

LE METABOLISME AEROBIE

Le 24 Octobre 1998

{Licence STAPS 98-99. C1-M2. Cours de François COTTIN}

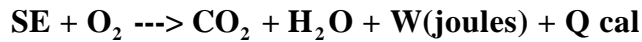
1. LE METABOLISME AEROBIE.....	3
<u>1.1. Méthode directe.....</u>	<u>3</u>
1.1.1. Les équivalents énergétiques.....	3
1.1.2. Quotient respiratoire (QR).....	4
1.1.3. QR à l'exercice.....	4
1.1.3.1. Les facteurs influençant le QR.....	5
<u>1.2. Les dépenses énergétiques.....</u>	<u>6</u>
1.2.1. Au repos.....	6
1.2.2. Exercice modéré.....	6
1.2.3. A VO ₂ max.....	6
<u>1.3. Mesure des performances bio-énergétiques.....</u>	<u>6</u>
<u>1.4. Métabolisme aérobie et mesure de VO₂ max.....</u>	<u>7</u>
1.4.1. Définition.....	7
1.4.2. Méthode simplifiée.....	9
1.4.3. Paramètres ventilatoires.....	9
1.4.3.1. Pneumotachographe de Fleish.....	9
1.4.3.2. Tube de Pitot.....	9
1.4.4. Analyse des gaz expirés.....	10
<u>1.5. Résultats.....</u>	<u>10</u>
1.5.1. Notion de constante de temps.....	10
1.5.2. Relation période (T) / constante de temps (τ).....	10
1.5.3. Protocoles.....	12

1.5.3.1. Classique.....	12
1.5.3.2. Rampes.....	12
1.5.3.3. Tapis roulant.....	12
1.5.4. Exemple chez sujet actif et/ou entraîné.....	12
1.5.4.1. Repos.....	12
1.5.4.2. Exercice max.....	12
<u>1.6. Bases physiologiques de la capacité aérobie.....</u>	<u>12</u>
1.6.1. Trajet interne de l'O ₂	12
1.6.2. Chaîne de transport de l'oxygène : étapes limitatives.....	13
1.6.3. Conséquence de la limitation aérobie.....	14
<u>1.7. Notion de réserve.....</u>	<u>14</u>
1.7.1. Notion de réserve.....	14
<u>1.8. Evolution des paramètres cardiovasculaires</u>	<u>14</u>
1.8.1. Rôle du tonus vagal (nerf vague ou X).....	15

1. LE METABOLISME AEROBIE

Lors des métabolismes anaérobies, on peut mesurer indirectement la quantité d'énergie dépensée par mesure de la PMA ou VMA. Avec le métabolisme aérobie la mesure est directe.

1.1. Méthode directe



SE = substrat énergétique

On sait que si l'on mesure la quantité d'O₂ dépensée on connaîtra la quantité de substrats utilisée par équivalence énergétique. Dans cette voie métabolique on "brûle" les SE uniquement grâce à l'oxygène.

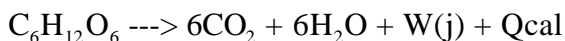
Débit = quantité d'Energie par unité de temps ;

$$\square \text{ Débit} = SE + VO_2 \rightarrow VCO_2 + P \text{ (watt)}$$

P = travail par unité de temps.

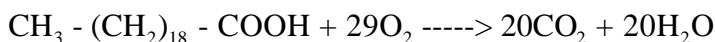
Combustion du glucose :

Le glucose est stocké sous forme de glycogène



Combustion des lipides :

Utilisés sous forme d'acide gras



1.1.1. Les équivalents énergétiques

Substrats	Energie en Kcal/g	Equivalent énergétique (Kcal/l)
Glucides	4,02	5
Lipides	9	4,75
Protides	5,2	4,5
Alcool	7	4,86

Si on brûle directement un gramme de glucose, on obtient 4,02 kcal et 9 kcal pour les lipides.

Par contre, il faut donc deux fois plus d'oxygène (litre d'O₂) pour brûler un gramme de lipides.

1.1.2. Quotient respiratoire (QR)

$$QR = VCO_2 / VO_2$$

Glucides comme SE = $6O_2 / 6CO_2 = 1$

Lipides comme SE = $20 O_2 / 29CO_2 = 0,7$

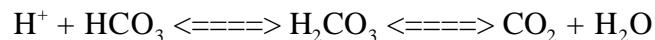
Pour une alimentation équilibrée et au repos le QR = 0,8.

1.1.3. QR à l'exercice

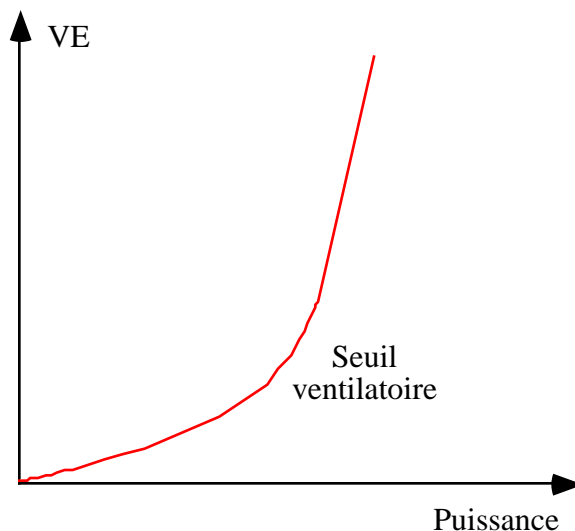
Le QR augmente à l'exercice et devient > 1 quand on dépasse le seuil ventilatoire \implies inflexion de la courbe des débits.

Mécanisme :

Lors d'un effort intense, il y a sollicitation du métabolisme anaérobie avec production d'acide lactique. Ce dernier se dissocie en lactates et ions H^+ par la loi d'action de masse. Les ions H^+ sont alors tamponnés par les ions bicarbonates (HCO_3) sous l'action de l'enzyme (présente dans les érythrocytes) anhydrase carbonique selon la réaction :

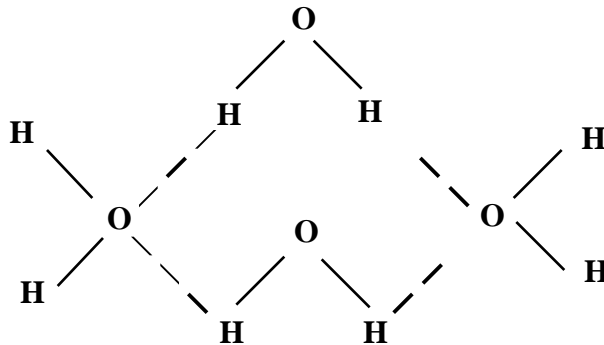


La production supplémentaire de CO_2 aura pour effet une augmentation du débit ventilatoire par voie réflexe des chémorécepteurs bulbaires qui sont très sensibles à l'élévation de PCO_2 .



Le passage du seuil ventilatoire (inflexion de la courbe) se traduit par un essoufflement plus marqué et par une augmentation de la sudation.

Les phénomènes chimiques de la sudation sont dus à la rupture des liaisons de Vanderwalle qui lient les molécules d'eau entre elles.



———— Liaison forte
- - - - Liaison faible

Une molécule d'eau est composée de liaisons faibles et de liaisons fortes. Lorsqu'il y a élévation de la température corporelle (exercice) les liaisons faibles cèdent. C'est la thermolyse.

1.1.3.1. Les facteurs influençant le QR

Il arrive parfois que R soit affecté par des facteurs indépendants de la nature des substrats oxydés. Les facteurs suivants méritent d'être considérés lorsqu'il s'agit d'interpréter R :

1. L'hyperventilation, qui peut être volontaire ou due au stress psychologique, entraîne une élimination de gaz carbonique. Dans ces circonstances, R excède 1.
2. Au cours des premières minutes d'un exercice sous-maximal il existe aussi une hyperventilation. Par conséquent, le sujet expire plus de gaz carbonique qu'il ne consomme d'oxygène. R se rapproche alors de l'unité ou l'excède. Après environ 3 minutes d'exercice, le VCO_2 associé à l'exercice est tel que R prend une valeur qui reflète mieux la nature des substrats métabolisés.
3. Au cours de l'exercice intense de courte durée, R excède 1 car le tamponnage (neutralisation) de l'acide lactique s'accompagne de la libération d'une grande quantité de gaz carbonique. Dans ces conditions, R est généralement considéré comme égal à 1. En effet, la majeure partie de l'énergie au cours de l'exercice supramaximal est dérivée des glucides. Chaque litre d'oxygène fournit donc 5,05 kcal.
4. Au cours de la récupération qui suit l'exercice maximal, le CO_2 est retenu par l'organisme et ceci entraîne une diminution de R.

1.2. Les dépenses énergétiques

Elles se mesurent par équivalence énergétique, c'est à dire par la mesure de la consommation d'oxygène.

1.2.1. Au repos

Pour mesurer le métabolisme de base nécessaire au maintien de l'homéostasie on utilise le MET ou Métabolicequivalent.

Au repos complet, digestion effectuée, il faut pour maintenir le métabolisme de base 1400 Kcal par jour.

$1400 \text{ kcal / jour} = 70 \text{ joules / sec} = 70 \text{ watts}$.

On consomme donc à chaque seconde 70 joules.

□ $1400 \text{ kcal / jour} = 1 \text{ kcal / minute}$

□ $1400 \text{ kcal / jour} = 1 \text{ MET}$

Or l'équivalent énergétique de l'O₂ est d'environ de 4 kcal/l, soit :

□ $\text{VO}_2 \text{ repos} = 250 \text{ ml/mn} \rightarrow 1 \text{ MET}$

1.2.2. Exercice modéré

Pour une course de 10 km/h soit 50% de VO₂ max ou 200 watts.

Pour une consommation chimique de 800 w, le rendement musculaire est de 25% environ.

Soit pour 800 w \rightarrow 600 w en chaleur et 200 w en énergie mécanique.

Soit : $1 \text{ MET} = 70 \text{ w}$

Donc : $800/70 = 11,42 \text{ MET}$.

Pour un métabolisme de base à 70 w, l'effort équivalent est de 11 MET.

Le rendement est égal au rapport : énergie utile / énergie totale.

1.2.3. A VO₂ max

	VO2 max	Puissance
Sédentaire	3 l/mn	12 Met
Sportif	4 l/mn	16 Met
High fit	5 l/mn	20 Met

1.3. Mesure des performances bio-énergétiques

$\text{Glycosyl} + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{Q cal} + \text{W joules}$

ou en se rapportant au temps :

$\text{SE} + \text{VO}_2 \rightarrow \text{VCO}_2 \text{ P watts (dw/dt)}$

Equivalence entre :

Quantité de substrats énergétiques consommé.

Consommation d'O₂ (VO₂) +++

Puissance mécanique développé +++

Production de dioxyde de carbone (VCO₂)

Pour un substrat de type glucidique :

1 watt mécanique ---> 12,5 ml d'O₂ / min consommé

Mais il existe des variations inter-individuelles (technique)

Ex : 400 watts de PMA

VO₂ max brut = ± 5000 ml/min

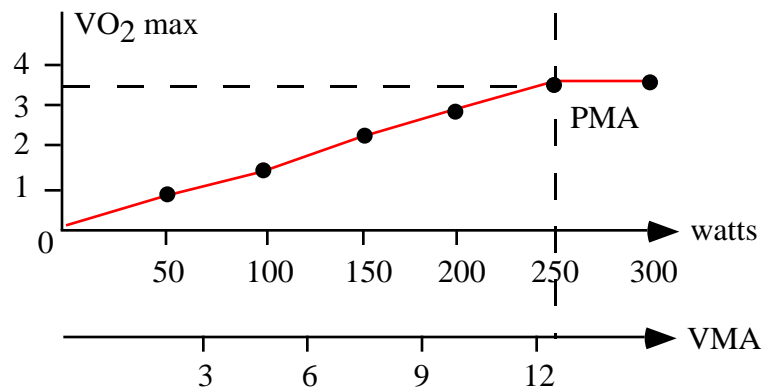
Soit : 70ml/min/kg de VO₂ max spécifique pour un poids de 72 kg.

1.4. Métabolisme aérobie et mesure de VO₂ max

1.4.1. Définition

En France : Consommation Maximale d'Oxygène.

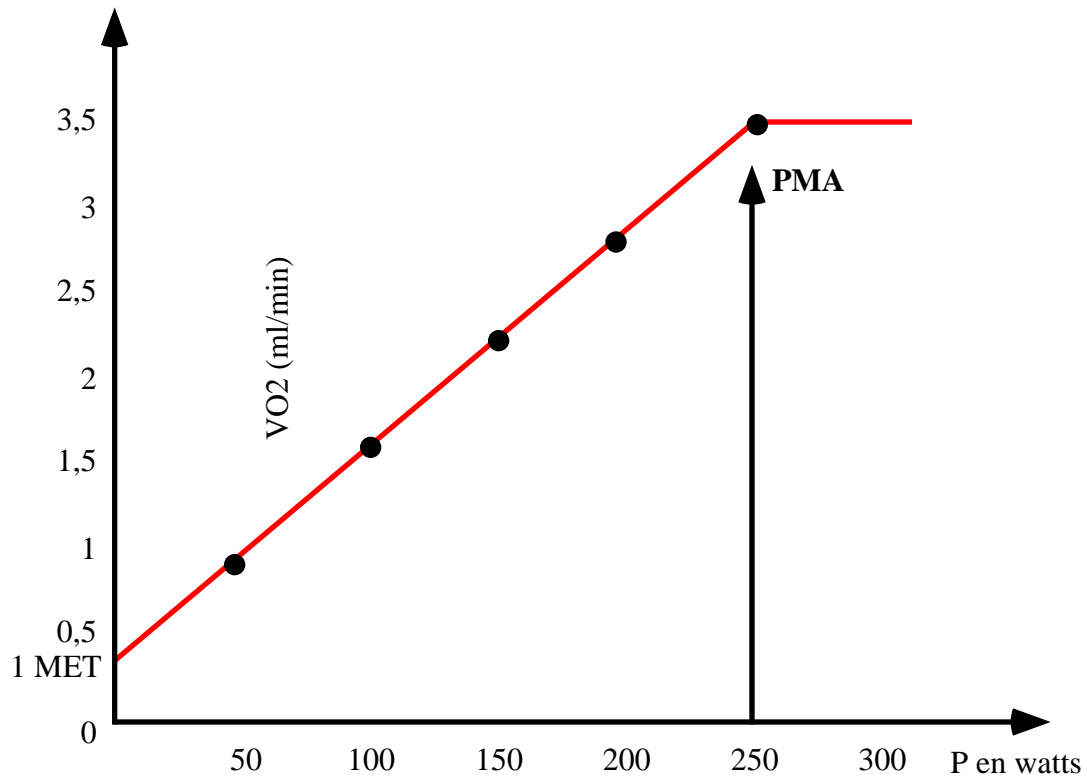
En GB : Captation Maximale (uptake)



Protocole :

On fait pédaler ou courir un sujet avec un tube qui recueille les gazs expirés.

Sur le graphique suivant, les échanges d'O₂ plafonnent à 250 watts. Le début du plateau de VO₂ correspond à PMA. Cela indique que le système aérobie est saturé.



Sur tapis 3 km/h = 60 w sur cycloergomètre.

Principe :

Le VO₂ consommé est égal au VO₂ inspiré moins le VO₂ expiré

□ Soit : $VO_2 = VO_{2I} - VO_{2E}$ (équation 1)

On part du principe que la qualité d'air inspiré = qualité d'air expiré

Air inspiré : (F = fraction)

□ $FIO_2 = 0,21\%$ d'oxygène

□ $FICO_2 = 0,0003\%$ de dioxyde de carbone

□ $FIN_2 = 0,78\%$ d'azote

Et à peu de chose près : $FIO_2 + FICO_2 + FIN_2 = 1$

□ donc : $VO_{2E} = VE \times FEO_2$

Air expiré : on ne connaît pas ses valeurs, mais :

$FEO_2 + FECO_2 + FEN_2 = 1$ (équation 2)

(1) devient : $VO_2 = VI \times FIO_2 - VE \times FEO_2$ (équation 3)

On veut se débarrasser de VI, comme il n'y a pas de transporteur d'azote dans le sang, on peut écrire que :

$$VI \times FIN_2 = VE \times FEN_2$$

$$D'où VI = VE \times FEN_2 / FIN_2$$

Or (2) ==> $FEN_2 = 1 - FEO_2 - FECO_2$ --> valeur que l'on remplace dans l'équation suivante :

$$VI = VE \times (1 - FEO_2 - FECO_2) / FIN_2$$

On remplace cette valeur de VI dans l'équation 3 pour obtenir l'équation finale :

$$VO_2 = VE \times \{ [1 - (FEO_2 - FECO_2) \times (FIO_2 / FIN_2)] - FEO_2 \}$$

1.4.2. Méthode simplifiée

Dans le cas d'une épreuve maximale : [VI # VE (lorsque QR = 1)]

(3) devient alors :

$$VO_2 = VE \times FIO_2 - VE \times FEO_2$$

$$\text{Soit : } VO_2 = VE \times (0,21 - FEO_2)$$

1.4.3. Paramètres ventilatoires

Mesure des débits instantanés de gaz expirés, puis intégration pour déterminer les volumes

Rappelons que VE est égal au volume d'air expiré par unité de temps.

1.4.3.1. Pneumotachographe de Fleish

$$P (P \text{ amont} - P \text{ aval}) \# R_p \times dV/dt$$

Ce manchon n'est plus utilisé de nos jours. Trop lourd donc fatiguant pour la mâchoire du sujet puis il y a une différence de pression entre l'entrée et la sortie d'air ce qui crée un régime de turbulences.

1.4.3.2. Tube de Pitot

Principe physique plus élaboré (2 tubes croisés).

Avantages et inconvénients :

1. Simplicité mécanique (bout de plastique)
2. Hygiène quasi parfaite (changement à chaque mesure)
3. Légèreté en bouche ou au masque
4. Insensible aux turbulences
5. Nécessite un traitement élaboré du signal (carte AD + logiciel)

1.4.3.3. Turbine : appareils portables surtout (K2, K4, etc.)

1.4.3.4. Anémomètre à fil chauffé

1.4.4. Analyse des gaz expirés

1.4.4.1. Analyseur d'oxygène

Cellule au zirconium

1.4.4.2. Analyseur de dioxyde de carbone

Méthode par infrarouges

1.5. Résultats

1.5.1. Notion de constante de temps

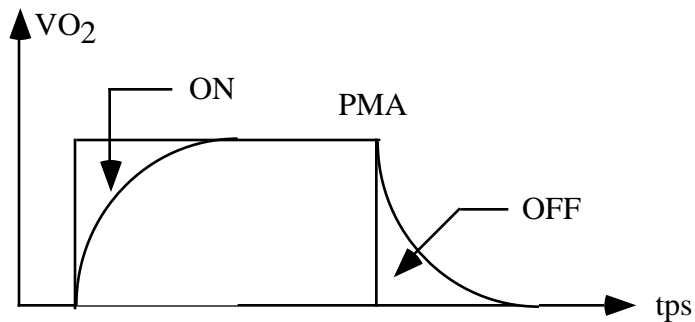
Croissance exponentielle amortie

$$u = u_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Décroissance exponentielle amortie

$$u = u_0 \times e^{-t/\tau}$$

τ = constitue la constante de temps ("ON" ou "OFF") du phénomène.



1.5.2. Relation période (T) / constante de temps (τ).

$$T = \ln 2 \times \tau = 0,693 \tau$$

Exemple : $\tau = 1 \text{ min} \Rightarrow T \sim 40 \text{ secondes}$

40 sec. =>	50% de la réponse
1 min 20 sec =>	75% de la réponse
2 min =>	87,5% de la réponse

2 min 40 sec =>	93,75 % de la réponse
-----------------	-----------------------

1.5.3. Protocoles

1.5.3.1. Classique

Epreuve "triangulaire" (paliers) : Cf. Annexe.

1.5.3.2. Rampes

Implique une commande de l'ergocycle asservie à l'appareillage de mesure

1.5.3.3. Tapis roulant

Réservé aux sujets sportifs ou à l'autonomie motrice parfaite

1.5.4. Exemple chez sujet actif et/ou entraîné

1.5.4.1. Repos

Au repos : $VE \sim 5 \text{ l/min}$, $FEO_2 \sim 0.16$ (16 %)

$VO_2 \sim 5 \times (0.21 - 0.16) = 250 \text{ ml / min}$ (1 "MET")

1.5.4.2. Exercice max

A l'exercice maximum : $VE \sim 125 \text{ l/min}$, $FEO_2 \sim 0.17$

$VO_2 \sim 125 \times (0.21 - 0.17) = 5000 \text{ ml / min}$ (20 MET)

Chez un sujet normal, $VE \text{ max}$ peut être $> 200 \text{ l / min}$

1.6. Bases physiologiques de la capacité aérobie

1.6.1. Trajet interne de l'O₂

Oxygène transporté par le sang

$$VO_2 = VaO_2 - VvO_2$$

$$VO_2 = Oc \cdot CaO_2$$

$$VaO_2 = Qc \cdot CaO_2$$

$$VaO_2 - VvO_2 = Qc \cdot CaO_2 - Qc \cdot CvO_2$$

$$VO_2 = Qc \times (CaO_2 - CvO_2) = Qc \times DAV-O_2$$

$$[\text{dimensions : ml} \cdot \text{min}^{-1} = \text{lsang} \cdot \text{min}^{-1} \times \text{ml O}_2 \cdot \text{lsang}^{-1}]$$

$$VO_2 \text{ max} = Qc \text{ max} \times DAV - O_2 \text{ max}$$

Sans oublier que :

$$Qc \text{ max} = VS \text{ max} \times Fc \text{ max}$$

1.6.2. Chaîne de transport de l'oxygène : étapes limitatives

AIR AMBIANT

R1

Convection ++

(Ap, ventilatoire)

ALVEOLE PULMONAIRE

R2

Diffusion

[$\xi(s, v)$] --> coefficient de perméabilité de la membrane

CAPILLAIRE PULMONAIRE

R3

Convection +++

(Ap, cardiovasculaire)

CAPILLAIRE SYSTEMIQUE

R4

Diffusion

CELLULE MUSCULAIRE

R5

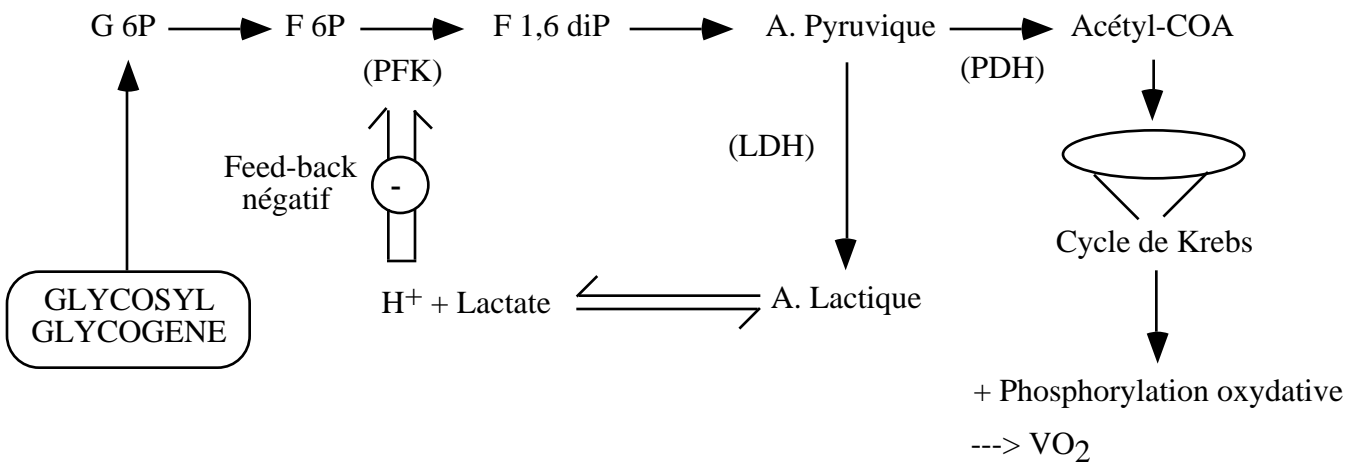
Diffusion

MITOCHONDRIE

$$R_{\text{TOTALE}} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5$$

Mais, on peut poser que : $R3 \gg R1, R2, R4 \text{ ou } R5$

1.6.3. Conséquence de la limitation aérobie



1.7. Notion de réserve

1.7.1. Notion de réserve

$$\text{VO}_2 = \text{VS} \times \text{Fc} \times \text{DAV-O}_2 \quad (1)$$

- Réserve inotrope : VS ($\sim + 50\%$ au max.) \rightarrow réserve de force de contracton du cœur.
- Réserve chronotrope : FC (de 300 à 500%) \rightarrow par rapport au temps.
- Réserve oxyphorique : DAV-O_2 (300 % environ) \rightarrow capacité musculaire à extraire de l' O_2 .

1.8. Evolution des paramètres cardiovasculaires

		VS (ml)	FC (bpm)	Qc ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$)	DAV- O_2 ($\text{mlO}_2 \cdot \text{l}^{-1} \text{ sang}$)	VO ₂ en ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$)	MET
Sédentaire	Repos	70	80	5600	50	280	1
	VO ₂ max	90	200	18000	155	2800	10
	Ratio	<i>x 1.3</i>	<i>x 2.5</i>	<i>(x 3.8)</i>	<i>x 3.1</i>	<i>x 10</i>	<i>x 10</i>
Sportif HF	Repos	140	40	5600	50	280	1
	VO ₂ max	190	185	35000	160	5600	20
	Ratio	<i>x 1.4</i>	<i>x 4.6</i>	<i>(x 6.4)</i>	<i>x 3.2</i>	<i>x 20</i>	<i>x 20</i>

1.8.1. Rôle du tonus vagal (nerf vague ou X)

	VO ₂ REST (ml,min ⁻¹)	VS (ml)	Qc (ml,min ⁻¹)	FcREST	Tonus vagal
Sédentaire	250-300	70	5600	80	+
Sujet "actif"	250-300	100	5600	56	++
Sportif "HF"	250-300	140	5600	40	+++