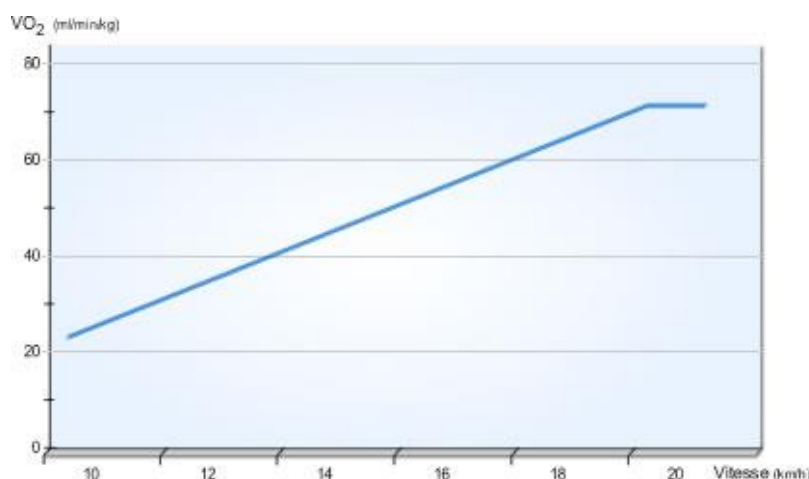


La consommation maximale d'oxygène

- Sources :** *Biologie de l'exercice musculaire*. J.R. Lacour. Masson, Paris, 1992.
Biologie du sport. Jürgen Weineck. Vigot, Paris, 1992.
Physiologie du sport. Bases physiologiques des activités physiques et sportives.
H.Monod, R.Flandrois. 4^e édition, Masson, Paris, 1997.
A quoi sert VO₂max ? Denis Riché, in Sport et Vie n° 43, Juillet – Août 1997.
Physiologie et méthodologie de l'entraînement. Véronique Billat. DeBoeck Université,
Paris, Bruxelles, 1998.
Physiologie de l'exercice musculaire. G.Millet, S.Perrey, Ellipses, Paris, 2005.

Au cours d'un exercice d'intensité croissante réalisé en laboratoire (sur ergomètre), on constate que la consommation d'oxygène augmente linéairement avec la puissance développée (ou la vitesse) jusqu'à une valeur limite qui reste constante, même si la puissance imposée est encore accrue. Cette valeur limite représente **la consommation maximale d'oxygène** (VO₂max, exprimée en litres d'O₂/min.) à laquelle correspondent **la puissance maximale aérobie** (PMA, exprimée en watts), et **la vitesse maximale aérobie** (VMA, exprimée en km/h).



Comme le déplacement du propre poids du corps intervient dans la demande d'énergie de la plupart des activités sportives (marche, course, cyclisme...), la consommation maximale d'oxygène s'exprime généralement en ml.min⁻¹.kg⁻¹.

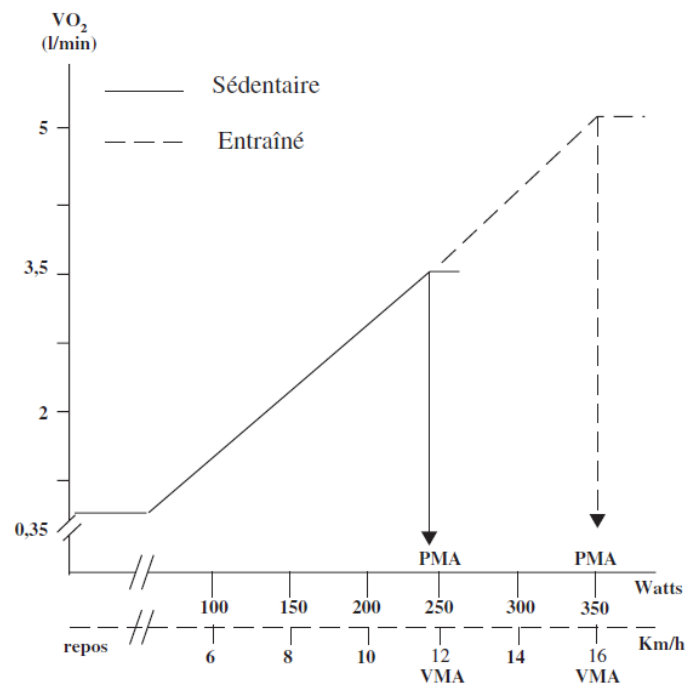
Il est donc possible d'améliorer ses valeurs de consommation maximale d'oxygène (en valeur relative), simplement grâce à une diminution du poids du corps (et donc sans gain de puissance). Soit un coureur à pieds de 65 kg dont les valeurs de VO₂max sont de 4,9 l.min et de 76 ml.min⁻¹.kg⁻¹. Si ce coureur perd 2 kg, son VO₂max exprimé en valeur absolue sera toujours de 4,9 l.min, mais il atteindra 77,8 ml.min⁻¹.kg⁻¹ en valeur relative (soit + 1,8).

Consommation maximale d'oxygène (VO₂max) = quantité maximale d'oxygène par unité de temps qu'un individu peut consommer, c'est à dire prélever, transporter, et utiliser, dans des conditions d'exercice qui sollicitent totalement ses possibilités cardiovasculaires → expression en l/min ou en ml.min⁻¹.kg⁻¹
VO₂max est le nombre d'ATP resynthétisé par la voie aérobie par unité de temps.

Puissance maximale aérobie (PMA) = c'est la puissance de travail maximale que le sujet développe à VO₂max
→ expression en Watts.

Formule de Hawley : VO₂max (en L/mn) = 0,01141 x PMA + 0,435 → attention seulement estimation.

Vitesse maximale aérobie (VMA) = c'est la plus petite vitesse que le sujet atteint lorsqu'il est à VO_2max → expression en km/h.
 Formule de Léger & Mercier : $VO_2max (ml.min^{-1}.kg^{-1}) = VMA \times 3.5$ → attention seulement estimation.



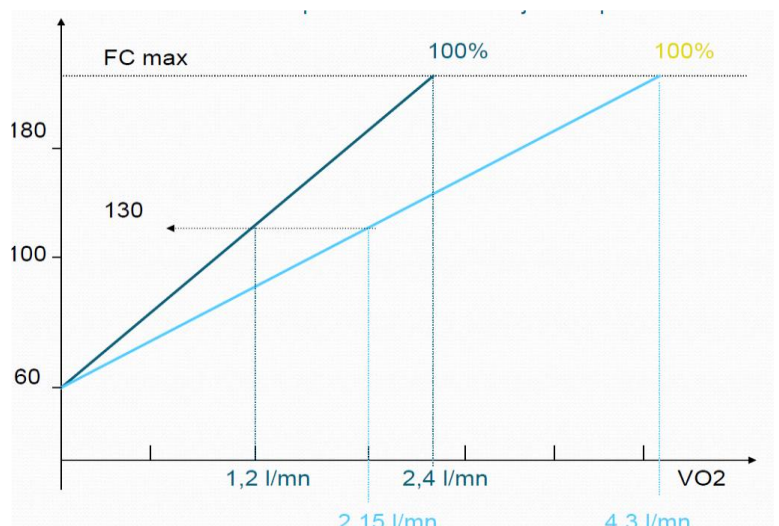
I. Valeurs

Chez l'adulte jeune de sexe masculin, VO_2max s'élève à environ à 3 l/min pour les hommes (soit 10 fois les dépenses de repos), et 2 l/min pour les femmes. En valeur relative, VO_2max est d'environ $45 ml.min^{-1}.kg^{-1}$ pour les hommes (ce qui représente environ une PMA de 250 watts mesurée sur bicyclette ergométrique), et $35 ml.min^{-1}.kg^{-1}$ pour les femmes (soit une PMA d'environ 200 watts sur bicyclette ergométrique).

Jusqu'à l'âge de 10 ans, les VO_2max des garçons et des filles sont statistiquement très proches.

Les valeurs limites relevées chez des athlètes spécialisés dans les sports d'endurance sont de $90 ml.min^{-1}.kg^{-1}$ pour les hommes (soit plus 5,5 l/min pour un sujet de 60 kg), et $75 ml.min^{-1}.kg^{-1}$ pour les femmes (soit près de 4 l/min pour un sujet de 50 kg).

Fréquence cardiaque en fonction de la puissance selon 2 sujets possédant une consommation maximale d'oxygène différente.



Disciplines sportives	Age (ans)	VO2 max homme (mL.min-1.kg-1)	VO2 max femme (mL.min-1.kg-1)
Aviron	18-34	60-73	56-64
Base-ball	18-34	46-56	44-53
Basket-ball	18-30	45-55	42-53
Canoë	20-35	53-66	47-55
Course de fond	18-28	61-76	55-70
Cyclisme	18-30	62-76	49-65
Equitation	16-30	46-52	35-45
Football	16-29	53-63	42-54
Golf	20-35	44-52	37-49
Gymnastique	16-27	52-57	37-52
Haltérophilie	20-30	39-50	36-49
Handball	18-30	47-58	41-53
Marche	20-35	52-60	48-53
Natation	14-27	50-65	42-55
Patinage artistique	14-25	55-67	48-55
Patinage de vitesse	16-30	57-70	49-60
Ski de fond	18-30	60-80	57-70
Ski alpin	18-30	52-62	49-55
Sprint	18-30	54-60	49-58
Tennis	18-30	52-63	49-56
Triathlon	18-29	61-75	53-66
Volley-ball	18-30	49-54	42-53

VO ₂ max ml/mn/kg	Athlète	Genre	Sport
96	Espen Harald BJERKE	M	Ski de fond
92.5	Greg LEMOND	M	Cyclisme sur route
92	Bernard HINAULT		Cyclisme sur route
92	Kilian JORNET	M	Trail
92	Matt CARPENTER	M	Marathon, Trail
88	Miguel INDURAIN	M	Cyclisme sur route
90	Bjørn DAEHLIE	M	Ski de fond
84.6	Chris FROOM	M	Cyclisme sur route
82	Hicham EL GUERROUJ		Athlétisme demi-fond
73.5	Greta WAITZ	F	Marathon
71.2	Ingrid KRISTIANSEN	F	Marathon
70	Richard VIRENQUE	M	Cyclisme sur route
67.2	Rosa MOTA	F	Marathon
VO₂max de l'antilope : 300 ml.min⁻¹.kg⁻¹			

II. Facteurs limitant la consommation maximale d'oxygène

La consommation maximale d'oxygène dépend des capacités de prélèvement de l'oxygène, de transport de l'oxygène, et d'utilisation de l'oxygène par l'organisme (chaîne poumons, cœur, muscles). Elle fait donc intervenir trois grands systèmes : le système pulmonaire, le système cardiovasculaire, et les muscles. Nous allons étudier les hypothèses d'une limitation centrale et/ou périphérique.

2.1 Le système pulmonaire

A ce niveau, la consommation d'oxygène par l'organisme fait intervenir :

- La ventilation : les possibilités maximales de ventilation pulmonaire augmente avec VO_{2max} (de 120 l/min chez le sédentaire dont $VO_{2max} = 3$ l/min, jusqu'à 200 l/min si $VO_{2max} > 5$ l/min).
- La diffusion alvéolo-capillaire de l'oxygène : elle augmente aussi avec l'intensité de l'exercice mais il semblerait qu'elle plafonne avant VO_{2max} (les avis divergent à ce sujet, pour certains elle plafonnerait à une valeur modérée du métabolisme correspondant à moins de 50% de VO_{2max} ; pour d'autres, elle augmenterait proportionnellement au métabolisme jusqu'à VO_{2max}).

Bien que des controverses existent, le système pulmonaire n'est généralement pas considéré comme un facteur limitant de la consommation maximale d'oxygène chez des sujets en bonne santé. Néanmoins, chez les athlètes bien entraînés ($VO_{2max} > 60$ ml.min⁻¹.kg⁻¹), il semblerait que la diffusion alvéolo-capillaire limite VO_{2max} .

2.2 Le système cardiovasculaire

A ce niveau, la consommation d'oxygène va dépendre de trois facteurs principaux :

- Le débit cardiaque (Q) : il dépend du volume d'éjection systolique (VES) et de la fréquence cardiaque (FC) : $Q = VES \times FC$. A l'exercice, on constate un accroissement du débit cardiaque consécutif à une augmentation conjuguée du volume d'éjection systolique (jusqu'à 50% de VO_{2max}) et de la fréquence cardiaque (jusqu'à une valeur limite déterminée par l'âge et égale approximativement à $220 - \text{âge}$ pour le sédentaire). L'augmentation de VO_{2max} par l'entraînement s'accompagne d'une augmentation marquée du débit cardiaque maximal. Cette augmentation ne dépend pas de la FC max (qui n'est pas affectée par l'entraînement), mais dépend d'un accroissement du volume d'éjection systolique consécutif à une augmentation de volume des ventricules et de la force de contraction du myocarde (VES peut atteindre 200 ml chez des athlètes à VO_{2max} proche de 6 l/min).

	VES ml	FC mn	Q L/mn	Ca-Cv ml/100ml	VO ₂ L/mn	VO ₂ ml/mn/kg
AU REPOS	98	50	4,9	6	0.295	4.91
A L'EFFORT	131	200	26,2	15	3.93	65.5

- La capacité de transport de l'oxygène par le sang : elle correspond au produit du débit cardiaque par la concentration du sang artériel en oxygène ($Q \times CaO_2$). C'est la quantité d'oxygène dont disposent les tissus chaque minute. La concentration du sang artériel en oxygène fait intervenir deux paramètres : la concentration en hémoglobine (Hb), et le niveau de saturation de l'hémoglobine par l'oxygène (SaO_2). Or le contenu artériel en oxygène (CaO_2) n'est pas significativement différent entre les sujets disposant d'une consommation maximale d'oxygène

faible, moyenne ou élevée. Ceci laisse supposer que c'est surtout le débit cardiaque qui soit l'élément essentiel de variabilité de $VO_2\text{max}$.

Des méthodes de dopage ont pour objet d'améliorer artificiellement les valeurs de CaO_2 : il s'agit de l'auto-transfusion sanguine, de l'usage de l'érythropoïétine (EPO) ou de perfluorocarbone (PFC).

- L'irrigation des cellules musculaires : cette irrigation dépend des capacités de transport de l'oxygène par le sang (voir ci-dessus) ainsi que du nombre de capillaires qui entourent chaque fibre musculaire (capillarisation des muscles). Des études ont montré une corrélation très étroite entre le nombre moyen de capillaires au voisinage de chaque fibre et $VO_2\text{max}$.

Il semblerait que le principal facteur limitant $VO_2\text{max}$ soit le débit cardiaque maximal, surtout chez les sujets entraînés. Il existe une relation sensiblement linéaire entre l'augmentation de $VO_2\text{max}$ liée à l'entraînement et celle du débit cardiaque maximal : chez l'homme, toute augmentation de $VO_2\text{max}$ de 1 l/min correspond à une augmentation de Q d'environ 5 l/min (des valeurs de Q de 40 l/min ont été observées chez des athlètes dont $VO_2\text{max}$ est de 6 l/min).

2.3 Les muscles

Si les muscles reçoivent suffisamment d'oxygène des niveaux centraux, encore faut-il que cet oxygène puisse être utilisé au niveau local. $VO_2\text{max}$ dépend donc également de l'aptitude des muscles à utiliser l'oxygène. Cette limitation dite « périphérique » va dépendre principalement de :

- La typologie des muscles : la richesse en fibres I et IIa. Ces fibres prédominent largement chez les sportifs spécialisés dans les efforts d'endurance et sont en petite quantité chez les sportifs des efforts de vitesse.
- L'activité des enzymes oxydatives dans les mitochondries : des relations ont été démontrées entre la quantité d'enzymes du cycle de Krebs (SDH = succinate deshydrogénase) et $VO_2\text{max}$. Le nombre de mitochondries (densité mitochondriale) et l'activité enzymatique des mitochondries augmentent comme $VO_2\text{max}$ sous l'effet de l'entraînement.

L'aptitude locale à utiliser l'oxygène va déterminer la **différence artérioveineuse ($CaO_2 - CvO_2$)**, c'est à dire la différence entre le contenu artériel en oxygène et le contenu en oxygène du sang veineux (il s'agit du sang veineux mêlé, c-a-d du mélange des différents sangs arrivant dans l'oreillette droite). Plus cette différence est importante, plus le muscle a utilisé un pourcentage important d'oxygène.

$$\begin{aligned} \text{Formule de Fick : } VO_2\text{max} &= Q_{\text{max}} (CaO_2 - CvO_2) \\ &= FC_{\text{max}} * ves_{\text{max}} * (CaO_2 - CvO_2) \end{aligned}$$

2.4 Conclusion sur les facteurs limitant $VO_2\text{max}$ (R.Flandrois)

« En définitive, les différents éléments qui composent le système d'échanges gazeux conditionnent plus ou moins la grandeur de la consommation maximale d'oxygène. Mais quel élément peut jouer un rôle prépondérant dans sa limitation ? Il semble que le facteur limitant pourrait varier avec l'aptitude aérobie. La consommation maximale d'oxygène des sujets moyennement aptes ($VO_2\text{max}$ entre 35 et 50 $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) semble être limitée par les possibilités fonctionnelles musculaires (...) chez ces sujet, une altération de leur capacité de transport de l'oxygène par un bêtabloquant n'a pas d'effet sur leur $VO_2\text{max}$. En revanche, les sujets dotés d'une bonne aptitude aérobie ($VO_2\text{max}$ entre 50 et 60 $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) ont une baisse de $VO_2\text{max}$ quand leur capacité de transport de l'oxygène est diminuée par un bêtabloquant. Le débit cardiaque serait donc, dans ce cas, facteur limitant. Enfin, chez les athlètes bien entraînés dont la consommation maximale d'oxygène est supérieure à 60 $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$, l'apparition d'une désaturation oxyhémoglobinée à l'approche de

l'exercice maximal, laquelle disparaît sous hypoxie légère, permet de penser à une limitation respiratoire ».

R.Flandrois, Le métabolisme aérobie à l'exercice musculaire, in Biologie de l'exercice musculaire, sous la direction de J.R.Lacour, Masson, Paris, 1992.

→ donc plutôt des limites périphériques chez les sédentaires, et des limites centrales chez les sujets bien entraînés.

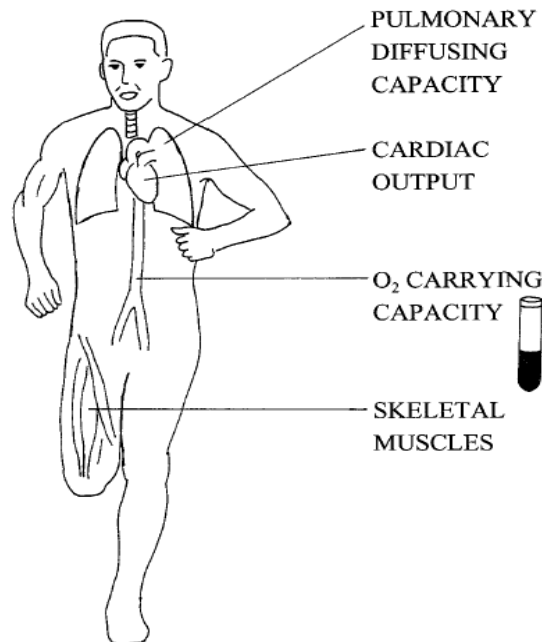


Figure 4—Physiological factors that potentially limit maximum oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$) in the exercising human.

D'après Bassett et Howley, 2000

III. Facteurs de variabilité de VO_{2max}

3.1 Le sexe

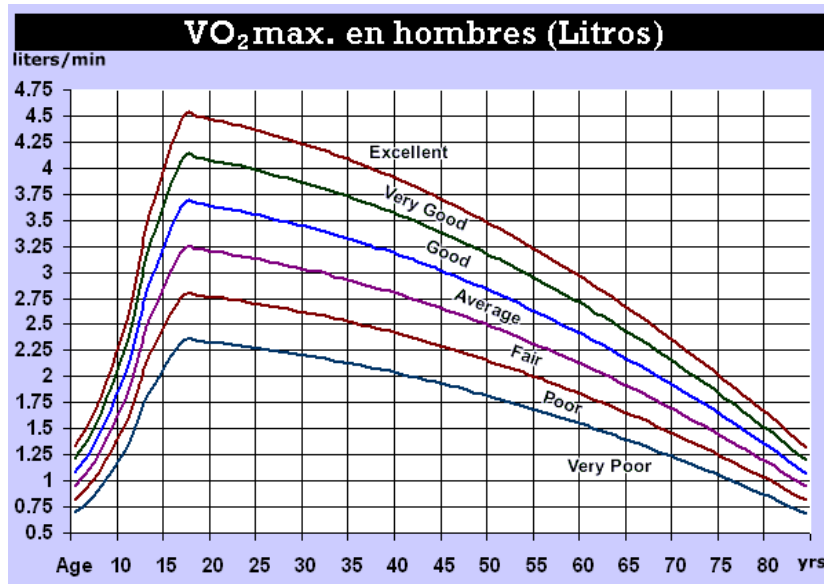
La consommation maximale d'oxygène est statistiquement plus faible (environ – 25%) chez la femme adulte que chez l'homme adulte (jusqu'à la puberté, on n'observe pas de différence de VO_{2max} significative entre les deux sexes). Deux facteurs expliquent cette différence :

- Le pourcentage de masse grasse est plus élevé chez la femme que chez l'homme (25% en moyenne contre 15%). Néanmoins, la différence liée au sexe persiste quand on rapporte VO_{2max} à la masse maigre (l'écart n'est plus que de 10-15%).
- L'hématocrite (= concentration de globules rouges dans le sang, et donc d'hémoglobine) des femmes est légèrement plus faible que celle des hommes (37-47% contre 40-50%). Les femmes disposent donc de capacités de transport de l'oxygène inférieures à celles des hommes.

3.2 L'âge

Exprimée en valeur absolue (l/min), la consommation maximale d'oxygène augmente jusqu'à l'âge adulte, pour atteindre sa valeur la plus élevée à 20 ans en moyenne. Elle se stabilise jusqu'à 30 ans pour ensuite décroître progressivement (environ – 0.7% / an) et ne plus représenter à 60 ans que 70% de sa valeur initiale (cette régression peut être néanmoins retardée par un entraînement régulier en endurance).

Exprimée en valeur relative ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), la consommation maximale d'oxygène la plus élevée est observée vers la dixième année. Elle diminue constamment par la suite chez les sujets sédentaires. En revanche, les sujets entraînés augmentent leur valeur maximale de VO_2max jusque vers la vingtième année.



3.3 L'hérédité

Les valeurs individuelles de VO_2max dépendent en partie du génotype qui affecte aussi bien la capacité de transport de l'oxygène que la structure du muscle (l'hérédité intervient au niveau des dimensions cardiaques et en conséquence du débit cardiaque, ainsi qu'au niveau des enzymes clés du cycle de Krebs et de la B oxydation). Selon certains scientifiques, le rôle de l'hérédité intervient pour 25% à 50% de la valeur de VO_2max (Bouchard et coll, 1986).

Mais le domaine où l'hérédité intervient de façon la plus décisive concerne la variabilité des effets de l'entraînement sur VO_2max (entraînabilité) : un même type d'entraînement peut avoir des effets très différents variant de 0 à 40% d'amélioration.

3.4 L'entraînement

L'entraînement peut déterminer une augmentation de VO_2max allant de 0 à 40%, la moyenne se situant entre 15 et 20% d'amélioration. Pour cela, l'idéal est d'adopter des charges d'entraînement régulières (plusieurs fois par semaine) et intensives (puissance égale ou proche de la PMA, sous la forme d'efforts fractionnés à I5). Une fois acquise, cette augmentation peut être conservée par un entraînement de même intensité, mais de durée réduite de plus de la moitié.

Les effets de l'entraînement dépendent de l'hérédité, mais aussi du niveau de VO_2max initial et de l'âge : ces effets sont plus marqués chez les sujets jeunes et peu entraînés. La première phase de la puberté constitue une période sensible pour l'amélioration de VO_2max : c'est à ce moment que l'organisme est le plus réceptif aux influences de l'entraînement.

Le désentraînement a un effet inverse : l'inactivité prolongée détériore rapidement et sensiblement VO_2max (selon Saltin et coll.1968, 15 jours d'alitement peuvent s'accompagner d'une diminution de 40% de VO_2max).

Les effets de l'entraînement sont obtenus grâce à des modifications des facteurs de $VO_2\text{max}$ que nous avons cités plus haut, notamment les facteurs cardiovasculaires et musculaires :

- Augmentation du débit cardiaque (Q), grâce à une augmentation du volume d'éjection systolique (ves), cela malgré une légère diminution de la fréquence cardiaque maximale (FCmax) ;
- Amélioration de la capillarisation des fibres musculaires ;
- Transformation possible des fibres de type IIb en fibres de type IIa ;
- Augmentation de l'activité des enzymes oxydatives ;
- Augmentation du nombre et du volume des mitochondries.

IV. Prédiction de la performance à partir de $VO_2\text{max}$

Dans la pratique du sport, $VO_2\text{max}$ est en partie corrélé à la performance dans les efforts de moyenne et de longue durée, et on ne peut prétendre à une performance de bon niveau sans avoir une consommation maximale d'oxygène élevée (les valeurs les plus élevées sont observées chez les skieurs de fond, les cyclistes et les marathoniens, alors que les valeurs les plus basses sont observées chez les coureurs de vitesse et les gymnastes). **Dans les courses de demi-fond (de 1500 à 5000m), la consommation maximale d'oxygène est probablement le facteur de la performance qui a le plus d'importance.**

Néanmoins, l'amélioration de la performance en endurance ne s'accompagne pas toujours d'une augmentation de même importance de $VO_2\text{max}$. De plus, certains spécialistes des sports d'endurance disposant de valeurs très élevées de $VO_2\text{max}$ ($> 80 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) ne réalisent pas des performances de haut niveau dans leur discipline (alors que d'autres disposant de $VO_2\text{max}$ plus modestes appartiennent à l'élite nationale ou mondiale). **La consommation maximale d'oxygène n'est donc pas le seul paramètre bioénergétique de la performance dans les efforts de moyenne et de longue durée. L'endurance aérobie**, c'est à dire la capacité à utiliser un pourcentage le plus élevé possible de $VO_2\text{max}$ le plus longtemps possible détermine aussi l'excellence dans ces disciplines (rappelons que $VO_2\text{max}$ ne peut être maintenu plus de 10 mn), et ce surtout lorsque l'effort dépasse 8 minutes (l'endurance aérobie est alors un meilleur indice de la performance que $VO_2\text{max}$).

Enfin, même pour les efforts sollicitant 100% de $VO_2\text{max}$ (entre 4 et 10 minutes), il existe des variations de performance pour une même consommation maximale d'oxygène car le rendement mécanique n'est pas identique entre tous les sportifs (en course à pied, certains ont une foulée plus économique que d'autres et produiront un meilleur chrono pour un même $VO_2\text{max}$; en cyclisme, les variations de performance pour un même $VO_2\text{max}$ sont encore plus grandes car deux éléments nouveaux interviennent en plus de l'économie du coup de pédale: la vitesse de pédalage et les résistances aérodynamiques).

Ainsi, Di Prampero, Atchou, Brückner & Moia (1986) modélisent la performance en course de longue durée à partir du $VO_2 \text{ max}$ ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), de la fraction du $VO_2 \text{ max}$ qui peut être soutenue lors d'une épreuve et du coût énergétique de la course (C_r), c'est-à-dire la quantité d'oxygène consommée par unité de distance parcourue ($\text{mlO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$). Ainsi, la performance peut être améliorée soit en augmentant la fraction du $VO_2 \text{ max}$ soutenu lors de la course, soit en augmentant le $VO_2 \text{ max}$, soit en diminuant le coût énergétique de la course ou par toute combinaison de ces trois paramètres

V. Applications

$$\begin{aligned} 1 \text{ kcal} &= 4,18 \text{ kJ} & 1 \text{ kJ} &= 0,24 \text{ kcal} \\ \text{Puissance en watts} &= \text{travail (joules)} / t \text{ (secondes)} & P &= \text{J/s} \\ 1 \text{ litre d'oxygène} &= 5 \text{ kilocalories} & 1 \text{ l d'O}_2 &= 5 \text{ kcal} = 21 \text{ kJ} \\ & \text{(chaque fois que le sportif consomme 1 litre d'oxygène, il va libérer 5 kilocalories)} \end{aligned}$$

Exercice 1 : Le coureur R.L. (26 ans, 55 kg) enregistre les résultats suivants après un test triangulaire de Vo₂max en laboratoire (méthode directe) :

Vo₂max = 5.1 l/mn ,

PMA = 430 watts.

Quelle est la valeur de sa PMA relative ? niveau de difficulté 0 → 7.4 W/kg.

Quelle est la valeur de son rendement physiologique ? niveau de difficulté + → 24.1 %.

Est-ce un bon rendement ? niveau de difficulté 0

Dispose-t-il d'une bonne VO₂max ? niveau de difficulté 0

Exercice 2 : Le coureur A.V. (20 ans, 69 kg) enregistre les résultats suivants après un test triangulaire de Vo₂max en laboratoire (méthode directe) :

PMA = 406 watts.

Rendement = 23%.

Quelle est sa PMA relative ? niveau de difficulté 0 → 5.9 W/kg.

Quelle est la valeur de sa VO₂max exprimée en valeur relative et en valeur absolue ? niveau de difficulté ++ → 5.04 L/mn et 73 ml/mn/kg.

Dispose-t-il d'une bonne VO₂max ? niveau de difficulté 0

Exercice 3 : Remplir le tableau ci-dessous.

	FC de repos bpm	FC max* bpm	Q L/mn	VO ₂ max L/mn	VO ₂ max ml/mn/kg	PMA W	PMA km/h
Pour un homme de 20 ans 70 kg – Pour une femme de 20 ans 55 kg							
Homme sédentaire	72	194 +/- 10	22	3.2	45	240	12.9
Homme très entraîné	< 50	194 +/- 10	40	6	85	490	24.2
Femme sédentaire	75	194 +/- 10	18	1.9	35	130	10
Femme très entraînée	< 55	194 +/- 10	30	4.1	75	320	21.4
*D'après Formule de Gellisch (2007)							