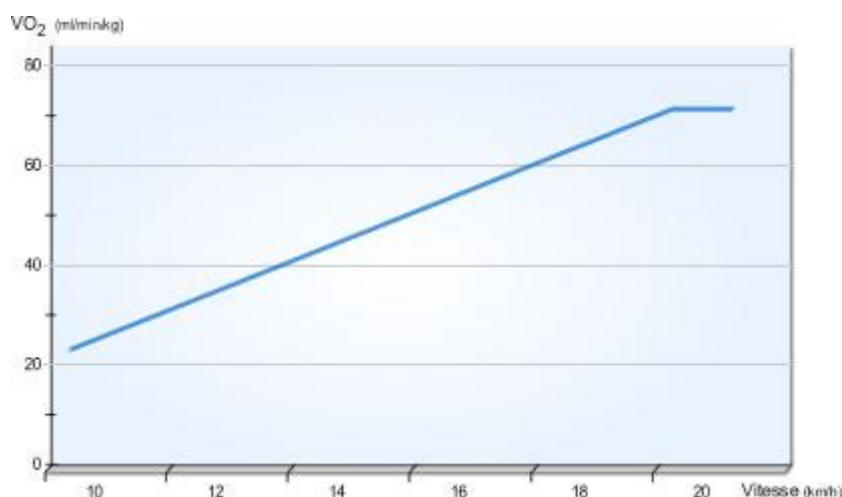


# La consommation maximale d'oxygène

- 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<sup>e</sup> édition, Masson, Paris, 1997.  
*A quoi sert VO<sub>2</sub>max ?* 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** (VO<sub>2</sub>max, exprimée en litre d'O<sub>2</sub>/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  $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

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 VO<sub>2</sub>max sont de 4,9 l.min et de  $76 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Si ce coureur perd 2 kg, son VO<sub>2</sub>max exprimé en valeur absolue sera toujours de 4,9 l.min, mais il atteindra  $77,8 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  en valeur relative (soit + 1,8).

**Consommation maximale d'oxygène (VO<sub>2</sub>max)** = 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  $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$*   
VO<sub>2</sub>max 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 VO<sub>2</sub>max  
→ *expression en Watts*

**Vitesse maximale aérobie (VMA)** = c'est la vitesse maximale que le sujet atteint lorsqu'il est à VO<sub>2</sub>max →  
*expression en km/h.*

## I. Valeurs

Chez l'adulte jeune de sexe masculin,  $VO_2\max$  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,  $VO_2\max$  est d'environ  $45 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour les hommes (ce qui représente environ une PMA de 250 watts mesurée sur bicyclette ergométrique), et  $35 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour les femmes (soit une PMA d'environ 200 watts sur bicyclette ergométrique).

Les valeurs limites relevées chez des athlètes spécialisés dans les sports d'endurance sont de  $95 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour les hommes (soit plus 5,5 l/min pour un sujet de 60 kg), et  $75 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour les femmes (soit près de 4 l/min pour un sujet de 50 kg).

Richard Virenque :  $70 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  ; Erwan Menthéour :  $97 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Remarque : on est encore loin de  $VO_2\max$  de l'antilope =  $300 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

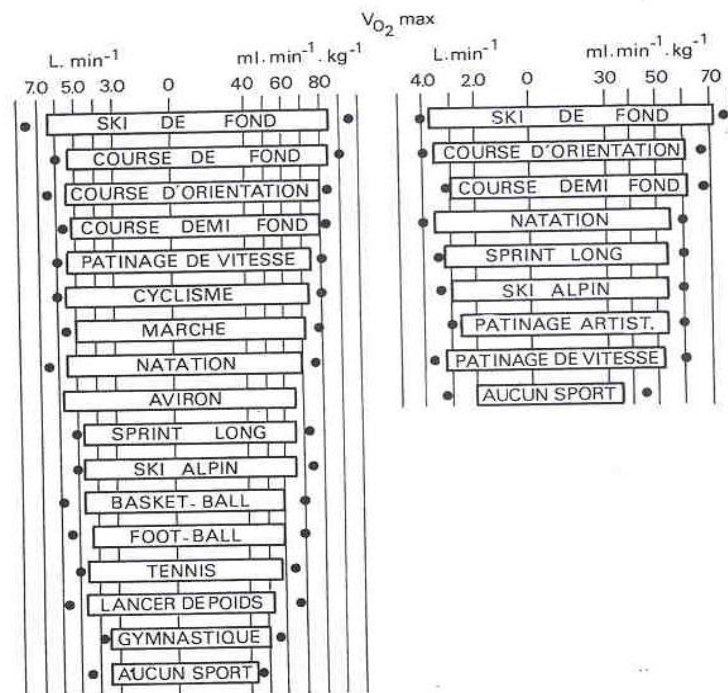


Fig. 9. Consommation maximale d'oxygène dans différents sports. Les valeurs observées chez des athlètes de différentes spécialités (hommes à gauche, femmes à droite) sont d'autant plus élevées que l'exercice habituellement pratiqué est plus intense et plus prolongé. Les points indiquent des valeurs individuelles au-delà de la moyenne (d'après Saltin et Astrand, *J. appl. Physiol.*, 1967, 23, 353-358).

**Consommation maximale d'oxygène dans différents sports** (hommes à gauche, femmes à droite).

Les points indiquent des valeurs individuelles au-delà de la moyenne.

(d'après Saltin et Astrand, *J. appl. Physiol.*, 1967, 23, 353-358).

## 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. 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  $VO_2\text{max}$  (de 120 l/min chez le sédentaire dont  $VO_2\text{max} = 3$  l/min, jusqu'à 200 l/min si  $VO_2\text{max} > 5$  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  $VO_2\text{max}$  (les avis divergent à ce sujet, pour certains elle plafonnerait à une valeur modérée du métabolisme correspondant à moins de 50% de  $VO_2\text{max}$  ; pour d'autres, elle augmenterait proportionnellement au métabolisme jusqu'à  $VO_2\text{max}$ ).

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 ( $VO_2\text{max} > 60 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), il semblerait que la diffusion alvéolo-capillaire limite  $VO_2\text{max}$ .

## 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) :  $Q = \text{VES} \times \text{FC}$ . A l'exercice, on constate un accroissement du débit cardiaque consécutif à une augmentation conjuguée du volume d'éjection systolique (jusqu'à 50% de  $VO_2\text{max}$ ) et de la fréquence cardiaque (jusqu'à une valeur limite déterminée par l'âge et égale approximativement à  $220 - \text{âge}$ ). L'augmentation de  $VO_2\text{max}$  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  $VO_2\text{max}$  proche de 6 l/min).
- 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 ( $Q \times \text{CaO}_2$ ). 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 ( $\text{SaO}_2$ ). Or le contenu artériel en oxygène ( $\text{CaO}_2$ ) 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  $\text{CaO}_2$  : il s'agit de l'auto-transfusion sanguine, de l'usage de l'érythropoïétine (EPO) ou de perfluorocarbène (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  $\dot{V}O_2\text{max}$  soit le débit cardiaque maximal, surtout chez les sujets entraînés. Il existe une relation sensiblement linéaire entre l'augmentation de  $\dot{V}O_2\text{max}$  liée à l'entraînement et celle du débit cardiaque maximal : chez l'homme, toute augmentation de  $\dot{V}O_2\text{max}$  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  $\dot{V}O_2\text{max}$  est de 6 l/min).

### 2.3 Les muscles

Si les muscles reçoivent suffisamment d'oxygène des niveaux périphériques, encore faut-il que cet oxygène puisse être utilisé au niveau local.  $\dot{V}O_2\text{max}$  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 dehydrogénase) et  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Le nombre de mitochondries (densité mitochondriale) et l'activité enzymatique des mitochondries augmentent d'ailleurs comme  $\dot{V}O_2\text{max}$  sous l'effet de l'entraînement.

L'aptitude locale à utiliser l'oxygène va déterminer la **différence artérioveineuse ( $C_{aO_2} - C_{vO_2}$ )**, 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.

**Formule de Fick :**  $\dot{V}O_2\text{max} = Q_{\text{max}} (C_{aO_2} - C_{vO_2})$   
 $= FC_{\text{max}} * \text{ves}_{\text{max}} * (C_{aO_2} - C_{vO_2})$

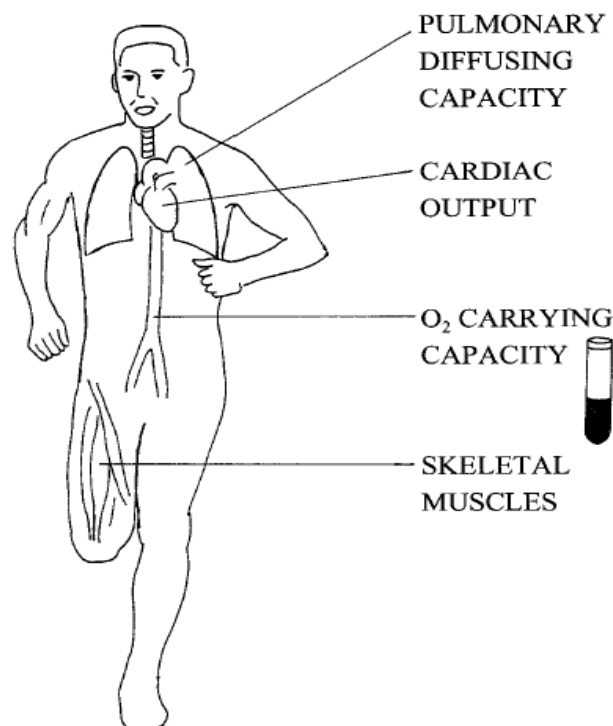


Figure 4—Physiological factors that potentially limit maximum oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2\text{max}}$ ) in the exercising human.

*D'après Bassett et Howley, 2000*

## 2.4 Conclusion sur les facteurs limitant VO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>max entre 35 et 50 ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) 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<sub>2</sub>max. En revanche, les sujets dotés d'une bonne aptitude aérobie (VO<sub>2</sub>max entre 50 et 60 ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>) ont une baisse de VO<sub>2</sub>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.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>, 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.

## III. Facteurs de variabilité de VO<sub>2</sub>max

### 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<sub>2</sub>max 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<sub>2</sub>max 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. 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 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 (ml.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>), 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<sub>2</sub>max jusque vers la vingtième année.

### 3.3 L'hérédité

Les valeurs individuelles de  $VO_2\text{max}$  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% de la valeur de  $VO_2\text{max}$  (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  $VO_2\text{max}$  : 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  $VO_2\text{max}$  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 (allure égale ou proche de la VMA, sous la forme d'efforts fractionnés). 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  $VO_2\text{max}$  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  $VO_2\text{max}$  : 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  $VO_2\text{max}$  (selon Saltin et coll.1968, 15 jours d'alitement peuvent s'accompagner d'une diminution de 40% de  $VO_2\text{max}$ ).

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 12 mn), et ce surtout lorsque l'effort dépasse 8 mn (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 12 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).

## V. Applications

$$1 \text{ kcal} = 4,18 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kJ} = 0,24 \text{ kcal}$$

$$\text{Puissance en watts} = \text{travail (joules)} / t \text{ (secondes)} \qquad P = J/s$$

$$1 \text{ litre d'oxygène} = 5 \text{ kilocalories} \qquad 1 \text{ l d'O}_2 = 5 \text{ kcal} = 21 \text{ kJ}$$

(chaque fois que le sportif consomme 1 litre d'oxygène, il va libérer 5 kilocalories)

Le coureur R.L.(26 ans, 55,7 kg) enregistre les résultats suivants après un test triangulaire de  $Vo_2\text{max}$  en laboratoire (méthode directe) :

$Vo_2\text{max} = 4,51 \text{ l/mn}$  ,

PMA = 406 watts.

Quelle est la valeur de sa PMA relative (en watts/kg) ?

Quelle est la valeur de son rendement physiologique ? Est-ce un bon rendement ?

Dispose-t-il d'une bonne  $VO_2\text{max}$  ?