Zeitschrift: Macolin : revue mensuelle de l'École fédérale de sport de Macolin et Jeunesse + Sport

Herausgeber: École fédérale de sport de Macolin

Band: 47 (1990)

Heft: 6

Artikel: Fondements biologiques de l'entraînement en endurance

Autor: Hegner, Jost

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-998203

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Fondements biologiques de l'entraînement en endurance

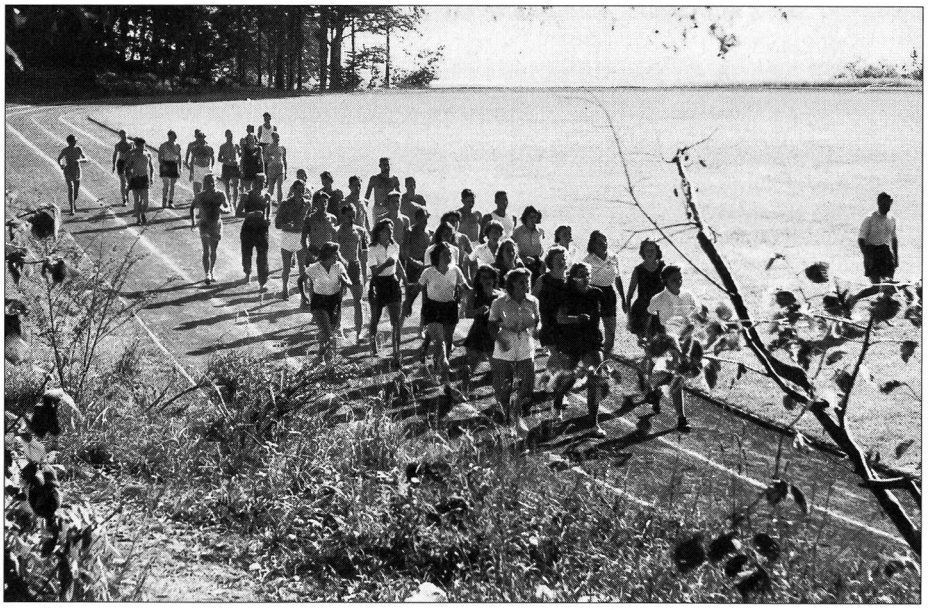
Jost Hegner, responsable de l'enseignement de la biologie
aux entraîneurs du CNSE
Traduction: Dr Jean-Pierre Monod

Dans le domaine de l'entraînement, le concept d'endurance signifie «faculté de résister physiquement et psychiquement à la fatigue». Il s'agit donc de supporter aussi longtemps que possible un effort corporel, intellectuel, ou un stress émotionnel sans montrer de signe de fatigue.
On distingue l'endurance locale (lorsque moins de ⅙ de la masse musculaire corporelle totale travaille) de l'endurance générale (plus de ⅙). L'énergie nécessaire à des efforts de durée prolongée est produite par la voie aérobie ou (et) anaérobie, selon la durée de l'effort.

Sources d'énergie: le métabolisme cellulaire

Lors d'un travail musculaire, l'énergie chimique est transformée en énergie mécanique et thermique. Ceci se produit dans les myofibrilles. La contraction musculaire dépend de la présence de liaisons phosphates riches en énergie, principalement l'ATP (adénosine triphosphate). L'ATP est stockée en petite quantité dans le sarcoplasme. Une enzyme musculaire, la myosine-ATPase, scinde l'ATP en ADP (adénosine diphosphate) et phosphate libre, libérant ainsi de l'énergie.

La réserve d'ATP est limitée et serait épuisée après quelques contractions seulement si d'autres liaisons riches en énergie, grâce à leur scission, ne permettaient de reconstituer l'ATP à partir de l'ADP. Le métabolisme est contrôlé par des enzymes (bio-catalyseurs).



Le «footing du dimanche matin», en toute décontraction, avec le sourire, en fonction aérobie parfaite.

Le moteur, c'est le métabolisme
Par la dégradation de

créatine-phosphate	en phosphate+créatine	(processus anaérobie alactique)
glucose	en acide lactique (lactate)	(processus anaérobie lactique: glycolyse anaérobie)
glucose et acides gras+O_2	en CO_2 et H_2O	(processus aérobie: phosphorylation oxydative)
est produite l'énergie nécessaire à la recharge des «batteries d'ATP».		

L'activité enzymatique dépend entre autres:
- de la quantité présente d'enzymes clés
- de la quantité de substrats énergétiques disponibles
- du PH intracellulaire.

La capacité de production énergétique de la cellule musculaire est proportionnelle à son activité enzymatique.

Lors d'un travail intensif, qui demande une grande quantité d'énergie par unité de temps, la cellule musculaire utilise la voie anaérobie. Les dépôts de créatine-phosphate sont rapidement épuisés et l'accumulation de lactate consécutive à la glycolyse anaérobie bloque le métabolisme intracellulaire.

Fondamentalement, la cellule musculaire essaie autant que possible d'utiliser la voie aérobie. Cette phosphorylation oxydative nécessite cependant que les fibres musculaires soient suffisamment alimentées en oxygène. Lors du passage de l'état de repos à l'effort, l'apport d'oxygène dans la musculature est transitoirement insuffisant car, au repos, près de 90 pour cent des vaisseaux capillaires sont fermés; le sang circule principalement dans les autres organes. L'effort physique conduit entre autres à une activation du système cardio-pulmonaire, à une augmenta-

Déroulement des processus métaboliques permettant la régénération de l'ATP

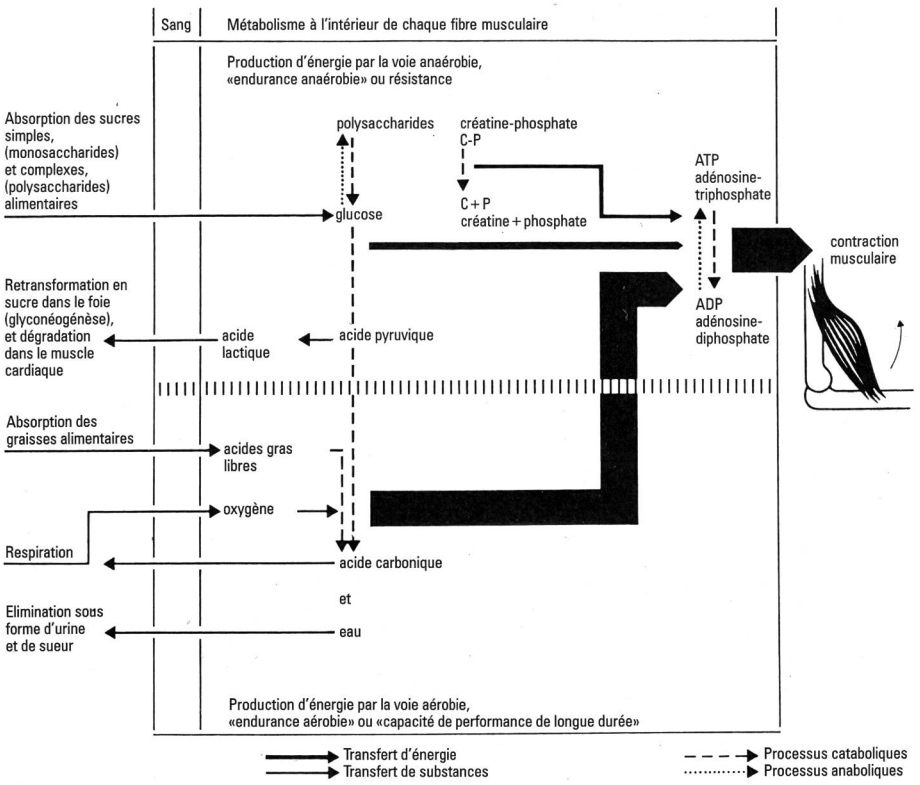


Fig. 1: Représentation simplifiée des processus métaboliques fournisseurs d'énergie (Weiss U., 1978). L'épaisseur des traits est proportionnelle à la capacité (travail total) des voies de transport d'énergie et inversement proportionnelle au débit énergétique qu'elles peuvent fournir (puissance).

Substrat+type de dégradation	Débit maximal Micromol/g/sec	% du total	Durée maximale de fonctionnement
ATP, cr.-ph.: anaérobie alactique	1,6–3,0	100	7–10 sec
Glycogène: anaérobie lactique	1,0	30	40–90 sec
Glycogène: aérobie	0,5	15	60–90 min
Acides gras: aérobie	0,25	7,5	heures

Tab. 1: Débits énergétiques maximaux (vitesse maximale de production d'énergie) de différentes voies métaboliques de production d'énergie.

tion du transport d'oxygène et à une ouverture (vasodilatation) des capillaires de la musculature qui travaille.

Si, au début de l'effort, l'apport en oxygène dans les fibres musculaires est encore insuffisant pour satisfaire les mécanismes oxydatifs, ou si l'intensité de l'effort est si grande que, malgré une irrigation sanguine maximale de la musculature, l'apport en oxygène ne suffit pas à couvrir les besoins, les cellules musculaires sont alors obligées d'utiliser la voie anaérobie et, ainsi, de dégrader le glucose d'abord en pyruvate puis en lactate.

Ces deux substances ont un effet toxique sur les fibres musculaires, même en petites concentrations. Le lactate a cependant l'avantage de pouvoir sortir de la cellule. Il peut être transporté par le sang et, entre autres, utilisé comme source d'énergie par le muscle cardiaque. La circulation sanguine en transporte également une partie dans le foie, qui le retransforme en glucose. Ainsi, le lactate peut être éliminé et il disparaît de l'organisme. Plus un athlète est entraîné, plus grande est la vitesse à laquelle il peut éliminer le lactate et, ainsi, retarder le moment où sa concentration augmente dans le sang. La capacité à éliminer le lactate est faible chez l'enfant et l'adolescent. Lors d'entraînements et de compétitions destinés à ces tranches d'âge, on devrait donc éviter les efforts qui conduisent à une accumulation de lactate (par exemple, en course à pied, les distances de plus de 200 m et jusqu'à 1000 m effectuées près du maximum des possibilités).

«Nouveaux» concepts dans le domaine de l'endurance

A la suite d'une proposition du *Dr Probst*, nous utilisons depuis quelques années les concepts courants de la littérature anglaise:

- puissance aérobie (aerobic power)
- capacité aérobie (aerobic capacity)
- puissance anaérobie (anaerobic power)
- capacité anaérobie (anaerobic capacity).

La puissance aérobie

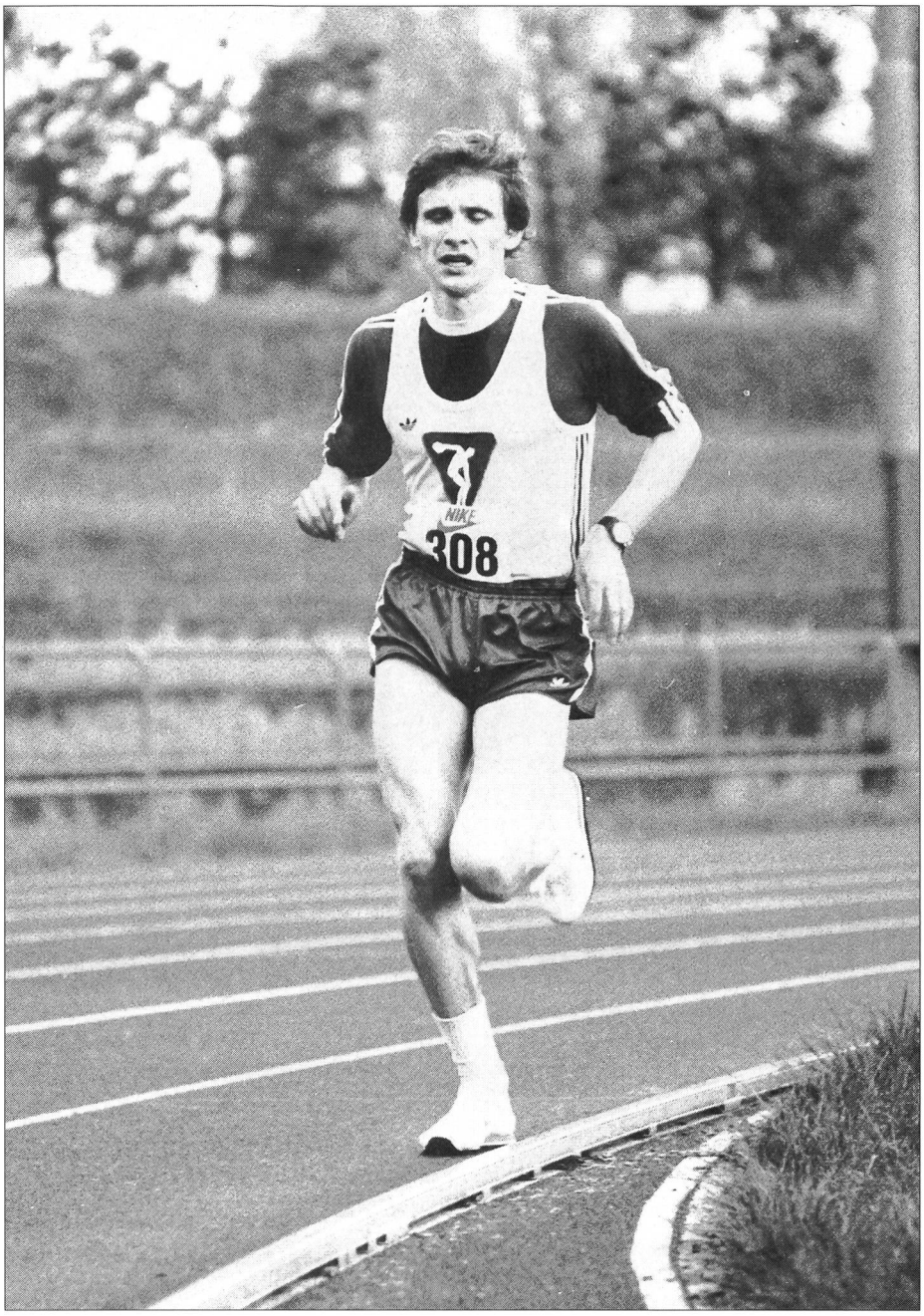
La puissance aérobie est une mesure de la performance qu'un homme peut produire en n'utilisant que la voie aérobie. Elle détermine à quelle vitesse nous pouvons courir, rouler à vélo ou nager, par exemple, sans acidifier le sang par une augmentation du lactate.

Unité de mesure: joules/seconde = Watt.

Cette puissance aérobie constitue le facteur limitant le plus important dans les sports d'endurance. Elle influence également de manière décisive les performances dans divers autres sports. Dans les jeux sportifs, elle permet aux athlètes de courir sans utiliser la glycolyse anaérobie et, donc, de ne pas augmenter significativement le taux de lactate sanguin; également, de récupérer rapidement et complètement lors des interruptions de jeu. Une puissance aérobie bien développée constitue, en outre, un préalable déterminant pour supporter une intensité d'effort élevée à l'entraînement, pour récupérer rapidement entre chaque séance, et pour obtenir une adaptation et une progression optimales dans le processus d'entraînement. Le volume d'entraînement supporté dépend en grande partie de la puissance aérobie, même dans les jeux sportifs.

Lors d'efforts intensifs qui nécessitent l'utilisation de la voie anaérobie, l'ensemble des besoins énergétiques ne pourrait cependant pas être couvert si la voie aérobie n'était pas également mise en jeu. Celle-ci permet de diminuer la dette d'oxygène produite par la voie anaérobie lactique.

On a également remarqué, et c'est là un autre chapitre d'une grande importance, que l'entraînement de la puis-



Le demi-fond (ici un 1500 m) demande à l'athlète de courir en «puissance aérobie», tout près du seuil anaérobie.

sance aérobie lors des loisirs et du «sport-santé» exerce une influence préventive sur les maladies cardio-vasculaires et celles dues au manque de mouvement.

La puissance aérobie dépend de deux paramètres physiologiques:

- De la possibilité d'utiliser le maximum d'oxygène en périphérie. Ceci dépend de l'activité des enzymes clés nécessaires à la production d'énergie, par la voie aérobie, dans les mitochondries. La différence de concentration en oxygène entre les artères et les veines est proportionnelle à la consommation de cet oxygène par les tissus périphériques.
- De l'efficience des systèmes de transport de l'oxygène (cœur, vaisseaux sanguins et sang).

On peut estimer cette puissance par la mesure de la «consommation maximale d'oxygène» de l'organisme, la $\dot{V}O_2$ max, ou par la mesure du niveau du «seuil anaérobie» *(tableau 2)*.

Plus la puissance aérobie est développée, plus la musculature d'un sujet pourra utiliser d'oxygène.

La capacité aérobie

La capacité aérobie dépend de la quantité de réserves énergétiques cellulaires, et permet à l'athlète de supporter un effort de longue durée.

Unité de mesure: joules.

La capacité aérobie peut être améliorée par des efforts de très longue durée, qui conduisent à un épuisement des réserves énergétiques cellulaires.

Effectivement, cet entraînement conduit finalement à une augmentation démontrable des réserves de substrats énergétiques cellulaires. Ceci est valable aussi bien pour le glycogène que pour les lipides. Tous deux augmentent massivement après un entraînement de 6 à 8 semaines à vélo: les réserves en lipides, par exemple, d'environ 100 pour cent. Chez les cyclistes professionnels, les myofibrilles ne représentent plus qu'environ 60 pour cent du volume des fibres, contre environ 80 pour cent chez les sujets non entraînés. Presque 40 pour cent du volume des fibres des premiers sont occupés par leur «appareil métabolique»! *(Hoppeler/Lüthi,* 1988).

Les seuils aérobie et anaérobie

Entre 1970 et 1980 fut introduit le concept de «seuil anaérobie» dans le domaine des tests de performance. Ainsi, les spécialistes se sont concentrés sur les modifications métaboliques musculaires lors d'un effort d'intensité croissante.

Le seuil aérobie est la limite d'intensité jusqu'à laquelle le métabolisme reste purement aérobie. Les valeurs de lactate au seuil aérobie se situent à environ 2 mmol/l.

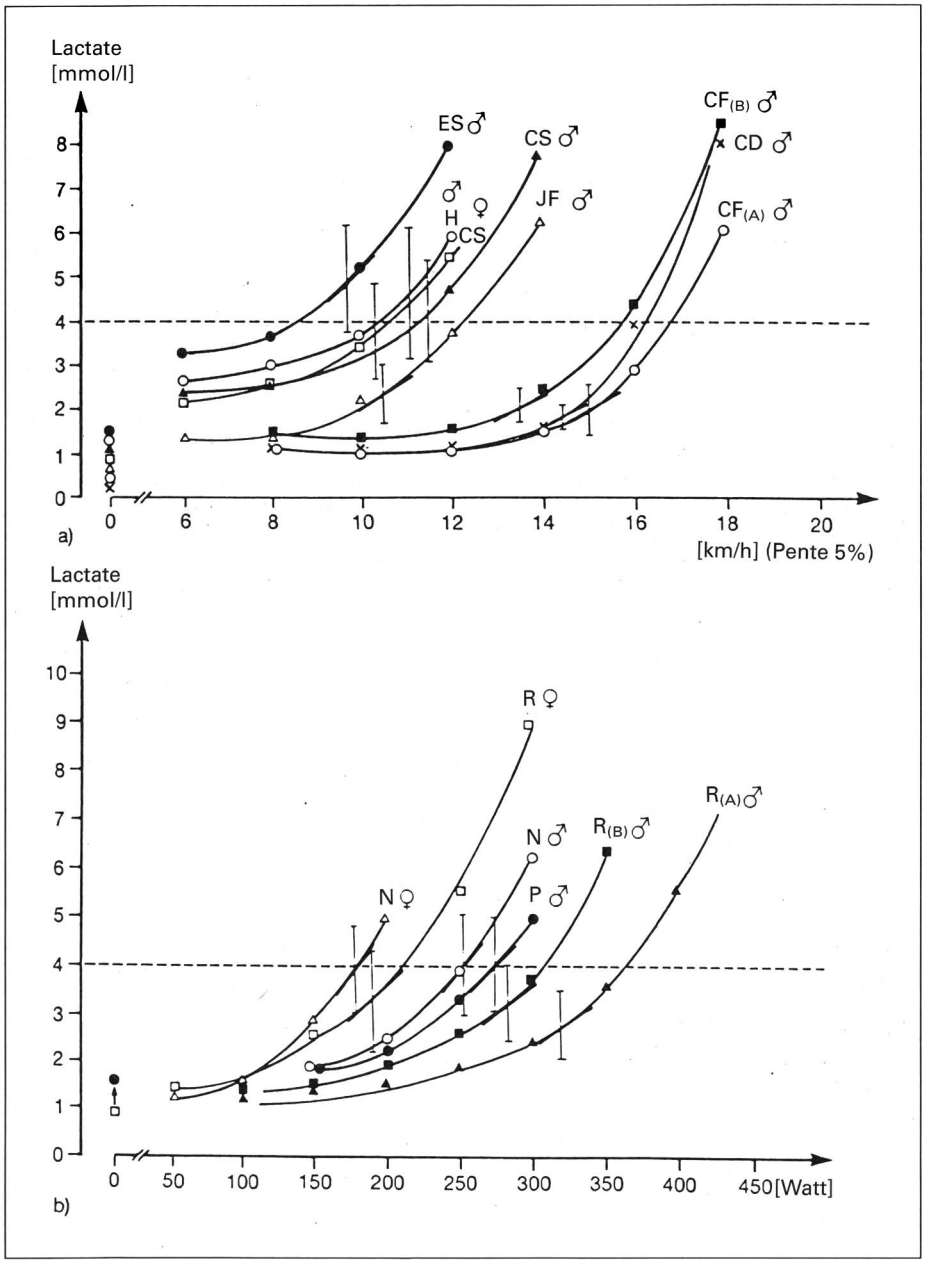
Si l'on augmente encore l'intensité de l'effort, l'énergie nécessaire doit être partiellement fournie par la glycolyse anaérobie. Du lactate est produit. Celui-ci passe dans le sang et dans divers organes (le foie, le cœur et la musculature qui n'est pas en train de travailler) et il est éliminé.

Dans cette zone de transition aérobie-anaérobie, la formation et l'élimination du lactate s'équilibrent.

Niveau de performance	$\dot{V}O_2$ max rapportée au poids corporel (ml/kg/min)
Sujets non entraînés (h+f)	30–35
Populaires (f)	38
(h)	45
Sportifs d'endurance	55–65
Sportifs d'endurance (niveau international)	65–80
Valeurs maximales	80–90

Tab. 2: $\dot{V}O_2$ max relative, à différents niveaux de performance.

Lors d'un sprint final (ici l'arrivée d'un 3000 m), le seuil anaérobie est généralement franchi.



Le seuil anaérobie se situe au niveau d'intensité où la quantité de lactate diffusée hors de la cellule et sa vitesse d'élimination sont encore tout juste en équilibre *(Hollmann/Hettinger*, 1976).

Lorsqu'une augmentation supplémentaire de l'intensité de l'effort entraîne un dépassement de ce seuil anaérobie, la production de lactate dépasse les capacités d'élimination. Le taux de lactate sanguin augmente *(figure 2)*.

Selon la définition classique de *Mader*, le taux de lactate au seuil anaérobie est de 4 mmol/litre.

En pratique, pour l'entraînement et pour la recherche en biologie du sport, cette définition stricte du seuil anaérobie ne suffit pas. C'est pourquoi nous essayons, selon les possibilités, de le déterminer individuellement. Il est défini comme le point de la courbe de lactate où la pente augmente de manière critique. On peut le déterminer par la mesure des taux de lactate sanguin (test invasif) lors d'un effort d'intensité croissante, par paliers, ou par l'enregistrement de la fréquence cardiaque lors d'un effort de même type, par paliers plus courts et plus nombreux (test de *Conconi*, test par intervalles ou sur cycloergomètre, selon *Probst)*.

Fig. 2: Seuils anaérobies individuels lors de tests d'effort sur tapis roulant et sur cycloergomètre:

a) Tapis roulant: ES = étudiants en sport, H = joueurs de handball, CS = coureurs de sprint, CD = coureurs de demi-fond, JF = jeunes footballeurs, CF = coureurs de fond, (A) = cadre national, (B) = cadre régional.

b) Cycloergomètre: N = nageurs, R = rameurs, P = patineurs de vitesse, (A) = cadre national, (B) = cadre régional. (Schürch, 1987)

Par l'entraînement, on peut à la fois augmenter la $\dot{V}O_2$ max et déplacer la courbe «lactate en fonction de l'intensité de l'effort» vers la droite, donc améliorer le seuil.

L'augmentation de la $\dot{V}O_2$ max est relativement faible (au maximum 15 à 20 pour cent), alors que le seuil anaérobie peut être déplacé vers la droite jusqu'à un niveau d'effort de 50 à 70 pour cent plus grand qu'auparavant *(Grosser* et *al.* 1986, 115).

Un seuil anaérobie élevé permet au sportif d'utiliser un grand pourcentage de sa $\dot{V}O_2$ max lors d'efforts de longue durée, ce qu'illustrent les chiffres suivants:

Le seuil anaérobie se situe, par rapport à la vitesse de course correspondant à la $\dot{V}O_2$ max:

- chez les sujets non entraînés, vers 50 à 70 pour cent (environ 10 à 12 km/h)
- chez les étudiants en sport vers 70 à 80 pour cent (environ 14 à 16 km/h)
- chez les sujets très entraînés, vers 85 à 95 pour cent (jusqu'à 24 km/h).

La puissance anaérobie

La puissance anaérobie est une mesure de l'intensité d'effort qu'un homme peut produire en utilisant la voie métabolique anaérobie.

Unité de mesure: joules/seconde = Watt.

La capacité anaérobie

La capacité anaérobie est une mesure du volume de travail qui peut être fourni par la voie métabolique anaérobie.

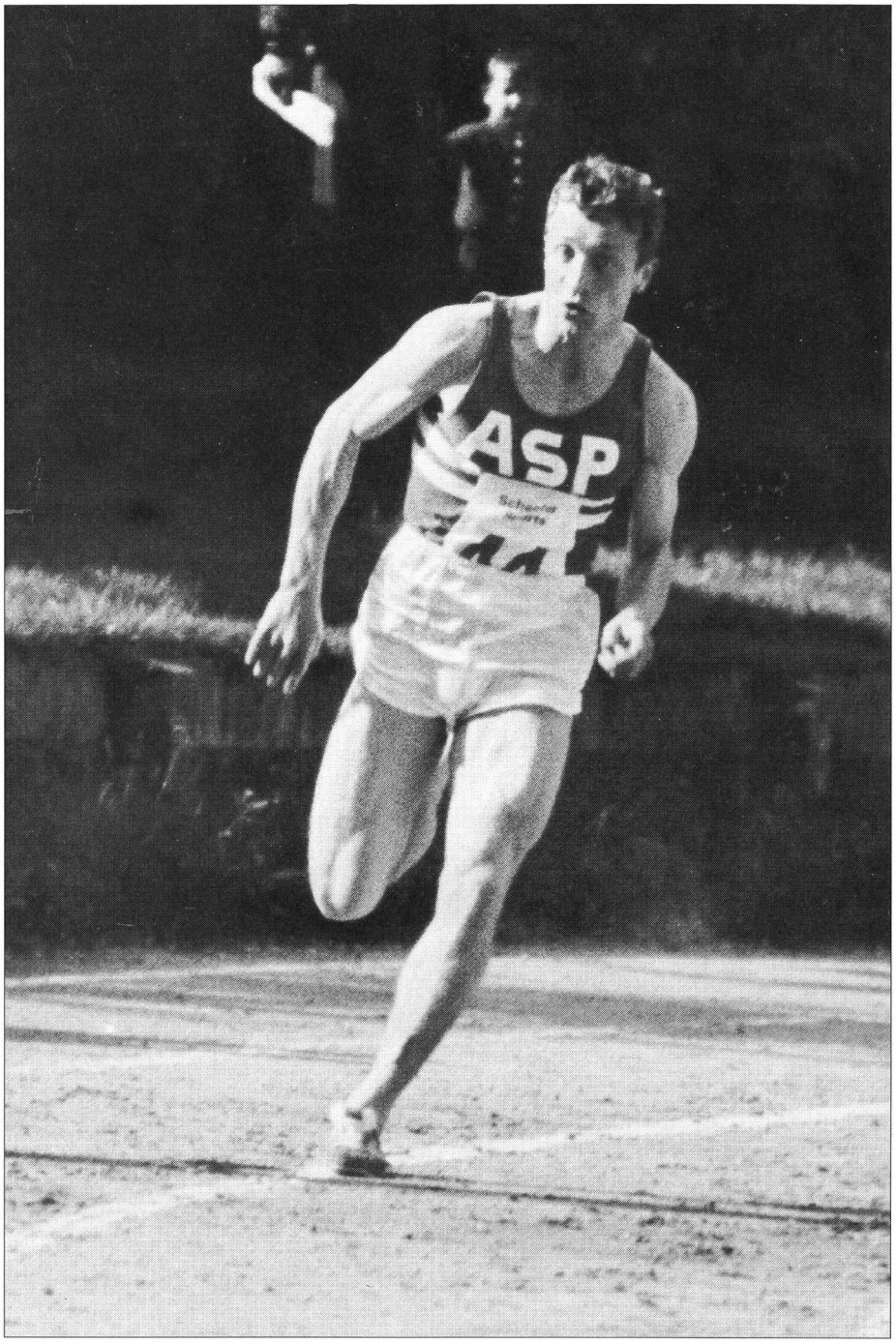
Elle dépend de la quantité des réserves de glycogène et elle est limitée par la tolérance de l'athlète au lactate.

Selon l'état d'entraînement, des valeurs de lactate de plus de 20 mmol/l peuvent être atteintes et tolérées.

Cependant, dès 6 à 8 mmol/l de lactate sanguin, les qualités de coordination, ainsi que les facultés techniques et tactiques, commencent à être perturbées *(Liesen).*

Un entraînement qui comprend des efforts conduisant à des taux de lactate de plus de 10 à 14 mmol/l influence négativement la faculté de performance aérobie. Après un entraînement d'«endurance-vitesse» qui peut amener à des concentrations de lactate de plus de 15mmol/l (jusqu'à 24), l'aptitude à apprendre des mouvements complexes peut être perturbée pendant 48 h *(Liesen,* 1986).

Au vu de ces phénomènes concomitants négatifs, causés par les hautes concentrations en lactate, l'entraînement de la capacité anaérobie doit être planifié très prudemment.



Un 400 m sollicite fortement la fonction anaérobie.

On remarque également, souvent, que dans certains jeux sportifs, les athlètes sont soumis, lors des entraînements, à un volume trop important d'efforts dans le domaine anaérobie et qui conduisent à des valeurs de lactate trop élevées. De telles «tortures» sont non seulement totalement inutiles (puisque, lors de compétitions dans ces mêmes sports, les valeurs de lactate n'atteignent jamais plus de 10 mmol/l), mais elles font même effet contraire, car l'entraînement de cette capacité anaérobie diminue la puissance aérobie. On ne s'étonnera donc pas que des sportifs s'entraînant fréquemment très dur arrivent à de mauvais résultats lors des tests de Conconi ou des tests par intervalles. Il leur manque la puissance aérobie, qui leur permettrait de couvrir leurs besoins énergétiques durant la compétition, grâce au métabolisme aérobie, et de récupérer rapidement et complètement lors des interruptions de l'effort s'il s'agit de sports par équipes par exemple.

La capacité anaérobie est aussi un élément de la condition physique qui, chez le jeune, ne peut être amélioré que par un entraînement extrême et qui implique un stress psychique important. On ne devrait donc introduire un travail spécifique dans ce domaine, en l'occurrence, qu'en fonction d'un besoin démontré et sur la base d'une puissance aérobie très bien développée. ■