chez les enfants à partir des données de Astrand (1991). La puissance de 0.71 pour le VO₂max concorde avec les travaux de Andersen, Seliger, Rutenfranz et Mocellin (1974). En effet, ces auteurs rapportent que le VO₂max chez les garçons exprimé en l•min⁻¹ augmente plus vite que prédit sur la base de la taille élevée au carré tel que suggéré par les lois dimensionnelles (Astrand et Rodhal, 1970).

Pour rester dans le cadre de cette discussion, il faut noter que les différences entre les enfants et les adultes quant au coût du VO_2 à la course diminue lorsque le VO_2 est exprimé en $ml \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$ de la surface corporelle (Rowland 1989) (figure 8). En accord avec les lois dimensionnelles, le m^2 est l'équivalent de $kg^{0.667}$, et donc différent de $kg^{0.75}$ obtenu avec la méthode allométrique. Au lieu d'utiliser les lois dimensionnelles, on peut utiliser les normes taille-poids du CAHPER (Quinney et al., 1982) et calculer la surface corporelle (m^2) avec la formule Dubois-Dubois (Consolazio et al., 1963); l'approche allométrique indique alors que le poids (P , kg) est lié à la surface corporelle (SC , m^2) avec une puissance de 1.461 (i.e. $SC^{1.461}$). Il s'ensuit que $P^{0.75}$ est équivalent à $(SC^{1.461})^{0.75}$ ou $SC^{1.461 \times 0.75}$ ou $SC^{1.096}$, ceci étant très près de SC^1 , tel que suggéré par Rowland (1989). En général, rapporter le VO_2 en fonction de la taille, du poids et de la surface corporelle devrait produire des résultats équivalents puisque ces trois variables sont interdépendantes. Cependant, sur une base individuelle, il est plus logique que le coût de l' O_2 à la course soit plutôt proportionnel au poids qu'à la taille ou à la surface corporelle. Exprimer le VO_2 en fonction du poids corporel élevé à une puissance de l'ordre de 0,75 est donc préférable.

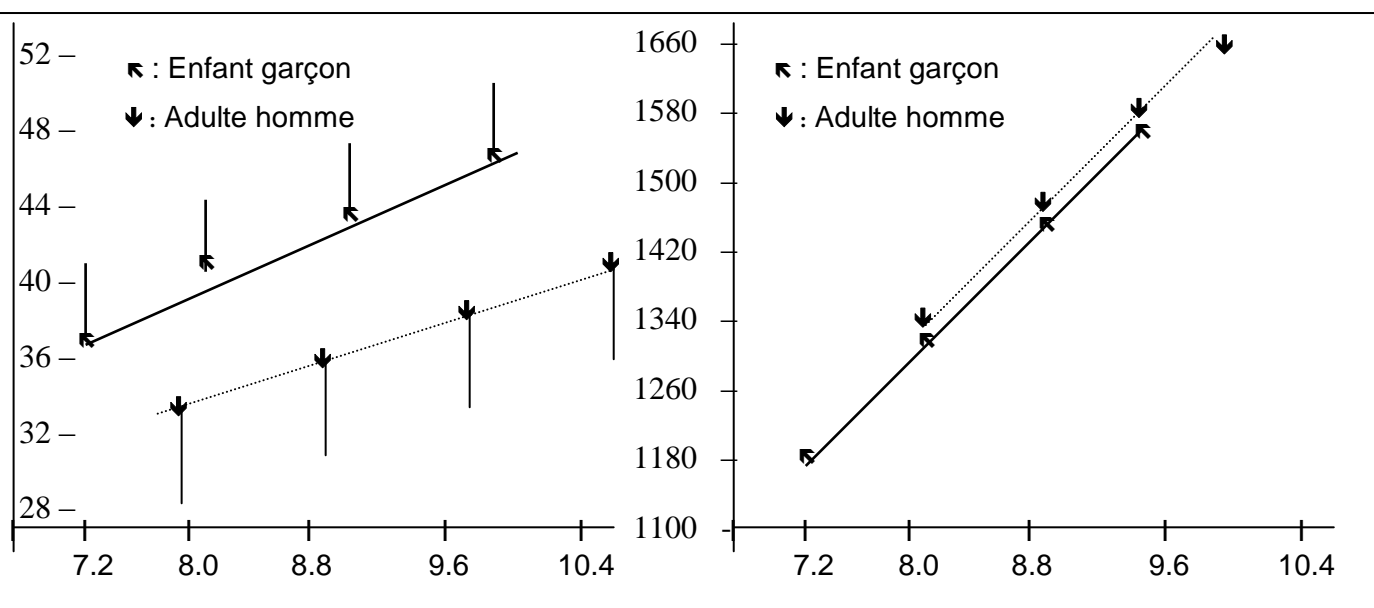


Figure 8 : VO_2 max par kg de masse corporelle (a) et par m^2 de surface corporelle (b) en fonction de la vitesse chez des garçons de 10 à 12 ans et de jeunes adultes. On note que les différences entre jeunes et adultes disparaissent lorsque le VO_2 max est standardisé en fonction de la surface corporelle. Adapté de Rowland et al., 1987.

Le fait de diviser VO_2 par le poids exposant 0.75 plutôt que par le poids ($b = 1$), annule les différences qui étaient observées entre les enfants et les adultes lorsque le VO_2 sous-maximal était exprimé en $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$. Ces auteurs n'indiquent cependant pas la puissance et à laquelle il faudrait élever la masse corporelle. D'autre part, en utilisant la puissance 0.75 avec les données de Léger et al. (1986), on observe une augmentation du VO_2 sous-maximal ($ml \cdot kg^{-0.75} \cdot min^{-1}$) avec l'âge. Autre conséquence en ce qui concerne le VO_2 max cette fois, le fait de l'exprimer en $ml \cdot kg^{-0.75} \cdot min^{-1}$

plutôt qu'en $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, donne un profil complètement différent de la courbe VO_2max -âge. Par exemple, en utilisant la puissance 0.75 (ou 0.71) pour exprimer le VO_2max , on s'attend à ce que le VO_2max des garçons augmente jusqu'à la fin de la croissance au lieu d'être relativement stable comme lorsqu'il est exprimé en $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ (figure 9). Chez les filles, le VO_2max par $\text{kg}^{0.75}$ ou $\text{kg}^{0.71}$ augmentera selon un patron logarithmique, mais dans des proportions plus faibles que chez les garçons au lieu de diminuer lentement dès l'âge de 6 ans, lorsqu'on utilise les unités $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ (figure 9). Dans un abstract relativement récent, Welsman, Armstrong, Winter et Kirby (1993) rapportent aussi que le VO_2max exprimé au moyen d'une fonction puissance de la masse corporelle se comporte différemment du VO_2max par kg de poids corporel pendant la croissance, mais ni la courbe ni la valeur de puissance ne sont rapportées. Cependant, plus récemment, (Armstrong et Welsman, 1994; Armstrong et al., 1996) rapportent une valeur de -0.798 pour les garçons et les filles pré pubères, pubères et adultes, valeur qui est supérieure au -0.75 et à la valeur théorique de -0.667. Ils suggèrent que cette différence est le reflet du processus de croissance irrégulier et des changements différentiels qui interviennent dans les proportions des segments corporels. On a tendance à penser que les performances de course augmentent pendant la croissance parce que le VO_2max ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) reste relativement stable alors que les besoins en VO_2 ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) diminuent.

Au contraire, il est plus plausible que le VO_2max ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-0.75}\cdot\text{min}^{-1}$) augmente alors que les besoins en VO_2 ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-0.75}\cdot\text{min}^{-1}$) restent constants. Ainsi, quelle que soit l'unité choisie, la performance elle-même ou la puissance aérobie maximale effectivement développée n'est pas affectée par l'âge mais le profil de ses composantes : le VO_2max et les besoins en VO_2 sous-maximal, le seront. Aussi, en choisissant la bonne unité, sur tapis roulant comme sur bicyclette ergométrique, les enfants et les adultes auront des besoins en énergie similaires, ce qui apparaît plus logique puisqu'il n'y a pas vraiment de raison pour expliquer que les enfants soient moins efficaces que les adultes. En outre, ceci est en accord avec le fait que l'augmentation d'énergie requise mesurée lors de l'augmentation d'une résistance verticale et horizontale sur tapis roulant, est identique entre les enfants et les adultes (Cooke et al., 1991).

La similitude entre le rendement mécanique des enfants et des adultes ne signifie pas que le coût énergétique de la course est le même à toutes les vitesses de course, que VO_2 soit exprimé en $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-0.75}\cdot\text{min}^{-1}$ ou en $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, parce que la quantité du travail fourni n'est pas proportionnelle à la vitesse de course des individus de différentes tailles. Par exemple, les analyses biomécaniques de la course à trois vitesses différentes, chez les enfants et les adultes (Ebbeling et al., 1992) révèlent que les adultes fournissent approximativement 1.8 fois plus de travail par kg et par enjambée que les enfants. Aussi, parce qu'ils font de plus petites foulées, les enfants doivent courir avec une haute fréquence afin d'atteindre la même vitesse, ce qui augmente leur travail externe total. Cependant, faire un ajustement pour le poids corporel avec l'approche allométrique, même si la vitesse de course est utilisée comme variable indépendante, compense pour ces problèmes. D'autre part, cette dissociation entre la vitesse de course et le travail mécanique peut aussi expliquer pourquoi les lois

dimensionnelles ne s'appliquent pas exactement à la course. Outre cette dissociation, Rowland (1992) explique les valeurs plus élevées de VO_2 par kg, en course chez l'enfant, par une plus grande utilisation des lipides, mais les données de ce même groupe (Ebbeling et al., 1992) ne montrent aucune différence du rapport VCO_2/VO_2 , témoin de la proportion des lipides utilisés, entre les enfants et les adultes. Ce facteur, s'il est valide, serait aussi valide pour les données obtenues lors d'un exercice sur bicyclette ergométrique, ce qui n'est pas le cas. L'autre facteur pouvant en partie expliquer l'efficacité plus faible des enfants à la course, est le fait que leur petite masse corporelle emmagasine et restitue probablement moins d'énergie élastique. Il a d'ailleurs été constaté que le coût de VO_2 était identique ($L \cdot \text{min}^{-1}$) entre les enfants et les adultes sur une bicyclette ergométrique, ceci étant lié au fait que

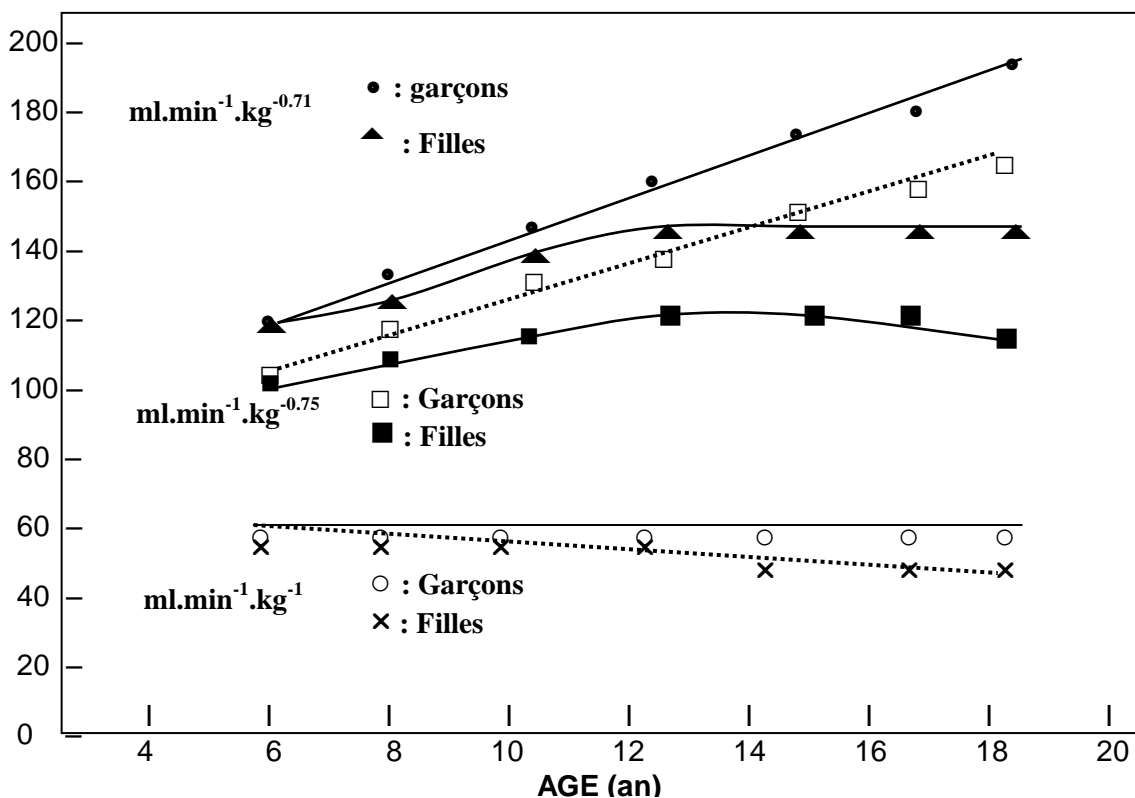


Figure 9 : $VO_2\text{max}$ par kg, par $\text{kg}^{-0.75}$ et par $\text{kg}^{-0.71}$ en fonction de l'âge et du sexe. Les valeurs de $VO_2\text{max}$ sur tapis roulant chez des enfants et des adolescents non entraînés ont été calculées à partir des données de Falgairette (1989) où le $VO_2\text{max}$ par kg était égal à : $48.21 + 0.317 \text{ âge}$ pour les garçons (82 groupes, $n = 1559$) et : $49.74 + 0.408 \text{ âge}$ pour les filles (44 groupes, $n = 836$).

l'énergie élastique est moins importante lors d'un mouvement angulaire de pédalage. Pour supporter cet argument, Bosco et al. (1987) observe une relation négative entre le coût énergétique de course et la restitution de l'énergie élastique ($r = - 0.66$) mesurée par le rapport du rendement mécanique d'un saut, avec ou sans étirement ou accroupissement préalable avant l'extension des jambes.

Bien que l'influence indirecte de l'âge avec ses facteurs concomitants (métabolisme de repos, fréquence des foulées, style de course, énergie élastique, coût ventilatoire, composition corporelle) dans le calcul du VO_2 lors d'activités impliquant le déplacement du poids corporel ne soit pas complètement exclue (Roland, 1996), l'approche allométrique donne en principe une meilleure unité

pour exprimer le VO_2 en fonction de l'intensité d'exercice, à condition que l'erreur résiduelle du modèle soit petite et similaire pour toute l'étendue des poids corporels.

Un des problèmes de l'approche allométrique toutefois, est le manque de constance dans la valeur des puissances rapportées (Roland, 1992) surtout sur une base individuelle (Roland, 1996). L'approche allométrique est tout de même une approche de choix lorsqu'on compare les individus de différents gabarits, ce qui se produit pendant la croissance. Cependant, les $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ sont plus pratiques et peuvent être utilisés pour toutes les catégories d'âge sauf si les groupes en question contiennent des personnes de très grandes et de très petites corpulences.

VO₂MAX RELATIF A LA MASSE MAIGRE

La signification du VO_2 max relatif à la masse maigre dépend aussi du but poursuivi. Il peut être utilisé soit comme indicateur du système aérobie ou comme indicateur de la performance aérobie.

Un indicateur du système aérobie. Le VO_2 relatif à la masse maigre est probablement la meilleure unité pour établir les différences inter- et intra-individuelles du système aérobie (30). Parce que la masse maigre est inférieure à la masse totale du corps, les valeurs du VO_2 max ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) relatif à la masse maigre sont supérieures aux valeurs de VO_2 max ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) exprimées en fonction du poids corporel total. Par exemple, un VO_2 max de $60 ml \cdot kg^{-1}$ de poids corporel $\cdot min^{-1}$ correspond à un VO_2 max de $70 ml \cdot kg^{-1}$ de masse maigre (MM) $\cdot min^{-1}$ chez un individu pesant 70 kg et ayant une masse maigre de 60 kg. Chez l'adulte, la masse maigre est estimée de façon satisfaisante à partir de la mesure de densité corporelle et de l'équation de Siri (1961). Chez l'enfant cependant, ce n'est que plus tard que Lohman (1989) développa des équations ajustées en fonction de l'âge en période de croissance. Le même groupe a produit des équations pour les jeunes permettant d'estimer la masse maigre à partir de simples mesures anthropométriques (1988).

Un indicateur de la performance aérobie. Le VO_2 max relatif à la masse maigre n'est que d'une utilité limitée comme témoin des aptitudes à réaliser des efforts impliquant le déplacement de la masse corporelle puisque dans ce cas la résistance totale (ainsi que l'énergie requise) dépend de la masse totale déplacée et non de la masse maigre, le rapport entre les deux n'étant pas constant en raison des variations de masse grasse. Cette unité n'est pas plus utile comme témoin des performances réalisées entre des charges externes puisque dans ce cas, l'énergie dépensée est indépendante de la masse maigre comme de la masse corporelle; c'est donc le VO_2 max absolu qui compte.

A VO_2 max égal, le jeune enfant ne pourra donc pas s'entraîner à la même vitesse que l'adulte puisqu'il s'exerce alors à un plus haut pourcentage de VO_2 max.

Sans entrer dans les détails, calculer de tels rapports (VO_2 absolu / poids) est mathématiquement incorrect. Peu importe, on le fait pour des raisons pratiques et on continuera à le faire. Bien sûr, le poids du corps est responsable de l'augmentation de la dépense d'énergie à la course pour une vitesse donnée. Il faut apporter une correction mais si cette correction était bonne, le coût énergétique ainsi corrigé en $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ devrait être constant et indépendant du poids du corps. Or, tel n'est pas le cas. Comme Bergh et al. (1991) l'ont démontré avec des athlètes sélectionnés pour leurs poids très différents et ce dans diverses disciplines sportives, le coût énergétique mesuré à une

vitesse donnée, révèle que les individus les plus lourds, contrairement à toute attente, sont les plus économiques ! C'est que la correction apportée est exagérée. En période de croissance, si les jeunes plus âgés apparaissent moins économiques, ce n'est pas tant à cause de leur âge mais à cause de leur masse corporelle supérieure associée à une correction trop importante due au poids corporel.

En utilisant l'approche dite " allométrique ", on peut déterminer la correction appropriée tout en tenant compte du poids corporel. Tant chez les jeunes (Armstrong et al., 1978 ; Rowland, 1996 et Welsman, 1996) que chez les adultes (Berg et al, 1991), plutôt que de diviser par le poids exposant 1, les calculs réalisés par ces auteurs indiquent qu'il est préférable de diviser par le poids du corps exposant 0.71 ou 0.75. De cette façon, le coût énergétique demeure stable quel que soit le poids ou l'âge des sujets.

On note aussi que le $VO_2\text{max}$ augmente en période de croissance au lieu de rester stable (haut de la figure 9). Autrement dit, outre l'amélioration due à l'augmentation de la masse musculaire, cette technique permet de rendre compte de l'amélioration de la fonction cardiovasculaire et du métabolisme aérobie au cours de la croissance, amélioration fortement masquée lorsque $VO_2\text{max}$ est exprimé en $\text{ml kg}^{-1} \text{min}^{-1}$.

C'est donc une image tout à fait différente de celle qui nous est traditionnellement présentée. C'est peut être complexe et déroutant, mais c'est important à savoir pour ceux qui interviennent auprès des jeunes.

DEVELOPPEMENT DES APTITUDES AEROBIES

LA CAPACITE D'ENTRAINEMENT

La capacité d'entraînement traduit la sensibilité de l'organisme aux stimuli de l'entraînement. Elle correspond au concept anglais « trainability ». Elle s'exprime souvent par le pourcentage d'amélioration par rapport à la valeur initiale. Si la capacité d'entraînement du $VO_2\text{max}$ est bien documentée, celle de l'économie de locomotion et celle de l'endurance le sont moins et sont plus controversées.

- **$VO_2\text{max}$**

La capacité d'entraînement des aptitudes aérobie en période de croissance suite à un régime d'entraînement adéquat, est possible. En effet, sur la vingtaine d'études portant sur cette problématique, Krahenbuhl, Skinner et Kohrt (1985) ainsi que Rowland (1996) ont noté qu'au moins la moitié avait rapporté des améliorations de 10 à 25%. Si certaines de ces études n'ont pas démontré de progrès significatif, c'est que l'intensité de l'entraînement n'était probablement pas suffisante (Rowland, 1996). En effet, on a trop souvent entraîné les enfants comme on entraîne les adultes. Chez ces derniers, un seuil de 40 à 60% de $VO_2\text{max}$. a souvent été identifié comme efficace (ACSM, 1986). Or, nous savons que le seuil minimal auquel il faut s'entraîner varie avec le niveau de $VO_2\text{max}$ atteint. À 60% de $VO_2\text{max}$, un athlète de haut niveau régressera alors qu'après un repos forcé au lit de trois semaines, le simple retour à ses activités quotidiennes (c'est-à-dire moins de 40% de $VO_2\text{max}$) suffit pour reprendre sa forme initiale (Saltin et al., 1968). Or l'enfant, on le sait, (fig. 4) présente un

VO₂max relativement élevé par rapport à l'adulte moyen. Cet enfant qui est toujours en mouvement, devra s'entraîner à une intensité supérieure à 70% voire 80% de VO₂max si l'on veut observer des progrès notables de sa consommation maximale d'oxygène.

Nous avons pris l'exemple du VO₂max pour illustrer les différences entre enfants et adultes. Bien entendu, même si le VO₂max est important, il ne s'agit que l'un des trois composantes de l'aptitude aérobie. Les seuils indiqués ne sont donc valides que pour améliorer le VO₂max et non pour améliorer l'endurance pour laquelle la durée ou le volume apparaissent plus importants que le facteur intensité.

- **Rendement mécanique**

Quant à la capacité d'entraînement du rendement mécanique, les données sont non seulement limitées chez les enfants mais apparaissent en outre contradictoires et pas toujours convaincantes (Hauswirth et Brisswalter, 1999).

Une étude récente de Unnithan et coll. (1996) indique qu'à des vitesses de 8 et 9.6 km•h⁻¹, le VO₂ requis de 15 enfants de 11 ans entraînés à la course (VO₂max = 60.5 ml•kg⁻¹•min⁻¹) ne différait pas de celui d'un groupe contrôle non-entraîné (VO₂max = 51.1 ml•kg⁻¹•min⁻¹, n = 18). Le fait d'exprimer le VO₂ requis en ml•kg⁻¹•min⁻¹ introduit, rappelons-le, un biais mathématique qui laisse croire que le rendement mécanique s'améliore avec l'âge en période de croissance. Cette tendance ne plaide pas en faveur des études qui tentent de démontrer une amélioration du rendement mécanique résultant d'entraînements couvrant des durées prolongées au cours de la croissance. Du fait du vieillissement des populations étudiées, un groupe contrôle au niveau d'activité bien maîtrisé en période de croissance s'avère capital dans ce type d'étude. A notre connaissance, aucune étude de ce genre n'a été réalisée à ce jour.

Chez l'adulte, certaines études (Conley et al. 1984) indiquent que des améliorations de l'ordre de 5 à 9% sont possibles suite à des entraînements intensifs par intervalle. Mais de leur côté, Scrimgeour et al. (1986) rapportent que c'est plutôt le volume d'entraînement qui compte pour améliorer l'économie de course. Sauf pour les sports de grande coordination motrice (gym, natation...), il semble que l'entraînement n'affecte guère ou peu le rendement mécanique (Rowland, 1996).

Ceci ne signifie pas que ce facteur n'est pas important puisque, comme précédemment indiqué, les différences inter-individuelles surtout en période de croissance, du moins en course et lorsque VO₂ est exprimé en ml•kg⁻¹•min⁻¹, affectent directement la performance aérobie. Conjointement aux deux autres composantes de l'aptitude aérobie (VO₂max et endurance aérobie), l'évaluation de ce paramètre permet de déterminer les points forts et les points faibles de l'individu et par conséquent de mieux orienter son entraînement. Cependant, en ce qui concerne le rendement mécanique en course, compte tenu des incertitudes actuelles et surtout des très faibles améliorations attendues, il semble ne pas valoir la peine de consacrer trop de temps à l'entraîner. Par contre, synonyme d'amélioration technique, son amélioration en natation et à degré moindre en cyclisme paraît essentielle.

ECONOMIE DE COURSE AU COURS DE LA CROISSANCE

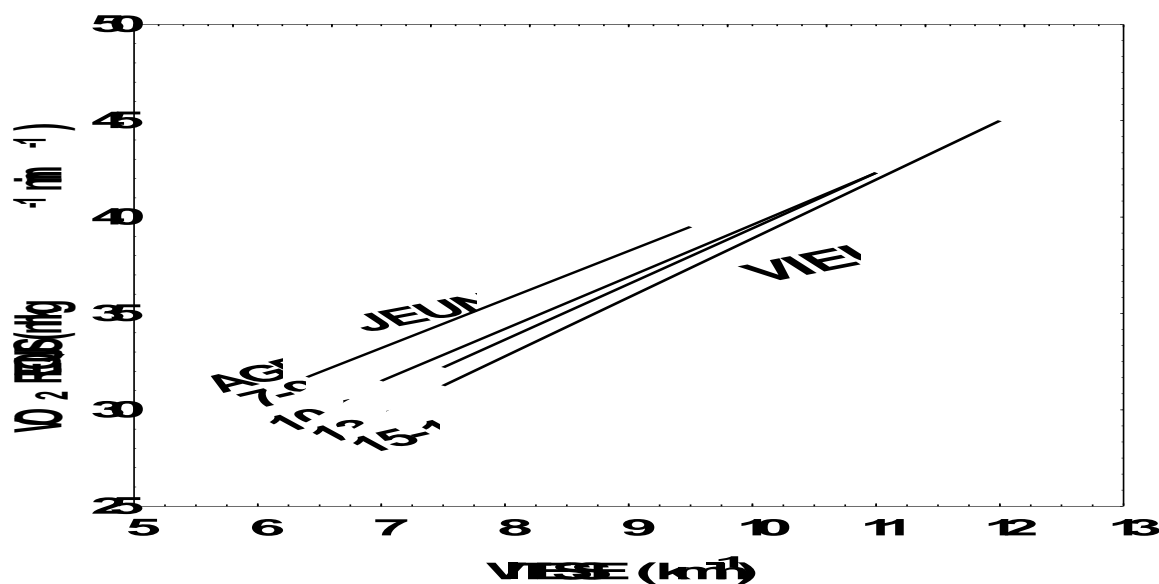


Figure 10 : Economie de course. En période de croissance, les jeunes plus âgés semblent les plus économes ” Adapté de Léger et al., 1986.

• Endurance aérobie

Bien que l'endurance aérobie soit un facteur susceptible d'être fortement modifié par un entraînement adapté (Londree, 1997), les données sur sa capacité d'entraînement sont assez limitées. Il est en conséquence difficile d'en fixer actuellement les critères définitifs. Comme l'a démontré Londree (1997) en analysant 29 études sur la capacité d'entraînement du seuil lactique et du seuil ventilatoire chez des adultes, l'intensité demeure cependant un facteur clef. Selon ces études, il est démontré que si le fait de s'entraîner à une intensité correspondant au « seuil » anaérobie peut être efficace pour améliorer les dits seuils de sujets préalablement sédentaires, cela s'avère insuffisant pour des sujets préalablement entraînés. Il faut donc entraîner l'endurance à des intensités proches de celles atteintes en compétition. Chez les jeunes, la question la plus importante est de savoir si un entraînement en endurance présente des risques pour la croissance osseuse comme on a souvent tendance à le souligner (Borms, 1986). A notre avis, les données actuelles ne sont guère convaincantes à ce sujet (Borms, 1986 ; Hughson et al., 1987 ; Sheehan, 1983 ; Weiss, 1986), ce qui ne signifie pas qu'il faille pousser les enfants uniquement dans ce type d'entraînement. A l'opposé il convient aussi de ne pas tomber dans l'excès inverse et être alarmiste sans raison. On se souviendra de l'époque assez récente où l'on croyait que les femmes étaient trop fragiles pour les courses de longue distance alors absentes des Jeux olympiques. Ces conceptions ont bien évoluées depuis...

PROBLEMES SPECIFIQUES A L'ENTRAINEMENT DES ENFANTS ET DES ADOLESCENTS

VO₂max et intensité de l'entraînement

Un enfant de 13 ans est évalué et son VO₂max. est semblable à celui de son père (53 ml•kg⁻¹•min⁻¹). L'enfant pourra donc s'entraîner avec son père en courant à ses côtés. On aura vite fait de réaliser l'erreur. En effet, comme on l'a vu précédemment, même si le VO₂max. rapporté à la masse corporelle est élevé chez l'enfant, l'énergie qu'il requiert pour courir à une vitesse donnée est aussi plus élevée que chez l'adulte (fig. 10), de sorte qu'à VO₂max. égal, l'enfant s'exerce à un plus grand pourcentage de VO₂max. que l'adulte et se fatigue donc plus vite.

Pourcentage de VO₂max vs pourcentage de VAM

Chez l'adulte, en course à pied et sur ergocycle, il existe une relation univoque entre pourcentage de VO₂max. et pourcentage de VAM ou pourcentage de PAM, c'est-à-dire que 80% de VO₂max correspond à 80% de VAM, ce qui est très utile à des fins d'entraînement.

D'autre part, cette univocité n'est pas valide pour d'autres activités de locomotion comme la natation, le cyclisme sur route... puisque la relation VO₂ requis - Vitesse est curviligne ou ne passe pas par l'origine.

De plus, chez l'enfant qui est moins efficace que l'adulte en course (fig.10), l'intercept est nettement au-dessus de l'origine de sorte que la valeur du pourcentage de VAM est inférieure à la valeur correspondante au pourcentage de VO₂max. Par exemple, 80%VO₂max peut correspondre à 70%VAM selon l'âge de l'enfant. D'autre part, il est difficile de préciser l'équivalence exacte compte tenu des différences observées dans la littérature (fig. 4, partie supérieure vs partie inférieure). Néanmoins, un aspect paraît évident. Comme avec l'adulte, on ne peut entraîner un enfant à 80%VAM en pensant qu'il sera alors à 80% VO₂max. Même à pourcentage de VAM égal et pas juste à vitesse absolue (km•h⁻¹) égale, l'enfant est davantage sollicité que l'adulte et se fatigue donc plus vite que celui-ci. Ceci est d'ailleurs confirmé par la durée effectivement maintenue par l'enfant par rapport à l'adulte à différents pourcentages de VAM tel qu'explicité au paragraphe suivant.

- **Détermination de la VAM**

La VAM mesurée diffère en fonction de l'ergomètre utilisé. En effet, la VAM est différente en course, sur bicyclette, en natation, en patins... et à la course navette. Depuis la conception du test navette de 20 m, certains entraînent les jeunes à la course conventionnelle en fonction de la VAM atteinte lors de la course navette de 20 m. C'est aussi absurde que de les entraîner en course à tel ou tel pourcentage de la VAM mesurée à vélo sur route. Il y a des équivalences entre ces deux formes de course et il faut en tenir compte (Cazorla et Léger, 1993 ; Berthoin et al., 1996) :

$VAM_{\text{course}} = -8,18 + 1,82 VAM_{\text{navette}}$ (équation valide pour VAM > 10 km•h⁻¹).

Ainsi, celui qui termine le test navette de 20 m à $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ aurait une VAM correspondante de $13,7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en course conventionnelle. De plus, il faut se rappeler (section précédente) que l'enfant doit s'entraîner à un %VAM inférieur à celui de l'adulte pour un % VO_2max égal.

D'autre part, certaines études remettent en cause la notion de VAM car il y aurait autant de VAM que de protocoles d'effort (Billat et al., 1996). En effet, selon la durée des paliers ou selon l'incrément de vitesse d'un palier à l'autre, la vitesse atteinte en fin de test varie beaucoup. Mais ce problème est dû au non respect de certaines règles de normalisation. En effet, si les paliers sont trop longs (ex. 4-5 min) ou l'accélération trop lente (moins de $2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ par palier), la fatigue cumulative empêchera le sujet d'atteindre VO_2max et la vitesse maximale atteinte en fin de test sous-estime alors la véritable VAM. D'autre part, si les paliers sont trop courts (ex.: 1 min avec augmentation de $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par palier) ou l'accélération trop rapide (plus de $4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ par palier selon le VO_2 requis moyen atteint en état stable), la fatigue cumulative étant moindre à chaque palier, le sujet sera capable d'en faire plus. Dans ce cas, le VO_2 mesuré à chaque palier n'aura pas le temps d'atteindre l'état stable de sorte que pour un même VO_2max , le sujet atteindra des vitesses supra maximales traduisant une plus forte sollicitation du métabolisme anaérobie. Il est donc suggéré de limiter l'accélération à 2 ou 3 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ par min ce qui correspond à $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par palier de 2 min ou à $\frac{1}{2} \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par palier de 1 min pour obtenir une VAM valide. Tout ceci est confirmé par une étude récente de Bakhouya, (1999).

Durée maximale d'un entraînement à différents pourcentages de VAM

Bien sûr la durée d'un exercice à différents pourcentages de VAM varie beaucoup d'un individu à l'autre (Billat et al., 1994 ; Berthoin et al., 1996 ; Jeukendrup et al., 1996), mais connaître la durée moyenne est malgré tout utile comme point de repère et pour ajuster la durée d'un entraînement en fonction de l'intensité ou vice versa. La connaissance de cette durée est surtout utile en milieu scolaire où l'on initie les jeunes à la course alors que l'on sait que la durée maintenue pour une intensité donnée est systématiquement moindre pour les plus jeunes (fig. 11 à droite). Le message est clair, on ne peut se fier aux durées moyennes obtenues avec des adultes pour établir la durée d'un entraînement chez le jeune. Cependant, exprimée à des valeurs représentant des pourcentages de VO_2max plutôt que des pourcentages de VAM, la durée maintenue paraît semblable chez l'enfant et l'adulte (Fig.11 à droite). Mais à l'entraînement, on ne peut éviter le problème de conversion du % VO_2max en %VAM ou en %PAM ce qui requiert des calculs difficilement accessibles.

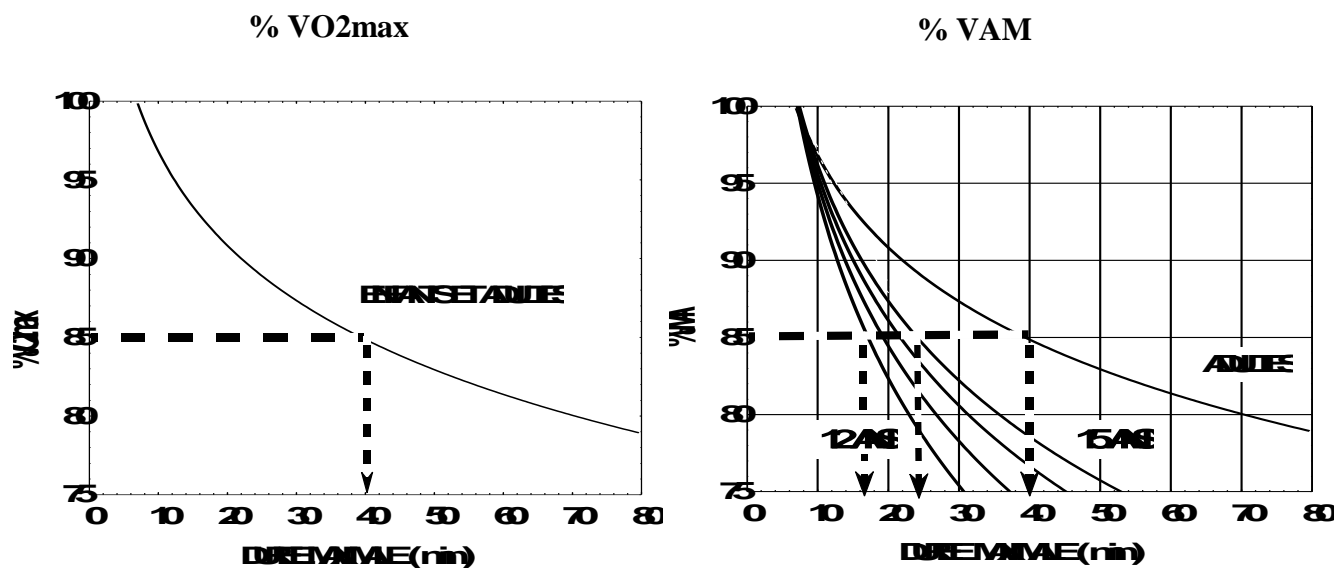


Figure 11 : Temps limite: Alors que T_{lim} à $\%VO_2max$ est le même chez l'enfant et l'adulte (à gauche), T_{lim} à $\%VMA$ est plus court chez le jeune (à droite). A prendre en considération pour fixer la durée des entraînements. Adapté de Berthoin et al., 1996.

D'autre part, la durée moyenne rapportée est le maximum pouvant être réalisé. À l'entraînement, selon le degré de difficulté désiré pour une séance donnée d'entraînement, il faudra rester en deçà de ces durées en s'exerçant, par exemple, à 80 ou 90% de la durée maximale moyenne à différents $\%VAM$.

Seuil lactique à 4 mM

Le fait qu'un enfant atteigne une intensité relative très élevée (ex. : 85% VO_2max) à 4 mmol de lactate par litre de sang, n'implique pas qu'il soit plus endurant que l'adulte. Ceci n'indique pas non plus qu'il ne soit nécessaire de focaliser sur cette composante de l'aptitude aérobie comme objectif poursuivi. En effet, chez l'enfant, contrairement à l'adulte et tel que mentionné antérieurement (Williams et Armstrong, 1991), le point d'inflexion de la courbe des concentrations sanguines du lactate se produit à des valeurs nettement inférieures à 4 mM (ex.: 2 mM). Par conséquent, doser les entraînements en fonction du seuil de lactate de 4 mmol.l⁻¹ est irréaliste chez le jeune. Il vaudrait mieux prendre un critère moins objectif, mais plus réaliste et aussi plus individuel pour déterminer le seuil.

$\%VO_2max$ vs $\%F_{cmax}$

Il est fréquent de doser l'entraînement aérobie en utilisant des pourcentages de F_{cmax} , ce qui est facile à contrôler. Ici, chez l'enfant comme chez l'adulte, il n'y a pas de relation univoque entre $\%F_{cmax}$ et $\%VO_2max$. (Léger, 1995). Cela est bien évident quand on constate qu'au repos, VO_2 n'est qu'à 3,5 ml•kg⁻¹•min⁻¹ ou à 8% VO_2max alors que FC est de l'ordre de 70 batt•min⁻¹ ou 40% F_{cmax} .

Ainsi, dans la zone cible d'entraînement aérobique (60 à 85% VO₂max), la valeur de %FCmax. est donc supérieure à la valeur correspondante du % VO₂max par environ 10%. Par exemple, à 70%VO₂max., on est autour de 80%FCmax.

C'est d'ailleurs pour cette raison que Karvonen a introduit la FC de réserve, c'est-à-dire la différence entre FCmax. et FCrepos. Puisque c'est sur cette étendue que varie FC, il propose donc de doser l'effort à 70%FCréserve comme équivalent de 70%VO₂max. Si cette approche corrige nettement le problème de FCrepos, elle néglige le phénomène du plafonnement précoce de FC par rapport à VO₂ (Léger, 1995).

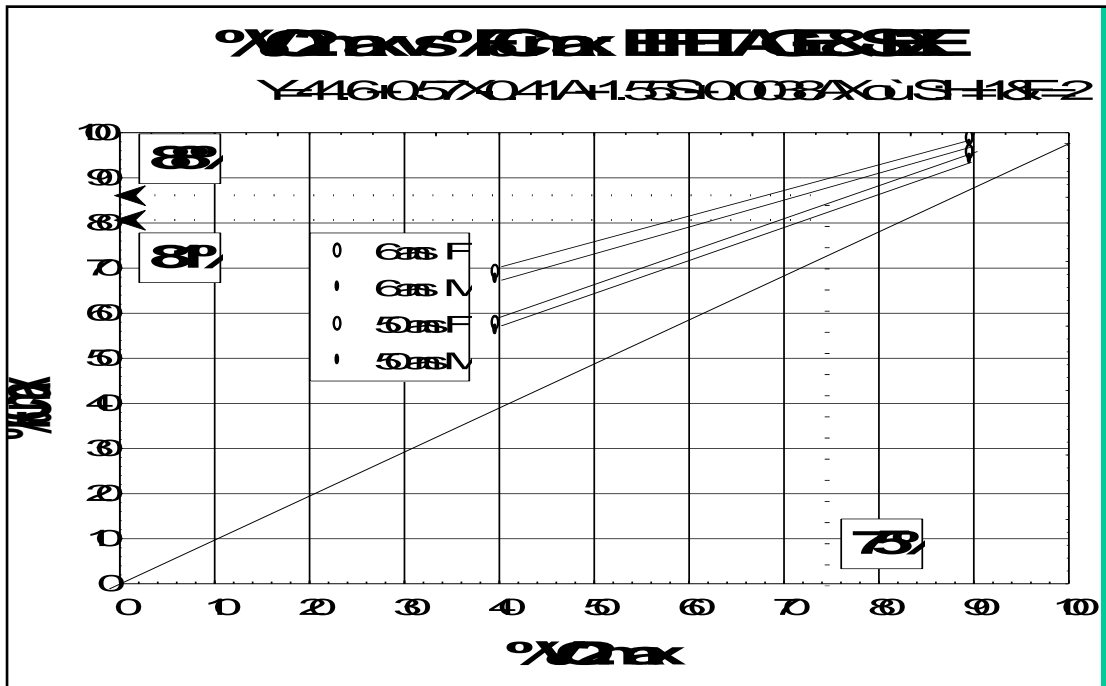


Figure 12 : Equivalence entre et % FCmax en période de croissance: % FCmax est plus élevé pour le jeune que pour l'adulte à %VO₂max égal. Adapté de Léger et al., 1990.

Enfin, l'analyse poussée de données recueillies chez des enfants et adultes, montre encore une fois que l'équivalence %FCmax/% VO₂max établie pour les adultes n'est pas valide pour les enfants (Léger, 1995). Ainsi, il faudra tenir compte de l'âge (an, 6 et plus) et du sexe (H = 1, F = 2) dans cette équivalence :

$$\%FCmax = 44.6 + 0,57 \%VO_2max - 0,41 \text{ âge} + 1,55 \text{ sexe} + 0,0038 \%VO_2max \text{ âge}$$

On constate alors qu'à pourcentage de VO₂max égal, les jeunes s'entraînent à un pourcentage de FCmax plus élevé que celui de l'adulte (Fig. 12).

- **Dérive de FC**

Une grande difficulté lorsqu'on utilise FC pour doser l'intensité de l'entraînement, c'est la dérive de celle-ci observée en fonction de la durée de l'entraînement même si l'intensité (vitesse, puissance) ou

la concentration en lactate demeure constante (Gilman, 1996). Il n'y a pas de solution pratique. Il n'est pas certain que la dérive de FC suive exactement celle de VO_2 qui paraît plus lente et moins importante. Si on diminue l'effort pour garder FC constant, le $\%VO_{2max}$ risque de diminuer s'éloignant ainsi de l'objectif poursuivi. À l'inverse, si l'intensité est constante, FC augmente ainsi que la difficulté de l'entraînement.

A tout le moins, il semble approprié de contrôler FC à peu près toujours au même temps de sa séance d'entraînement. Malgré cela, de multiples autres facteurs (température, humidité, etc.) affectent la FC (Gilman, 1996 ; Léger, 1995).

- **FCmax**

Comme l'entraînement aérobic est souvent dosé en pourcentage de FCmax., il est nécessaire de connaître FCmax. Il est de loin préférable de déterminer FCmax. réelle avec un cardiofréquencemètre fiable lors d'un test triangulaire puisque la formule classique : $FC_{max} = 220 - \text{âge}$, n'est guère valide. Non seulement la position de cette régression ne correspond pas à la réalité, mais peu importe l'équation retenue, il y a tant de variations autour de telles régressions, qu'aucune régression moyenne ne peut être vraiment représentative de la réalité (Léger, 1995). Par exemple, les hommes de 40 ans ont une FC qui se situe entre 170 et 205 ; il serait donc peu convenable d'attribuer à tous une valeur de 180 ($FC_{max} = 220 - AGE$). Autre exemple, avec une telle variabilité, un enfant de 6 ans peut, dans les faits, avoir la même FCmax. qu'un adulte de 50 ans.

Par conséquent, quelle que soit la formule, estimer FCmax. à partir de l'âge n'est qu'une approximation qui admet d'importantes erreurs dans les cas où FCmax. réelle n'est pas accessible ; dans ce type de situation il ne faut pas hésiter à augmenter ou diminuer l'intensité de l'entraînement grâce à des indices complémentaires tels la perception subjective de la fatigue, l'essoufflement, la sudation, la difficulté de parler...

- **Divergences dans les FC cibles d'entraînement**

Il est bien connu que selon la méthode utilisée (" pourcentage de FCmax. = pourcentage de VO_{2max} . + 10 ", " $FC_{réserve}$ de Karvonen ", FC cible d'entraînement peut différer considérablement (Léger, 1995). En supposant que chez l'enfant de 12 ans (MnConnel et al., 1992), FC correspondant au seuil anaérobie ventilatoire ($129 \text{ batt} \cdot \text{min}^{-1}$), soit la bonne intensité d'entraînement, ce qui est loin d'être confirmé, on note aussi des divergences avec FC cible déterminé par ces autres méthodes. On indique aussi que pour s'entraîner au dit « seuil », FC cible doit être à $68\%FC_{max}$., $48\%VO_{2max}$. et $41\%FC_{réserve}$ chez l'enfant de 12 ans. Il apparaît donc approprié d'adopter une méthode et de s'en tenir à celle-ci .

CONCLUSION

Cet exposé aura permis de préciser les concepts et composantes de l'aptitude aérobic, d'en démontrer l'importance et de commenter certaines problématiques spécifiques au développement de

l'aptitude aérobie chez les jeunes.

L'aptitude aérobie demeure cependant un objet de recherche important. Paradoxalement, plus la recherche avance, plus le nombre de questions sans réponse semble augmenter. La méthode la plus appropriée pour exprimer le VO_2 et le VO_{2max} n'est pas arrêtée, et il y existe une controverse en ce qui concerne l'exposant auquel il faut élever le poids corporel pour exprimer VO_2 en fonction de celui-ci. De plus, le concept de seuil anaérobie est remis en cause par de nombreux chercheurs, tant d'un point de vue théorique que méthodologique. Il est donc difficile d'identifier une procédure standard et un ensemble de normes pour les enfants. Les chercheurs doivent considérer les différentes issues et retenir les tests et les unités d'expression qui reflètent le mieux les objectifs poursuivis. Les méthodes retenues ainsi que les protocoles doivent donc être décrits de façon précise et compréhensive. Une fois les principes sous-jacents aux méthodes d'évaluation bien compris, il est possible d'utiliser les résultats de ces évaluations pour établir des entraînements efficaces tout en évitant l'arbitraire et les nombreux pièges qui caractérisent trop souvent notre intervention en ce domaine, particulièrement avec les enfants.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. American College of Sports Medicine. Guidelines for Graded Exercise Testing and Exercise Prescription. Philadelphia: Lea & Febiger, 1986.
2. Armstrong, N., & Welsman, J.R. Assessment and interpretation of aerobic fitness in children and adolescents. In J.O. Holloszy (Ed.), Exercise and Sport Sciences Reviews, vol. 22, Baltimore: Williams & Wilkins; 435-476, 1994.
3. Armstrong, N., Welsman, J., Wensley, R. Is peak VO_2 a maximal index of children's aerobic fitness? Int. J. Sports Med., 1996; 17: 356-359.
4. Armstrong N, Welsman JR, Kirby B, Peak oxygen reuptake and maturation in 12 years old, Med. Sci. Sports ExeC., 30 ;165 – 169, 1998.
5. Babineau C, Jodoin J, Léger L, Intermittent testing parameters as determinants of olympic distance triathlon performances. Soumis pour publication.
6. Bakhouya K, Durée optimale des paliers des tests aérobies progressifs et continus, Mémoire de maîtrise, Sciences de l'activité physique, Université de Montréal, avril 1999.
7. Bar-Or, O. Pediatric Sports Medicine for the Practitioner. New York: Springer-Verlag, 1983.
8. Bergh, V., Sjodin, B., Forsberg, A., & Svedenhag, J. The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. Med. and Sciences in Sports and Exer., 1991; 23: 205-211.
9. Berthoin, S., Baquet, G., Mantica, F., Lensele-Corbeil, G., Gerbeaux, M. Maximal aerobic speed and running time to exhaustion for children 6 to 17 years old. Ped. Exer. Sci., 1996; 8: 234-244.
10. Billat, V., Renoux, J.C., Pinoteau, J., Petit, B., & Koralsztejn, J.P. Validation d'une épreuve maximale de temps limite à VMA (vitesse maximale aérobie) et à VO_{2max} . Science & Sports, 1994; 9(3): 135-143.
11. Billat, V., Hill, D., Pinoteau, J. et al. Effect of protocol on determination of velocity at VO_{2max} and on its time to exhaustion. Arch. Int. Physiol. Biochem., 1996; 104: 313-321.
12. Borms, J. The child and exercise: an overview. J. Sports Sci., 1986; 4: 3-20.
13. Bosco, C., Montanari, G., Ribacchi, R., Giovendi, P., Latteri, F., Iachelli, G. et al. Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. Eur. J. of Appl. Physiol., 1987.
14. Cazorla G., Montpetit R.R. Niveau d'entraînement et spécificité de la consommation maximale d'oxygène

chez le nageur. *Motricité humaine* 1,50-55, 1983.

15. Cazorla, G. et Léger, L. Comment évaluer et développer vos capacités aérobies. Edit AREAPS, 1993.
16. Conley, D.L., Krahenbuhl, G.S., Burkett, L.N., Millar, A.L. Following Steve Scott: Physiological changes accompanying training. *Phys. Sports Med.*, 1984; 12: 103-106.
17. Consolazio, C.F., Johnson, R.E., & Pecora, L.J. *Physiological Measurements of Metabolic Functions in Man*. New York: McGraw Hill, 1963.
18. Cooke, C.B., McDonagh, M.J.N., Nevill, A.M., Davies, C.T.M. Effects of load on oxygen intake in trained boys and men during treadmill running. *J. of Appl. Physiol.*, 1991; 71: 1237-1244.
19. Dengel DR, Flynn MG, Costill DL, Kirwan J, Determinants of success during triathlon competition, *Res. Quat. Exerc. Sport*, 60 : 234 – 238, 1998.
20. Di Prampero PE, Cortili G, Mognoni P, Saibene F, Equation of motion of a cyclist, *J. Appl. Physiol.*, 47 : 201 – 206, 1979.
21. Di Prampero PE, Atchou G, Brückner JC, Moia C, The energetics of endurance running, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 55 : 259 – 266, 1986.
22. Ebbeling, C.J., Hamill, J., Freedson, P.S. & Rowland, T.W. An examination of efficiency during walking in children and adults. *Ped. Exer. Science*; 4: 36-49, 1992.
23. Falgairette, G. Evolution de la puissance maximale aérobie de l'enfance à l'âge adulte: influence de l'activité physique et sportive. *Revue des sciences et techniques en activités physiques et sportives*; 10: 43-58, 1989.
24. Gilman, M.B. The use of heart rate to monitor the intensity of endurance training. *Sports Med*; 21: 73-79., 1996.
25. Hauswirth C et Brisswalter J, Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée: étude des paramètres d'influence. *Science & Sports*; 14: 59-70, 1999.
26. Hughson, R.L., Albinson, J., Bar-Or, O., Bishop, P., Bouchard, C., Cumming, G.r., Cunningham, D.A., Jackson, J., Jensen, R., Kozey, J., Marteniuk, R., Stanish, B. L'enfant dans le sport de compétition. Une approche multidisciplinaire. *Science et Sports*; 2: 17-30, 1987.
27. Jeukendrup, A., Saris, W.H.M., Brouns, F., Kester, A.D.M. A new validated endurance performance test. *Med. Sci. Sports Exerc.*; 28: 266-270, 1996.
28. Krahenbuhl, G.S., Skinner, J.S., & Kohrt, W.M. Developmental aspects of maximal aerobic power in children. In R.J. Terjung (Ed.), *Exercise and Sports Science Reviews*, New York: McMillan, 1985, vol. 13, 503-538.
29. Kohrt WM, Morgan DW, Bates B, Skinner JS, Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling and running, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 19 : 51 – 55, 1987.
30. Lacour JR, Les facteurs physiologiques de la performance en course demi-fond (pp 63-63), dans Cazorla G, *Evaluation physiologique et traumatologique en sport, Actes du colloque Aquitaine Sciences et Sports, Bordeaux, UFRSTAPS, 1992.*
31. Léger, L., Cloutier, J., & Massicotte, D. Energy cost of running, cycling and stepping during growth. In T. Reilly, J. Watkins, & J. Borms (Eds.), *Kinanthropometry III*, London: E & FN Spon, 138-145, 1986.
32. Léger L, Marion A, Brue F, Exigences physiologiques du cyclisme de compétition (pp 69-87), dans Cazorla G, *Evaluation physiologique et traumatologique en sport, Actes du colloque Aquitaine Sciences et Sports, Bordeaux, 1992.*
33. Léger L, Bosquet L, Folch N, Evaluation et développement des aptitudes aérobies au cours de la croissance. (pp 70-95) Dans Cazorla G et Robert G. (Eds), *L'enfant, l'adolescent et le sport, Actes du 4ème colloque des cadres techniques de la Guadeloupe, Dec. 1997, Bordeaux: EREAPS, 1998.*
34. Léger, L. Signification et limites de l'utilisation de la fréquence cardiaque dans le contrôle de

- l'entraînement. (pp 245-254) Dans Cazorla, G. et Robert, . (eds), Entraînement, suren-traînement, désentraînement. 3e Colloque Int. Cadres techniques et sportifs de la Guadeloupe (1994), Bordeaux: AREAPS, 1995.
35. Léger, L., Gutierrez, A., Choinière, D., Ricart, R.-M., & Massicotte, D. %HR-max - VO₂max relation according to age (6-50), sex and ergometer. (Abstract). International Congress on Youth, Leisure and Physical Activity and Kinanthropometry IV, Brussels, 1990.
 36. Léger, L., Ricart, R.-M., Massicotte, D. Re-gression models to predict VO₂max from submaximal treadmill exercise in 6 to 50 years old males and females. In G. Beunen, J. Ghesquiere, T. Reybrouck, & A.L. Claessens (Eds) Children and Exercise, Band 4, Stuttgart: Verlag, 1990, 104-110.
 37. Lohman, T.G. Assessment of body composition in children. *Ped. Exer. Science*; 1: 19-30, 1989.
 38. Londeree, B.R. Effect of training on lactate/ventilatory thresholds: a metaanalysis. *Med. Sci. Sports Exerc*; 29(6): 837-843, 1997.
 39. Marion G, Léger L, Energetics of indoor track cycling in trained competition, *Int., J., Sports Med.*, 9 : 234 – 239, 1989.
 40. Mercier D, La puissance aérobie maximale comme prédicteur de la performance en course à pied ; effet de la distance, du sexe et de la spécificité, Mémoire de maîtrise, Sciences de l'activité physique, Université de Montréal , 1985.
 41. Millet G., Chatard JC, Ceste O, Dréano P, Triathlon : les déterminants de la performance. Evaluation et conséquences pour l'entraînement, A paraître.
 42. Mombiedro C, Validation de test de course navette de 20m pour prédire le VO₂max. d'athlète. Mémoire de maîtrise en Sciences de l'activité physique, Université de Montréal, 1992.
 43. Noakes, T.D. Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Med. and Sciences in Sports and Exer.*, 1988; 20: 319-330.
 44. Quinney H.A., Watkinson, E.J., Massicotte, D., Conger, P.R., & Gauthier, R. The height, weight and height/weight ratio of Canadian children in 1979. *Canadian Association for Health and Physical Education Journal*, 1982; 49: 17-19.
 45. Ricci J, Léger L, VO₂max. of cyclists from treadmill, bicycle ergometer an velodrome tests, *Eur. J., Appl. Physiol.*, 50 : 283 – 289, 1983.
 46. Rowland, T.W. On body size and running economy. *Ped. Exer. Science*; 4: 1-4, 1992.
 47. Rowland, T.W. *Developmental Exercise Physiology*. Champaign: Human Kinetics, 1996.
 48. Saltin, B., Blomqvist, B., Mitchell, J.H., Johnson, R.L., Wildenthan, K., Chapman, C.B. Response to submaximal and maximal exercise after bed rest and training. *Circulation*, 1968; 38 (suppl. 7).
 49. Scrimgeour, A.G., Noakes, T.D., Adams, B., Myburgh, A. The influence of weekly training distance on fractional utilization of maximum aerobic capacity in marathon and ultramarathon runners. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1986; 55: 202-209.
 50. Sheehan, G. Children running? Why not? (editorial). *Physician Sportsmed*; 11: 51, 1983.
 51. Siri, W.E. Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. In J. Brozek & A. Henschel (Eds.) *Techniques for Measuring Body Composition*. Washington: National Academy of Sciences National Research Council, 223-224, 1961.
 52. Sjodin B, Svedenhag J, Applied physiology of marathon running, *Sports Med.*, 2 : 83 – 99, 1985.
 53. Slaughter, M.H., Lohman, T.G., Boileau, R.A., Horswill, C.A., Stillman, R.J., Van Loan, M.D., Bembien, D.A. Skinfold equations for estimation of body fatness in children and youth. *Human Biology*; 60: 709-723, 1988.
 54. Swain D, Coast JR, Clifford PS, Melleken MC, Stray-Gundersen, Influence of body size on oxygen consumption during bicycling, *J. Appl. Physiol.*, 62 : 668 – 672, 1987.

55. Unnithan, V.B., Timmons, J.A., Brogan, R.T., Paton, J.Y., Rowland, T.W. Submaximal running economy in run-trained prepubertal boys. *J. Sports Med. Phys. Fit.* , 1996; 36; 16-23.
56. Vaccaro, P., & Mahon, A. Cardiorespiratory responses to endurance training in children. *Sports Medicine*, 1987; 4: 352-363.
57. Weiss, V. Les adolescents et le sport de haut niveau. *L'entraîneur*, avril-juin: 19-26 et juillet-septembre: 5-10, 1986.
58. Welsman, J., Armstrong, N., Winter, E., Kirby, B.J. The influence of various scaling techniques on the interpretation of developmental changes in peak $\dot{V}O_2$ (Abstract). *Ped. Exer. Sci.*; 5: 485, 1993.
59. Welsman, J.R., Armstrong, N., Winter, E.M., Kirby, B.J. Scaling peak $\dot{V}O_2$ for differences in body size. *Med. Sci. Sports Exercise*, 1996; 28: 259-265.
60. Williams, J.R., & Armstrong, N. The influence of age and sexual maturation on children's blood lactate responses to exercise. *Ped. Exer. Science*, 3: 111-120, 1991a.
61. Winter, E.M. Scaling: Partitioning out difference in size. *Ped. Exer. Science*; 4: 296-301, 1992.

LEGENDES DES FIGURES

Fig. 1 : Corrélations entre VO_2max et la performance au marathon. Influence de l'homogénéité des groupes " élite " seulement (E), " élite et intermédiaire " (E + I) et " élite, intermédiaire et novice " (E + I + N) sur la corrélation. Adapté de Sjodin et Svedenhag, 1985.

Fig. 2 : Corrélations entre $VO_2 max.$ et performances réalisées sur différentes distances pour des groupes homogènes et hétérogènes. Notons l'importance de $VO_2 max.$ du 800m au marathon .Léger et Mercier (1989), non publié à partir d'une quinzaine d'études répertoriées dans Mercier (1988).

Fig. 3a et 3b : Corrélations entre $VO_2max.$ et performances réalisées par différents individus à un moment de leur carrière (a) et ensemble de régressions et corrélations entre $VO_2max.$ et performances réalisées par les mêmes individus à différents moments de leur carrière (b). Autrement dit, pour un individu donné (même endurance, même économie de locomotion, même motivation, même aptitude anaérobie), $VO_2max.$ est nettement mieux corrélé avec la performance.

Fig. 4 : Valeurs types de VO_2max au cours de la croissance pour enfants " sédentaires " et entraînés en endurance. Les valeurs supérieures des enfants entraînés supportent l'idée que l'enfant est sensible à l'entraînement bien qu'un processus de sélection naturelle ne soit pas exclu, les enfants génétiquement avantaagés étant ceux qui auraient spontanément choisi de s'adonner à des activités d'endurance. Adapté de Falgairette (1989).

Fig.5 : Influence de l'économie de locomotion sur la VMA et la performance en compétition. Adapté de Noakes, 1988.

Fig.6 : Pour fig 6 et fig 7, les legendes sont regroupées ensembles avec la fig power point

Fig.7 : Pour fig 6 et fig 7, les legendes sont regroupées ensembles avec la fig power point

Fig.8 : Economie de course. En période de croissance, les plus âgés sont plus économiques " Adapté de Léger et al., 1986.

Fig. 9 Augmentation de la réserve fonctionnelle aérobie en période de croissance. Adapté de Bar Or, 1987.

Fig. 10 Influence du poids corporel sur l'énergie requise exprimée en $ml\ kg^{-1}\ min^{-1}$. Adapté de Bergh et al., 1991.

Fig.11 : Normalisation du VO_2max absolu pour tenir compte du poids corporel. On note une augmentation de VO_2max indépendante du poids corporel. Adapté de Léger 1999

Fig.12 : Temps limite: Alors que $Tlim$ à $\%VO_2max$ est le même chez l'enfant et l'adulte (à gauche), $Tlim$ à $\%VMA$ est plus court chez le jeune (à droite). A prendre en considération pour fixer la durée des entraînements. Adapté de Berthoin et al., 1996.

Fig. 13.: Equivalence entre et $\%FCmax$ en période de croissance: $\%FCmax$ est plus élevé pour le jeune que pour l'adulte à $\%VO_2max$ égal. Adapté de Léger et al., 1990.

Fig. 14.: Fréquence cardiaque maximale en fonction de l'âge chez l'enfant, l'adolescent et l'adulte: la dispersion des points rend inutilisable l'utilisation d'une valeur moyenne de $FCmax$ pour un âge donné. Adapté de Léger et al., 1990 et 1995.