

**Zeitschrift:** Jeunesse et sport : revue d'éducation physique de l'École fédérale de gymnastique et de sport Macolin

**Herausgeber:** École fédérale de gymnastique et de sport Macolin

**Band:** 37 (1980)

**Heft:** 5

**Rubrik:** Recherche, entraînement, compétition

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

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



## Endurance: importance, limites et méthodes de mesure

H. Howald

L'endurance joue un rôle important dans le complexe desdits facteurs de condition physique. Elle est définie comme capacité aérobie, c'est-à-dire la faculté de l'organisme d'absorber de l'oxygène et de le transporter aux différents organes où il est transformé en énergie nécessaire aux fonctions vitales et au travail. Dans la compétition sportive, l'endurance devient le facteur de condition physique prépondérant dès qu'un exercice dure plus de 2 ou 3 minutes. Pour un travail de brève durée et souvent intensif, l'énergie nécessaire peut également être produite sans oxygène (production anaérobie).

La figure 1 donne un aperçu des proportions entre la production aérobie et anaérobie d'énergie dans les disciplines les plus importantes. Bien que de petits écarts soient toujours possibles, notamment dans les jeux, ce tableau est une aide précieuse pour juger l'importance de l'endurance dans les différentes branches sportives.

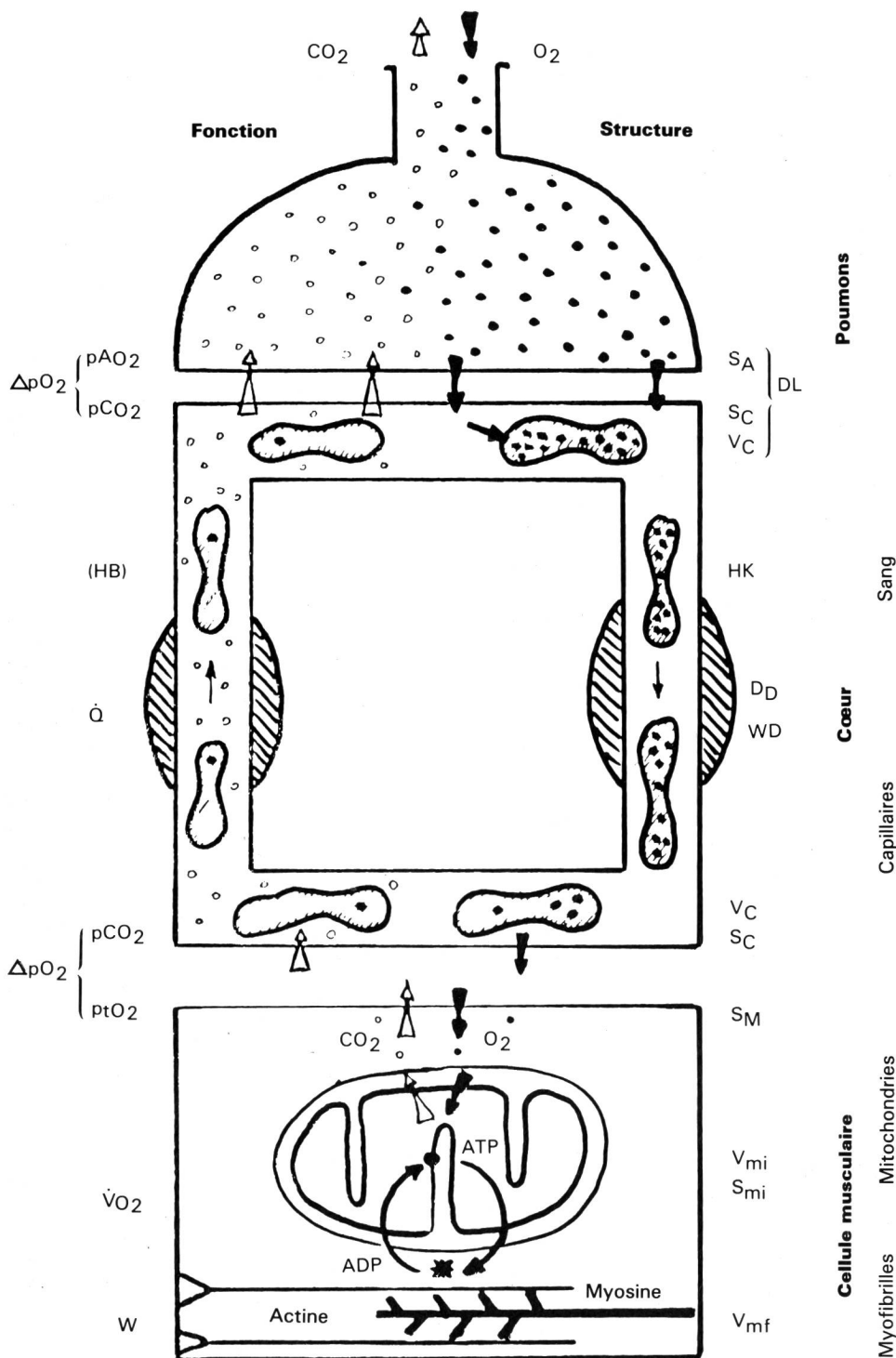
## Facteurs limitant l'absorption et la consommation d'oxygène

Les poumons, le cœur, les vaisseaux sanguins avec leurs globules rouges (érythrocytes) participent au transport de l'oxygène, apporté par la respiration, jusqu'aux muscles en action. La structure et la fonction de ces systèmes d'organes sont présentées schématiquement dans la figure 2.

L'oxygène ( $O_2$ ) traverse la trachée et les bronches pour arriver aux alvéoles pulmonaires qui sont en étroit rapport avec les capillaires de la circulation pulmonaire. Etant donné que la pression d'oxygène ( $pAO_2$ ) est plus grande dans les alvéoles que dans les capillaires voisins ( $pCO_2$ ), l'oxygène pénètre dans les capillaires par ce qu'on appelle diffusion, grâce à cette différence de pression ( $\Delta pO_2$ ). La capacité de diffusion des poumons (DL) dépend de la surface totale des alvéoles ( $S_A$ ), de la surface des capillaires ( $S_C$ ) et du volume de ces capillaires ( $V_C$ ). Dans

	<b>Aérobie</b>	<b>Anaérobie</b>	
Course de 100 m	0%	100%	Haltérophilie Gymnastique artistique
Lutte Escrime	10%	90%	Basketball Volleyball Handball Hockey sur glace
Course de 400 m Natation (100 m)	20%	80%	Tennis Football
Course de 800 m Natation (200 m)	30%	70%	
Course de 1500 m	40%	60%	
Course de 4000 m	50%	50%	Boxe
Natation (400 m)	60%	40%	Cyclisme (4 km)
Natation (800 m)	70%	30%	
Natation (1500 m)	80%	20%	Aviron (2000 m)
Course de 5000 m Course de 10 000 m	90%	10%	Cyclisme sur route
Marathon Jogging	100%	0%	Ski de fond
	<b>Aérobie</b>	<b>Anaérobie</b>	

Figure 1: La production aérobie et anaérobie d'énergie dans les sports les plus importants (d'après Fox).



des conditions atmosphériques normales (au maximum à 1500 m d'altitude) et si les organes respiratoires sont sains, la respiration n'est pas un facteur qui limite la capacité aérobie, vu que les possibilités structurelles et fonctionnelles des poumons (maximum respiratoire) ne sont jamais totalement épuisées, même si l'effort est maximal. Par conséquent, il est impossible d'apprécier l'endurance en mesurant simplement la fonction des poumons comme par exemple la capacité vitale (maximum d'air expiré après une inspiration forcée) et la capacité durant la première seconde (volume d'air chassé durant la première seconde d'une expiration forcée).

Dans les capillaires des poumons, l'oxygène est immédiatement absorbé par les globules rouges et fixé au pigment rouge du sang (hémoglobine, HB). La quantité d'oxygène que le sang peut transporter dépend du pourcentage des érythrocytes dans le plasma sanguin (hématocrite, HK). Si le nombre des érythrocytes et le taux d'hémoglobine diminuent, l'endurance est fortement perturbée, ce qui signifie qu'un sportif qui souffre d'une anémie, même légère, ne pourra jamais réaliser de grandes performances dans les disciplines d'endurance. Le cas contraire, c'est-à-dire l'augmentation du nombre de globules rouges, but recherché par exemple par l'auto-transfusion sanguine, ne semble pas provoquer une amélioration de la capacité aérobie, d'une part parce qu'un excédent d'érythrocytes rend le sang plus visqueux empêchant ainsi la circulation dans les capillaires, et d'autre part probablement parce qu'un surplus d'oxygène n'est pas consommé par les cellules musculaires.

Le transport du sang des capillaires aux poumons et de là aux capillaires des muscles en action est assuré par le cœur dont le débit ( $\dot{Q}$ ) dépend du diamètre des ventricules ( $D_D$ ) et de l'épaisseur de la paroi musculaire ( $W_D$ ). Un entraînement d'endurance pendant plusieurs années mène à une dilatation du cœur, et par là à une augmentation du débit. Selon les notions les plus récentes, cette dilatation se manifeste chez les coureurs de fond et les skieurs de fond par une hausse de la « cylindrée » (diamètre des ventricules,  $D_D$ ) et chez les rameurs par un épaississement de la masse musculaire du cœur ( $W_D$ ). La capacité cardiaque est certes un facteur déterminant pour l'endurance, mais elle n'est pas le seul comme on le prétendait souvent dans le passé.

Dans le muscle, les capillaires sont en étroit rapport avec les cellules musculaires et l'oxygène passe, également par diffusion, du sang à ces cellules. Comme dans les poumons, ce processus dépend d'une part de la pression de l'oxygène

Figure 2: Explications dans le texte (d'après Weibel)

ne dans les capillaires ( $pCO_2$ ) et les cellules musculaires ( $ptO_2$ ) ainsi que du volume des capillaires ( $V_C$ ), et d'autre part de la surface totale des capillaires ( $S_C$ ) et des cellules musculaires ( $S_M$ ).

Dans la cellule musculaire, les molécules d'oxygène sont transportées jusqu'aux mitochondries («centrales d'énergie cellulaires»), intercalées dans les myofibrilles (fibres musculaires très fines composées des substances protidiques myosine et actine), grâce à la différence entre la pression à la périphérie et celle au centre de la cellule. Ce transport passif à l'intérieur de la cellule musculaire est facilité par la myoglobine (pigment musculaire) qui est apparentée chimiquement à l'hémoglobine des érythrocytes. Dans les mitochondries a lieu la respi-

ration cellulaire, c'est-à-dire la «combustion» par oxydation de déchets du sucre de raisin et/ou des acides gras. Le but de ce catabolisme est la production d'adénosinetriphosphate (ATP), une synthèse riche en énergie nécessaire au travail des muscles (réaction entre les molécules de myosine et d'actine) qui est transformée en adénosinediphosphate (ADP). La consommation maximale d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ ) par les cellules musculaires dépend du volume des mitochondries ( $V_{mi}$ ) et de la surface de la membrane mitochondriale ( $S_{mi}$ ) dans laquelle se trouvent les enzymes (molécules protidiques spécialisées dans la régulation de réactions chimiques) qui sont nécessaires à la combustion précitée. Le travail ( $W$ ) de la cellule musculaire est conditionné par le volume des myofibrilles

( $V_{mf}$ ). L'entraînement d'endurance a pour effet une augmentation du volume des mitochondries par rapport au volume global de la cellule et un rendement plus élevé des enzymes qui participent à la respiration cellulaire. En d'autres termes, une cellule musculaire d'un sujet entraîné peut consommer, dans une unité de temps donnée, davantage d'oxygène et produire ainsi davantage d'ATP que celle d'un sujet non entraîné. Le travail de musculation, par contre, permet d'augmenter le volume des myofibrilles mais mène simultanément à une diminution relative du volume des mitochondries.

Le produit final de la respiration cellulaire est l'acide carbonique ( $CO_2$ ) qui passe, par diffusion, des mitochondries et de l'intérieur de la cellule aux capillaires qui le transporte, dissous dans le sang, jusqu'aux capillaires des poumons. L'acide carbonique pénètre ensuite dans les alvéoles pulmonaires, où il se mélange à l'air qui sera expiré, grâce à la pression d'acide carbonique qui est bien plus élevée dans les capillaires que dans les alvéoles. L'élimination de l'acide carbonique provenant du travail musculaire n'est pas un facteur limitatif de l'endurance.

#### Méthodes pour déterminer l'endurance

La médecine du sport connaît aujourd'hui des méthodes qui permettent de juger quantitativement la capacité de tous les systèmes d'organes nécessaires à un haut degré d'endurance (par exemple la capacité de diffusion des poumons, le débit du cœur, le taux d'hémoglobine, le volume des mitochondries et la surface de leur membrane, la consommation de substances nutritives et d'oxygène). Les différentes méthodes sont toutefois assez compliquées et posent parfois de hautes exigences aux personnes qui accomplissent les tests. Il faut donc recourir, dans la pratique, à des procédés plus simples, compte tenu que la détermination de la consommation maximum d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ ) lors d'une charge maximale reste le meilleur critère de base pour déterminer l'endurance. La consommation momentanée d'oxygène peut être considérée comme le résultat aussi bien du transport de l'oxygène des poumons aux cellules musculaires en passant par le cœur que la consommation d'oxygène dans les cellules mêmes. La  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  s'exprime en ml/mn/kg du poids du corps et donne un excellent point de repère pour la capacité aérobie. Les Suisses non entraînés de 20 à 30 ans atteignent 45 ml/mn/kg, tandis que les coureurs de fond, les coureurs d'orientation, les skieurs de fond et les cyclistes disposent d'une  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  de 80 à 85 ml/mn/kg.



### Extrapolation de la $\dot{V}O_2$ max sur la base d'une performance à l'ergomètre et de la fréquence cardiaque en «steady-state»

$$\dot{V}O_2 \text{ max (ml/mn/kg)} = \frac{(195 - 61) \cdot [(6,12 \cdot W \cdot 10,18) + (670 \cdot SC)] \cdot [215 - (\text{âge})]}{(FC - 61) \cdot 5 \cdot 198 \cdot P} \quad \text{sexe masculin}$$

$$\dot{V}O_2 \text{ max (ml/mn/kg)} = \frac{(198 - 72) \cdot [(6,12 \cdot W \cdot 10,18) + (670 \cdot SC)] \cdot [215 - (\text{âge})]}{(FC - 72) \cdot 5 \cdot 198 \cdot P} \quad \text{sexe féminin}$$

**Légende:** W = performance en watt; FC = fréquence cardiaque; P = poids du corps en kg  
 SC = surface du corps =  $P^{0,425} \cdot H^{0,725} \cdot 71,84 \cdot 10^{-4}$  (P = poids en kg; H = taille en cm)  
 (m<sup>2</sup>) (kg) (cm)

Exemples:	Poids (kg)	Taille (cm)	Age (années)	Performance (watt)	Fréquence cardiaque (mn <sup>-1</sup> )	$\dot{V}O_2$ max (ml/mn/kg)	Fréquence cardiaque max. (mn <sup>-1</sup> )
Sexe masculin	75	180	43	180	155	42,0 39,0 45,1	172 160 185
Sexe féminin	60	170	35	120	160	37,4 34,2 40,5	180 165 195

Tableau: Formules pour déterminer la  $\dot{V}O_2$  max et exemples

Pour déterminer directement la  $\dot{V}O_2$  max, il faut disposer d'un laboratoire de physiologie de l'effort bien équipé avec des ergomètres et les appareils nécessaires pour mesurer la fonction des poumons. Partant de ces méthodes qui ne sont pas accessibles à tout le monde, on a développé des procédés simples qui devraient permettre de déduire la  $\dot{V}O_2$  max d'une performance déterminée réalisée à la bicyclette ergométrique et de la fréquence cardiaque résultant de cet exercice. Bien qu'un procédé de ce genre exige moins de temps et d'argent, il faut être conscient que le résultat final est purement mathématique et basé sur de nombreuses hypothèses. Le tableau ci-dessous montre les formules employées pour l'extrapolation de la  $\dot{V}O_2$  max prenant comme valeurs le résultat d'un test ergométrique et la fréquence cardiaque mesurée lorsque le «steady-state» (état d'équilibre) a été atteint. La charge devrait être telle à exiger au moins 120 pulsations et au maximum 170 pulsations par minute. En plus de la performance à l'ergomètre mesurée en watt et de la fréquence cardiaque, il faut connaître le poids, la taille, l'âge et le sexe de la personne concernée.

Dans les formules du tableau, on suppose que la fréquence cardiaque maximale que l'homme peut atteindre est de 215 pulsations par minute et que cette valeur diminue d'une pulsation par

minute chaque année. Ce principe est basé sur des enquêtes de grande envergure. Toutefois, il est possible que la valeur individuelle s'écarte fortement de cette moyenne, ce qui peut mener à des résultats faussés si on utilise ces méthodes simples. Les exemples dans le tableau montrent que les personnes dont la fréquence cardiaque maximale est inférieure à celle qui correspondrait à leur âge sont avantagées, tandis que celle qui possèdent une fréquence cardiaque maximale supérieure à la moyenne sont désavantagées. Une correction n'est possible que si on peut mesurer la fréquence cardiaque maximale et l'insérer dans la formule à la place de la parenthèse [215 - (âge)]. Contrairement à la charge en «steady-state», il peut être dangereux de soumettre des personnes, surtout si elles ont déjà un certain âge, à une charge maximale pour mesurer la fréquence cardiaque maximale. Un tel procédé ne devrait donc pas devenir une routine. La méthode ergométrique simplifiée pour déterminer la  $\dot{V}O_2$  max est particulièrement bien adaptée à l'observation d'une seule personne, par exemple pour documenter l'amélioration de l'endurance durant une phase d'entraînement. Par contre, elle se prête mal à la comparaison de la capacité aérobie de plusieurs personnes, étant donné que les erreurs lors de l'extrapolation sont relativement grandes à cause notamment de la fréquence cardia-

que maximale qui peut varier considérablement d'un sujet à l'autre et en raison d'autres facteurs.

Si on ne dispose pas d'une bicyclette ergométrique, la méthode la plus simple pour déterminer l'endurance est le test de 12 minutes de Cooper. Il s'agit dans ce cas de parcourir, sur un terrain plat, la plus grande distance possible en 12 minutes exactes en courant ou en marchant. Vu qu'un effort durant 12 minutes dépend presque exclusivement (90 pour cent et plus) de la capacité aérobie, il est possible de déterminer la  $\dot{V}O_2$  max sur la base de la distance parcourue. Des expériences ont montré que ces deux méthodes (bicyclette ergométrique et test de 12 minutes) concordent de manière satisfaisante. La consommation maximale d'oxygène peut être estimée selon la formule suivante si l'on connaît la distance parcourue en 12 minutes:

$$\dot{V}O_2 \text{ max (ml/mn/kg)} = (0,02 \times \text{distance parcourue}) - 5,4$$

(Exemple: distance parcourue = 2500 m,  $\dot{V}O_2$  max = 44,6 ml/mn/kg)

Adresse de l'auteur:

Dr med. Hans Howald  
 Chef de l'Institut de recherches  
 Ecole fédérale de gymnastique et de sport  
 CH-2532 Macolin