

Évaluation du métabolisme aérobie



Raphaël LECA

www.culturestaps.com

Licence 2^e année Entraînement UFRSTAPS Dijon / Le Creusot

UE 42 - Etude appliquée de la motricité

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.1 Rappels théoriques : définition

La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$) est la quantité maximale d'oxygène qu'un individu peut consommer par unité de temps dans des conditions d'exercice qui sollicitent totalement son système cardiovasculaire.

Elle dépend des possibilités de **prélèvement** (au niveau pulmonaire), de **transport** (au niveau cardiovasculaire), et d'**utilisation** (au niveau musculaire) de l'oxygène nécessaire aux oxydations.

En valeur absolue, elle s'exprime en ***l/min***, et en valeur relative, elle s'exprime en ***ml/min/kg*** (*rapportée au poids corporel*).

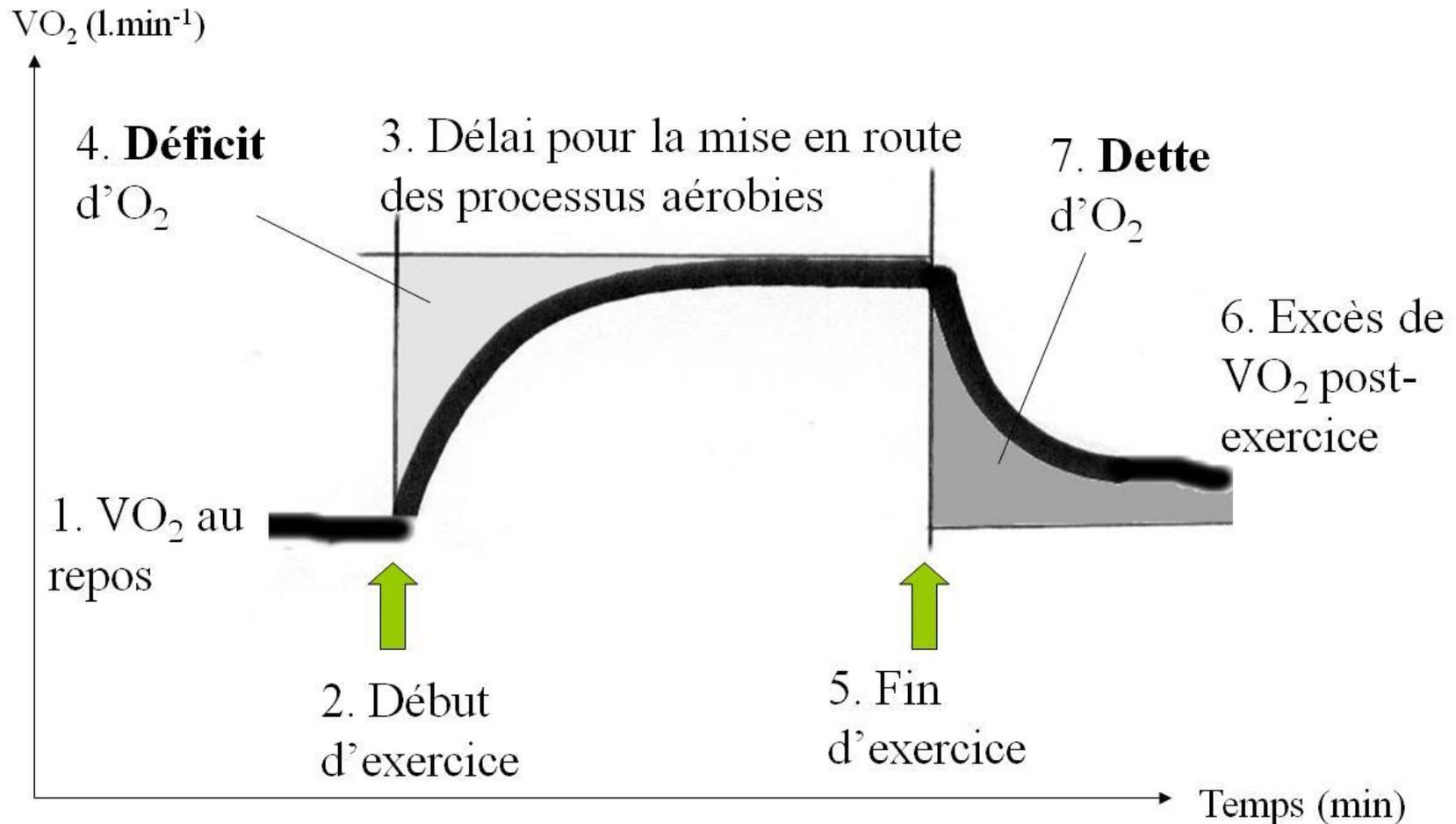


Figure 1. VO_2 augmente très rapidement dès le début de l'exercice (composante rapide) puis plus lentement (composante lente) jusqu'à atteindre un état d'équilibre (Di Prampero et al, 1970). A VO_{2max} cet état d'équilibre peut être maintenu 3-4 min. chez le sujet sédentaire, et jusqu'à 10 min. chez certains sujets très entraînés.

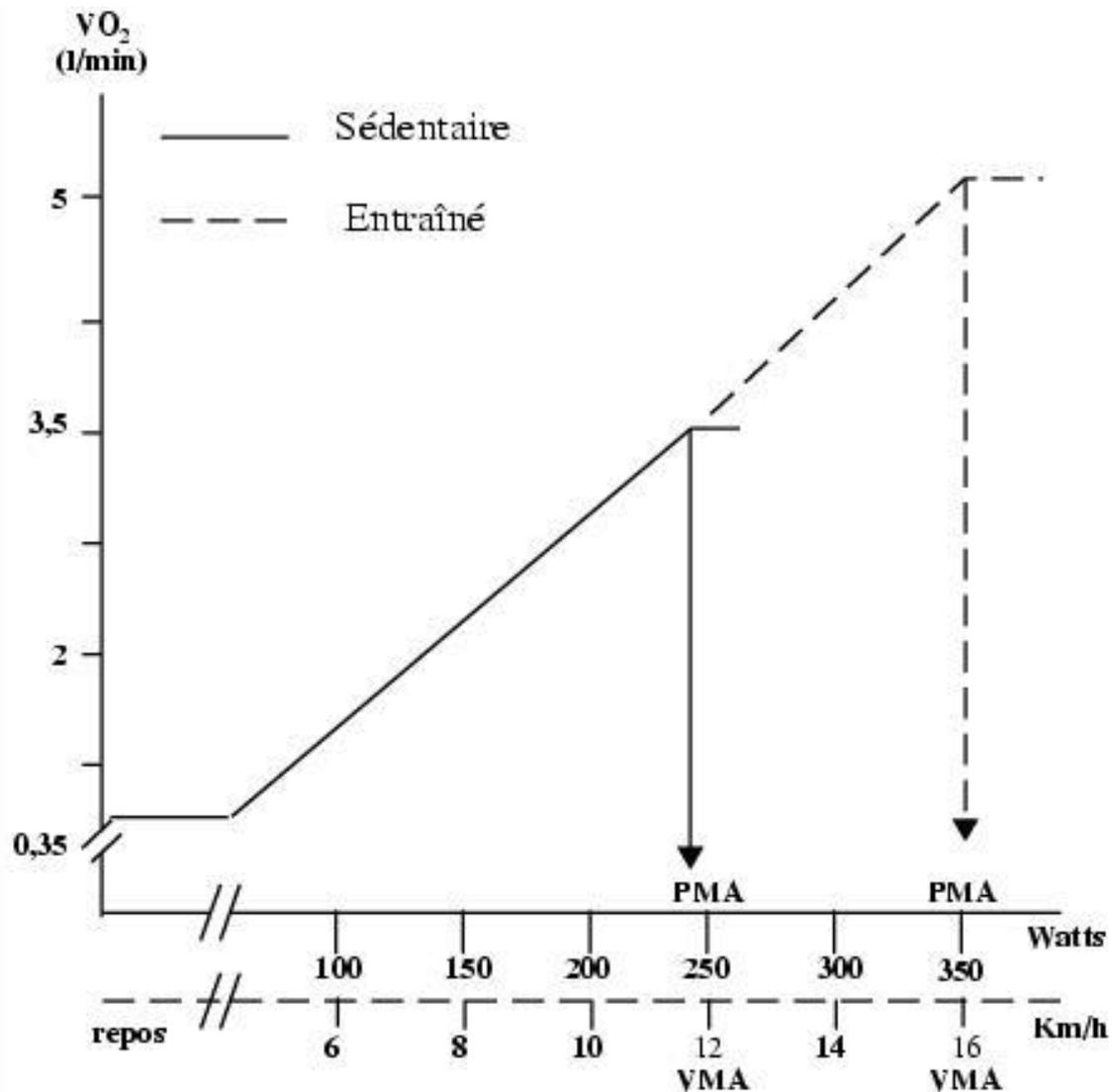


Figure 2. Schéma de l'évolution de la consommation d'oxygène (VO_2) en fonction de l'intensité d'exercice (Watts ou Km/h) chez deux adultes de 20 ans, l'un sédentaire et l'autre entraîné. La consommation maximale d'oxygène correspond au plateau de VO_2 .

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.1 Rappels théoriques : explication physiologique

VO_2 = consommation d'oxygène
 Q = débit cardiaque
 ves = volume d'éjection systolique
 FC : fréquence cardiaque
 CaO_2 = contenu artériel en oxygène
 CvO_2 = contenu veineux en oxygène
 $\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2$ = différence artério-veineuse en oxygène

Equation de Fick :

$$\text{VO}_2 = Q \times (\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2)$$

$$\text{VO}_2 = (\text{ves} \times \text{FC}) \times (\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2)$$

donc

$$\text{VO}_2 \text{ max} = Q_{\text{max}} \times (\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2)_{\text{max}}$$

$$\text{VO}_2 \text{ max} = \underbrace{Q_{\text{max}} \times \text{CaO}_2}_{\text{Apport d'O}_2} - \underbrace{Q_{\text{max}} \times \text{CvO}_2}_{\text{Utilisation d'O}_2}$$

Apport d'O₂

Utilisation d'O₂

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.1 Rappels théoriques : $\text{VO}_2 \text{ max}$, PMA et VMA

À $\text{VO}_2 \text{ max}$ correspond :

- une puissance de travail exprimée en Watts
→ **la Puissance Maximale Aérobie (PMA)**
= *puissance maximale que le sujet développe à $\text{VO}_2 \text{ max}$;*
- une vitesse de déplacement exprimée en km/h
→ **la Vitesse Maximale Aérobie (VMA)**
= *vitesse minimale du sujet sollicitant $\text{VO}_2 \text{ max}$.*

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.1 Rappels théoriques : valeurs

Les valeurs moyennes sont de :

- **chez l'homme** : 3 l/min soit environ 45-50 ml/min/kg ($p = 65 \text{ kg}$).
- **chez la femme** : 2-2.5 l/min soit environ 35-40 ml/min/kg ($p = 50 \text{ kg}$).

Les valeurs maximales (chez l'athlète spécialisé dans les disciplines d'endurance) sont de :

- **chez l'homme** : 5,5-6 l/min soit environ 90 ml/min/kg ($p = 65 \text{ kg}$).
- **chez la femme** : 4 l/min soit environ 75 ml/min/kg ($p = 50 \text{ kg}$).

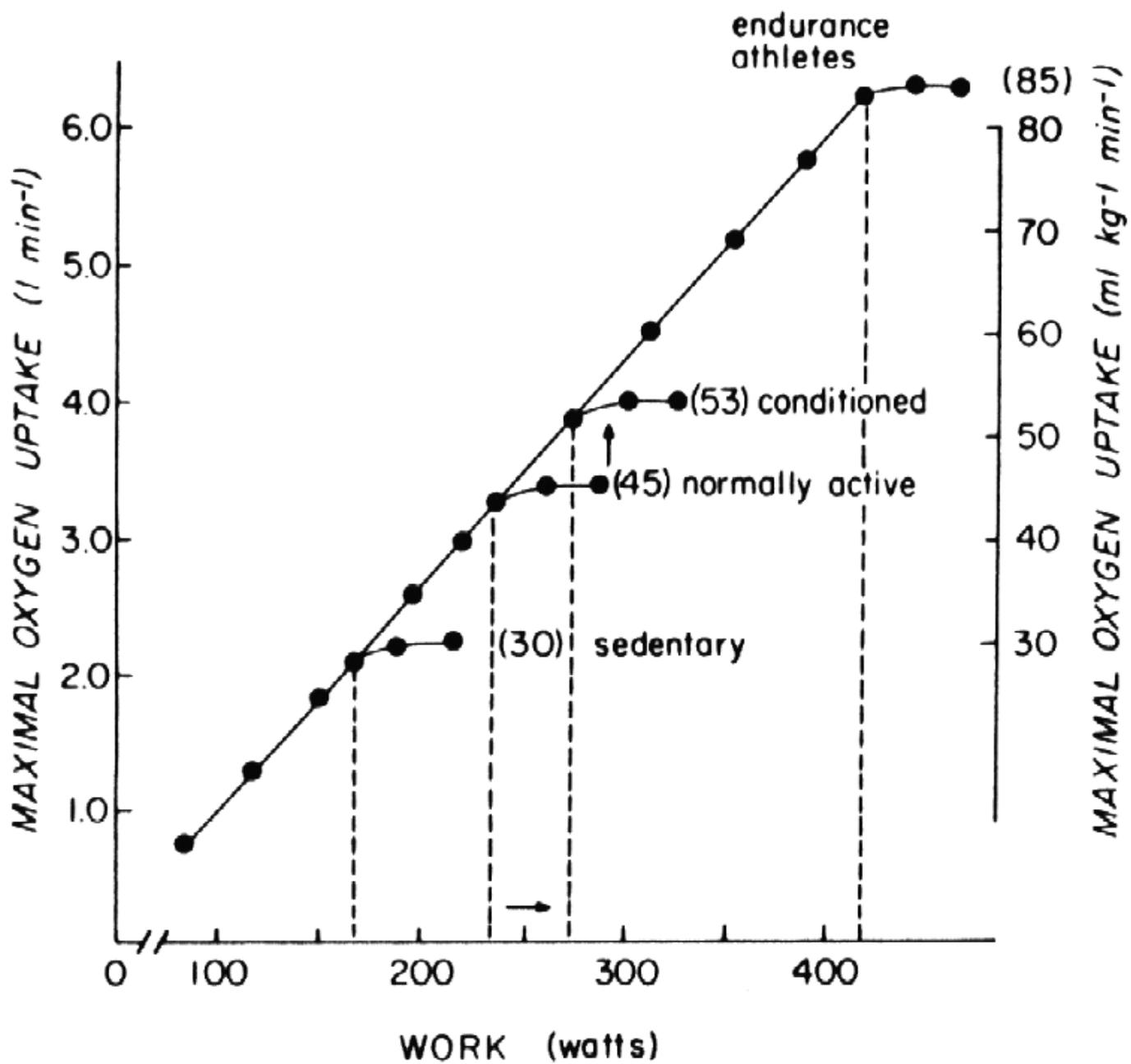


Figure 3. Valeurs de VO_2max .

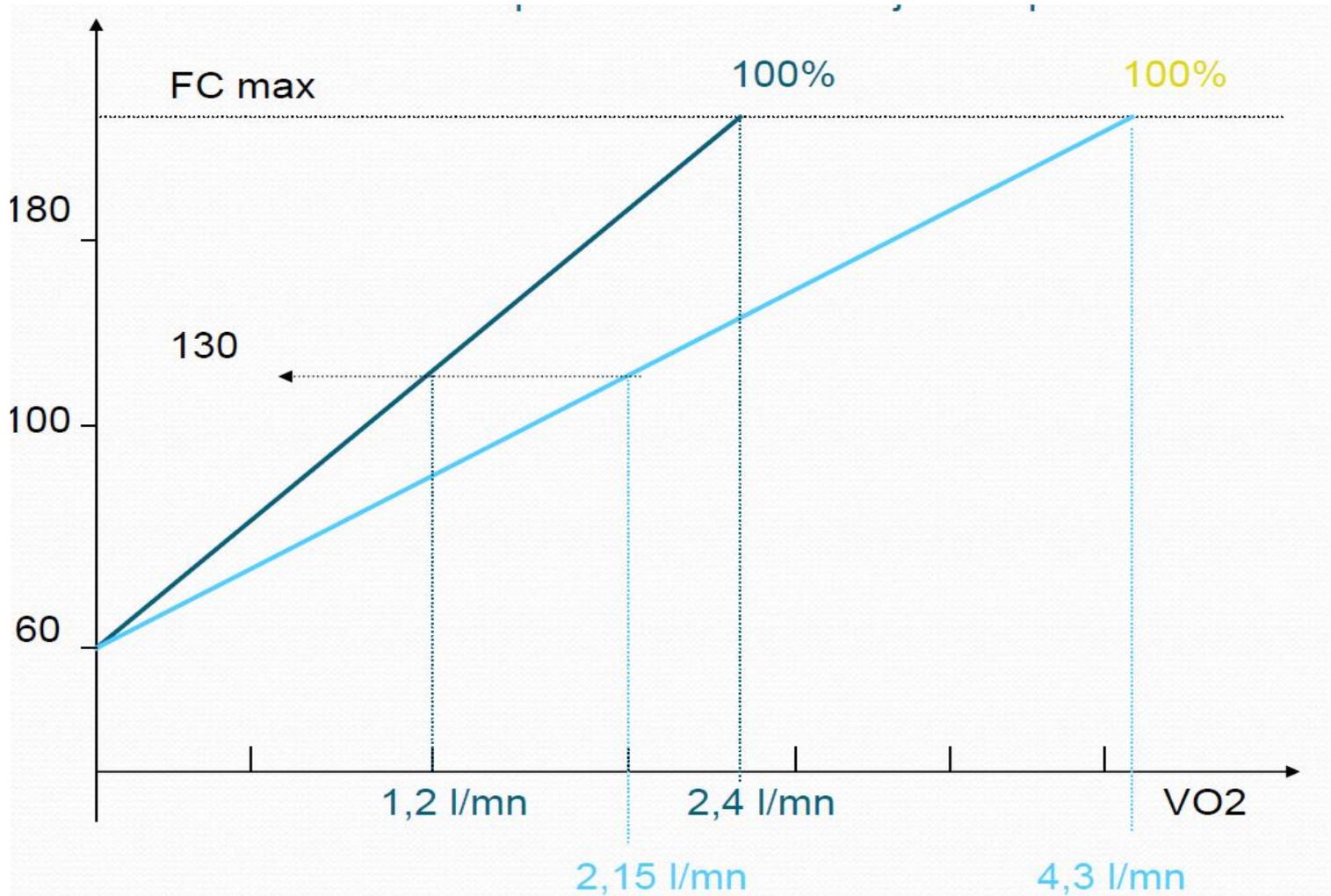


Figure 4. Fréquence cardiaque en fonction de la puissance selon 2 sujets possédant une consommation maximale d'oxygène différente.

▶ VO₂ max. des équipes nationales hommes (1979 à 1996).

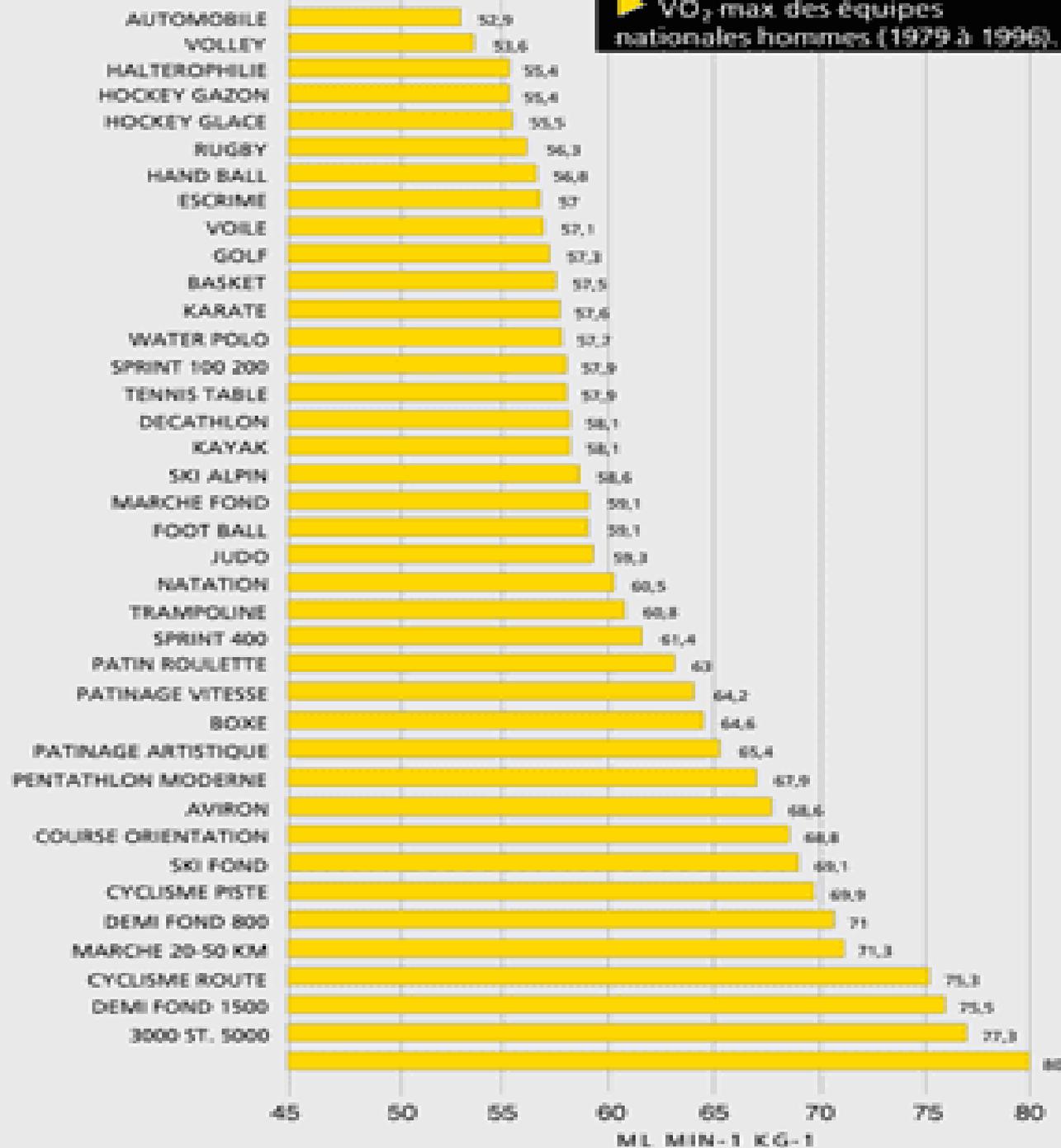


Figure 4.
VO₂ max. dans
différents
sports
(hommes).

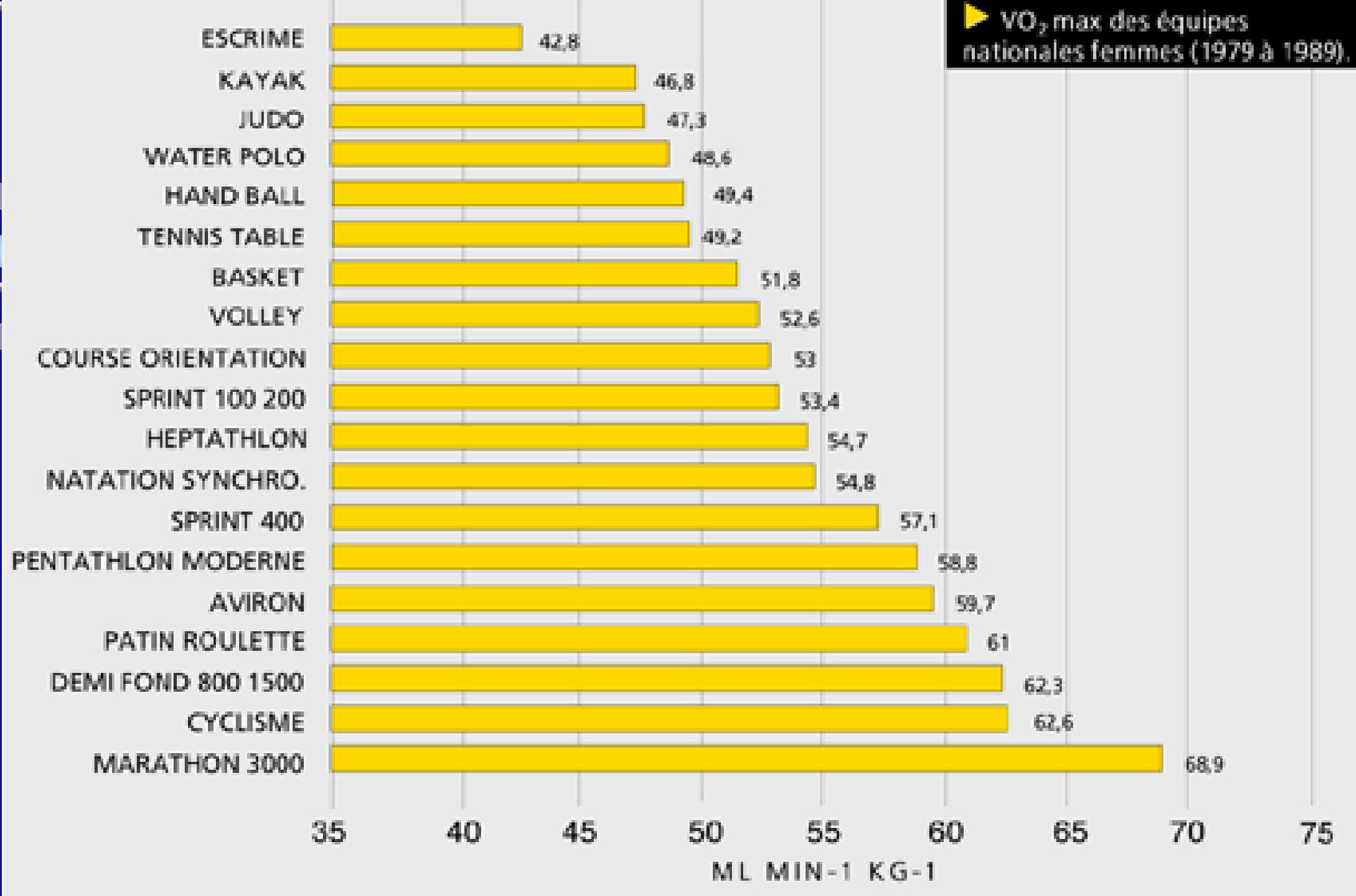


Figure 5. VO₂ max. dans différents sports (femmes).

Zoom sur les valeurs limites de VO₂max

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	M	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	M	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

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.1 Rappels théoriques : $\text{VO}_2 \text{ max}$ et performance

$\text{VO}_2 \text{ max}$ est en partie corrélé à la performance dans les efforts de moyenne et de longue durée (courses de demi-fond surtout).

Mais ce n'est pas le seul paramètre de la réussite dans les efforts d'endurance : importance aussi de **l'endurance aérobie** et du **coût énergétique** du mode de déplacement (= économie de la foulée, ou efficacité du coup de pédale...) → un même $\text{VO}_2 \text{ max}$ peut donner des VMA différentes selon le rendement mécanique.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.1 Rappels théoriques : $\text{VO}_2 \text{ max}$ et entraînement

L'entraînement peut provoquer une augmentation de $\text{VO}_2 \text{ max}$ allant de 0 à +40% (fortes variations interindividuelles), avec une moyenne de **+15-20%**.

L'hérédité, l'âge et le niveau initial d'entraînement conditionnent la sensibilité de $\text{VO}_2 \text{ max}$ aux charges d'entraînement.

Pour cela, l'idéal est d'adopter des charges d'entraînement régulières (X fois par semaine) et intensives (intensité égale à PMA ou VMA, sous la forme d'efforts fractionnés).

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.1 Rappels théoriques : $\text{VO}_2 \text{ max}$ et 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.

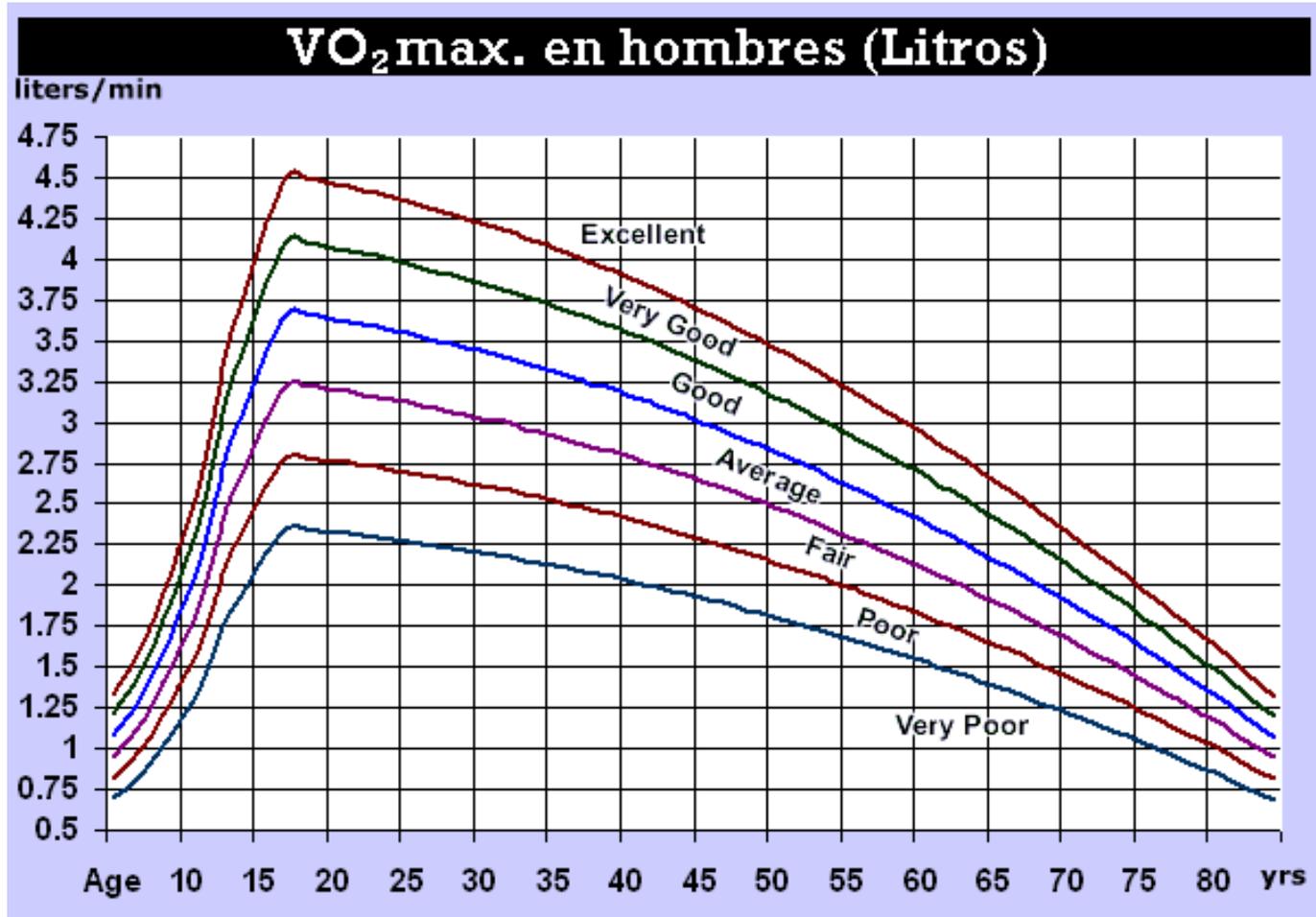
Exprimée en valeur relative ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), la consommation maximale d'oxygène la plus élevée est observée vers la dixième année. Elle diminue constamment par la suite chez les sujets sédentaires.

La première phase de la puberté constitue une période sensible pour l'amélioration de $\text{VO}_2 \text{ max}$: c'est à ce moment que l'organisme est le plus réceptif aux influences de l'entraînement.

A niveau d'entraînement égal, $\text{VO}_2 \text{ max}$ diminue de -0,5 à -1 ml/min/kg par année.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.1 Rappels théoriques : $\text{VO}_2 \text{ max}$ et âge



I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes de détermination de $\text{VO}_2 \text{ max}$

On distingue :

- **Les méthodes directes** : **mesure** de la consommation d'oxygène à partir d'un analyseur d'échanges gazeux.
- **Les méthodes indirectes** : **estimation** de la consommation d'oxygène à partir de la mesure d'un autre paramètre.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes de détermination de $\text{VO}_2 \text{ max}$

On distingue :

- **Les protocoles rectangulaires** : le sujet réalise un effort à une **charge constante**.
→ par exemple courir le plus vite possible pendant 6 minutes.
- **Les protocoles triangulaires** : le sujet réalise un **effort incrémenté** : la charge augmente par paliers successifs.
→ par exemple augmenter sa vitesse de course toutes les min. jusqu'à épuisement.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes de détermination de $\text{VO}_2 \text{ max}$

Caractéristiques d'un protocole triangulaire :

- Type d'ergomètre (cycloergomètre, tapis roulant, ergorameur, etc.).
- Palier de départ.
- Durée des paliers.
- Incrémentation.
- Présence de pauses (actives ou passives).
- Récupération.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes directes de détermination

Les méthodes directes consistent à **mesurer**, en laboratoire (ergomètre) ou sur le terrain, les échanges gazeux respiratoires.

L'équation de base de ces méthodes directes est la suivante :

$$\text{VO}_2 = V_E \times (\text{FI O}_2 - \text{FE O}_2)$$

consommation d'oxygène	=	ventilation par minute	X	fraction inspiratoire en oxygène	-	fraction expiratoire en oxygène
---------------------------	---	---------------------------	---	--	---	---------------------------------------

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes directes de détermination



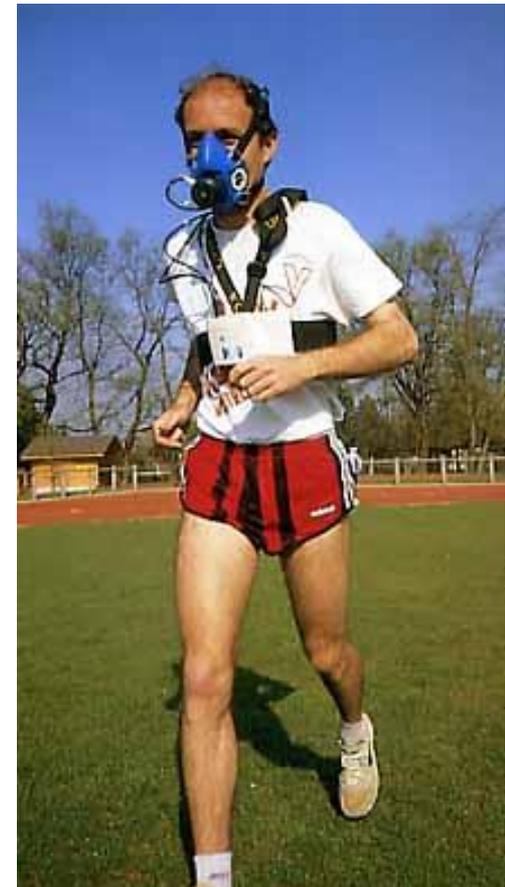
Systeme fixe

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes directes de détermination



Système ambulatoire



Système portable (K4)

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes directes de détermination

Il existe différents types d'ergomètres :

- tapis roulant,
- rameur,
- ergocycle.

Remarque : Les valeurs de $\text{VO}_2 \text{ max}$ les plus élevées sont obtenues sur tapis roulant (le cycloergomètre donne des valeurs de $\text{VO}_2 \text{ max}$ en moyenne plus basses que le tapis roulant : 92 à 96%).

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes directes de détermination

Pour les protocoles triangulaires (incrémentés ou en escaliers) la puissance d'exercice croît en général par paliers de 1 à 2 minutes sans repos entre les différents paliers, **jusqu'à l'épuisement du sujet.**

$\dot{V}O_2$ est alors mesuré en continu ou à la dernière minute des paliers → $\dot{V}O_2 \text{ max}$ = mesure de consommation d'oxygène au dernier palier complété.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.2 Méthodes directes

Relationship of Work Rate to Oxygen Consumption (Elite Runner)

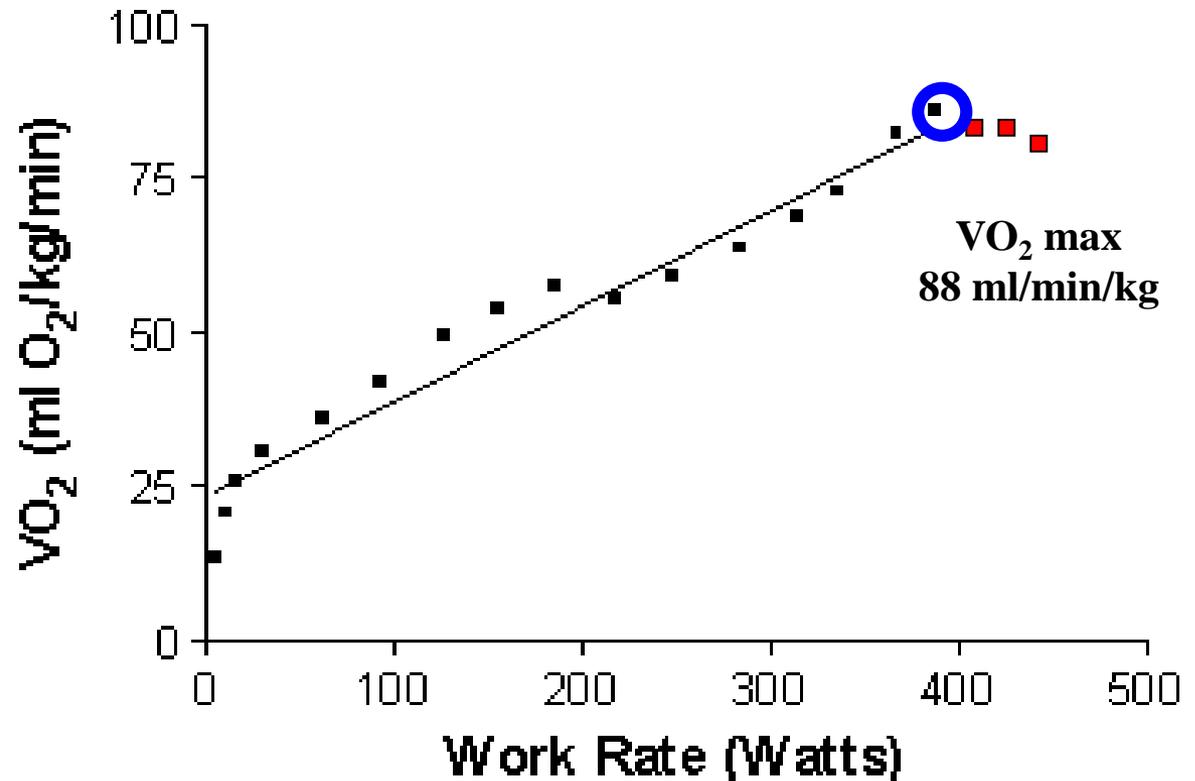


Figure 6. Mesure de la consommation d'oxygène selon la puissance de travail (coureur élite)

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max)

1.2 Méthodes directes de détermination

La consommation d'oxygène est considérée comme maximale si plusieurs critères sont réunis (Lacour et Flandrois; 1977) :

- ✓ Plafonnement de $\dot{V}O_2$ (la relation tend vers une asymptote)
- ✓ FC proche de sa valeur maximale théorique selon l'âge (FC max = $220 - \text{âge} \pm 10$ bpm) ;
- ✓ Lactatémie égale ou sup. à 9 mM/l de sang ;
- ✓ Quotient respiratoire ($\dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$) supérieur à 1,1.

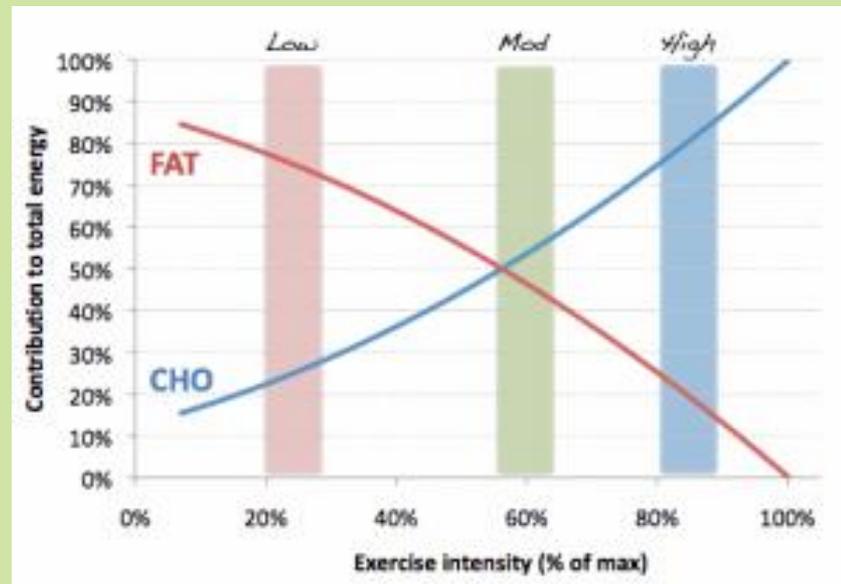
Zoom sur le Quotient Respiratoire

Le Quotient Respiratoire (QR) est le rapport du volume de CO₂ expiré sur le volume d'O₂ consommé.

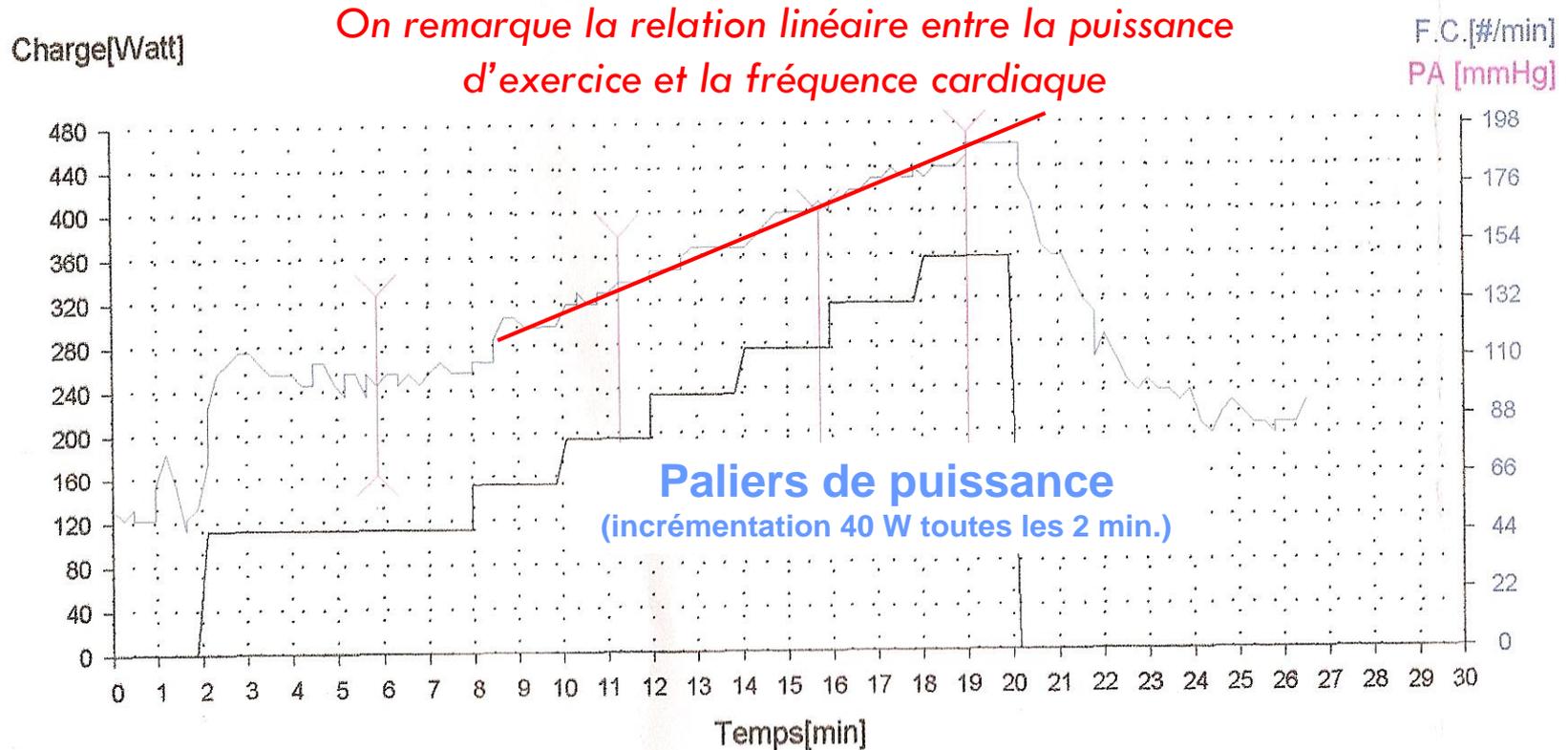
Plus le quotient respiratoire mesuré se rapproche de l'unité, plus l'organisme utilise les glucides pour assurer son besoin d'ATP. Lorsque le quotient respiratoire se rapproche de 0,7 les lipides sont alors un substrat privilégié pour la fourniture d'ATP.

TABLE 4.1 Percentage of Fat and Carbohydrate Metabolized as Determined by a Nonprotein Respiratory Exchange Ratio (R)

R	% Fat	% Carbohydrate
0.70	100	0
0.75	83	17
0.80	67	33
0.85	50	50
0.90	33	67
0.95	17	83
1.00	0	100



Exemple de test VO_2max en méthode directe en laboratoire



Taille = 170 cm

Poids = 65 kg

Age = 23 ans

Puissance au dernier palier = 360 W

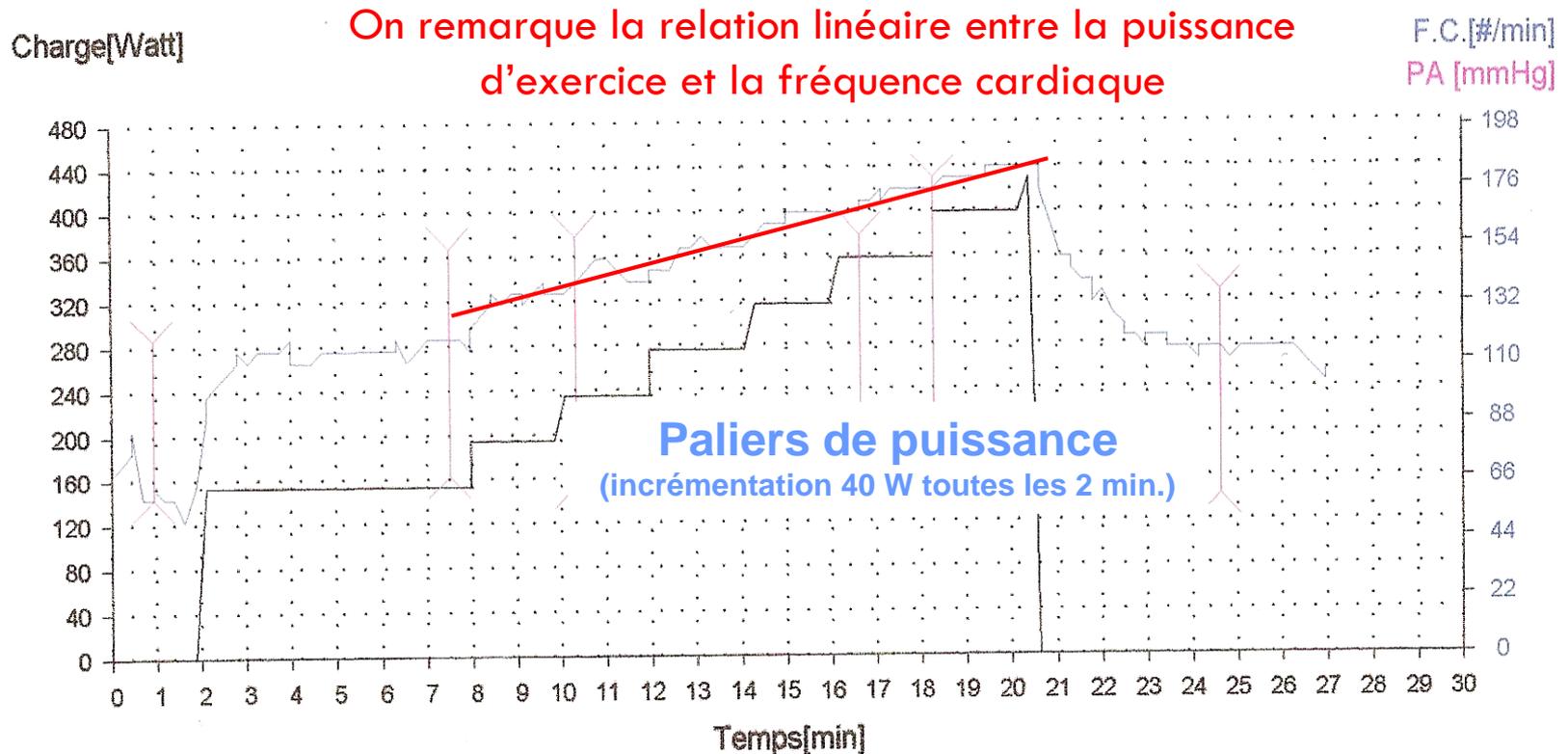
→ 5.5 W/kg.

FC au dernier palier = 197 bpm

VO_2 au dernier palier (VO_2max) = 4.45 l/mn

→ 68.5 ml/mn/kg.

Exemple de test VO_2max en méthode directe en laboratoire



Taille = 176 cm

Poids = 73 kg

Age = 22 ans

Puissance au dernier palier = 400 W

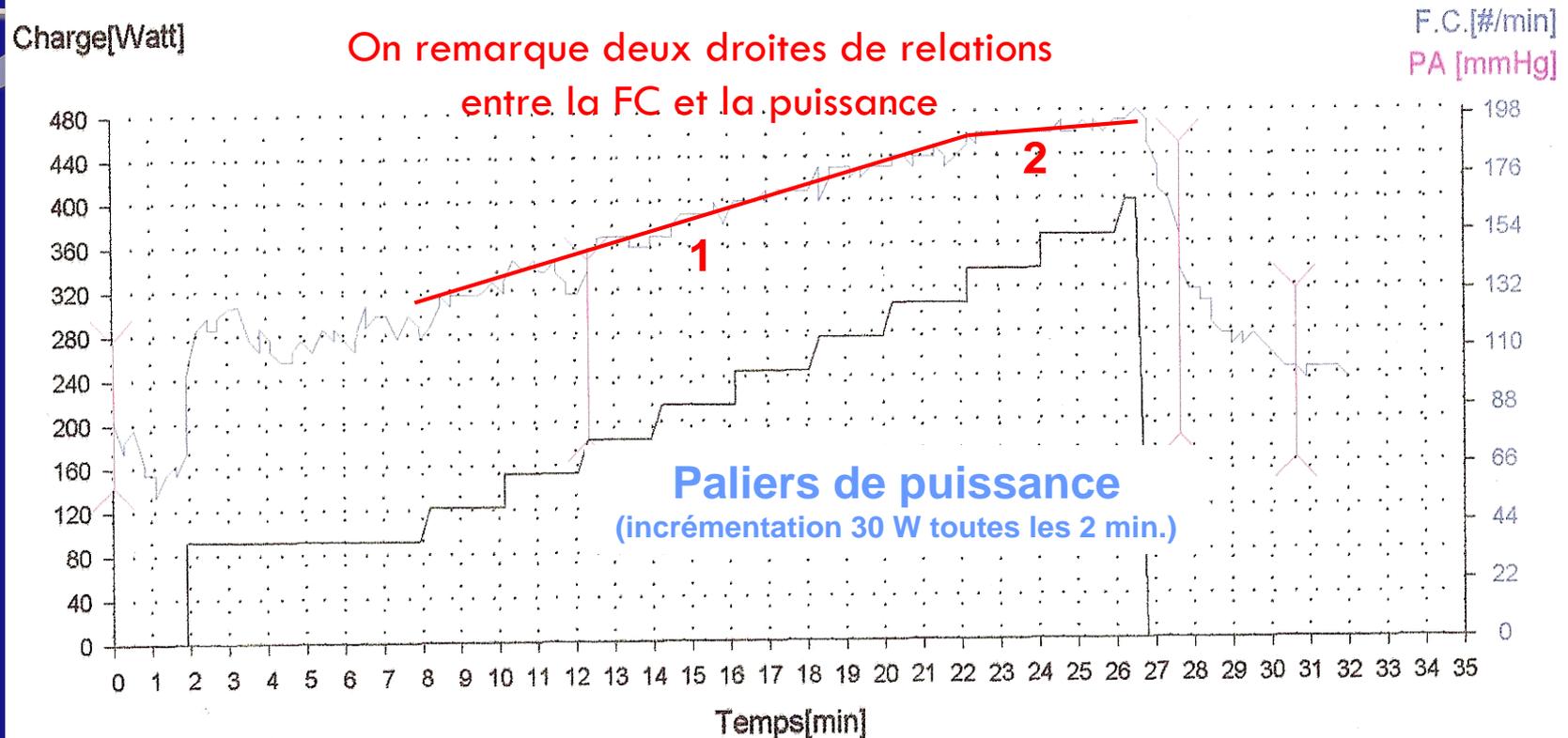
→ 5.5 W/kg.

FC au dernier palier = 187 bpm

VO_2 au dernier palier (VO_2max) = 5.01 l/mn

→ 68.6 ml/mn/kg.

Exemple de test VO_2max en méthode directe en laboratoire



Taille = 183 cm

Poids = 69 kg

Age = 20 ans

Puissance au dernier palier = 400 W (30" seulement)

→ **5.8 W/kg.**

FC au dernier palier = 202 bpm

VO_2 au dernier palier (VO_2max) = 4.98 l/mn

→ **72.2 ml/mn/kg.**

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.3 Méthodes indirectes de laboratoire

Les méthodes indirectes de détermination consistent à mesurer, non pas directement l'évolution de la consommation d'oxygène, mais un autre paramètre plus facilement mesurable avec lequel elle évolue de façon linéaire :

- ❑ soit la **puissance en Watts** dans le cas de tests utilisant un ergomètre en laboratoire ou un capteur de puissance ambulatoire ;
- ❑ soit la **vitesse exprimée en km/h** dans le cas de tests de terrain.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.3. Méthodes indirectes de laboratoire

Deux types d'épreuve peuvent être distinguées :

- ❑ **une épreuve maximale aérobie** reproduisant le protocole triangulaire de mesure directe de $\text{VO}_2 \text{ max}$, mais en relevant la PMA ou la VMA produite au dernier palier ;
- ❑ **une épreuve sous-maximale aérobie** estimant $\text{VO}_2 \text{ max}$ sur la base des relations unissant la fréquence cardiaque, la puissance développée, et la consommation d'oxygène.

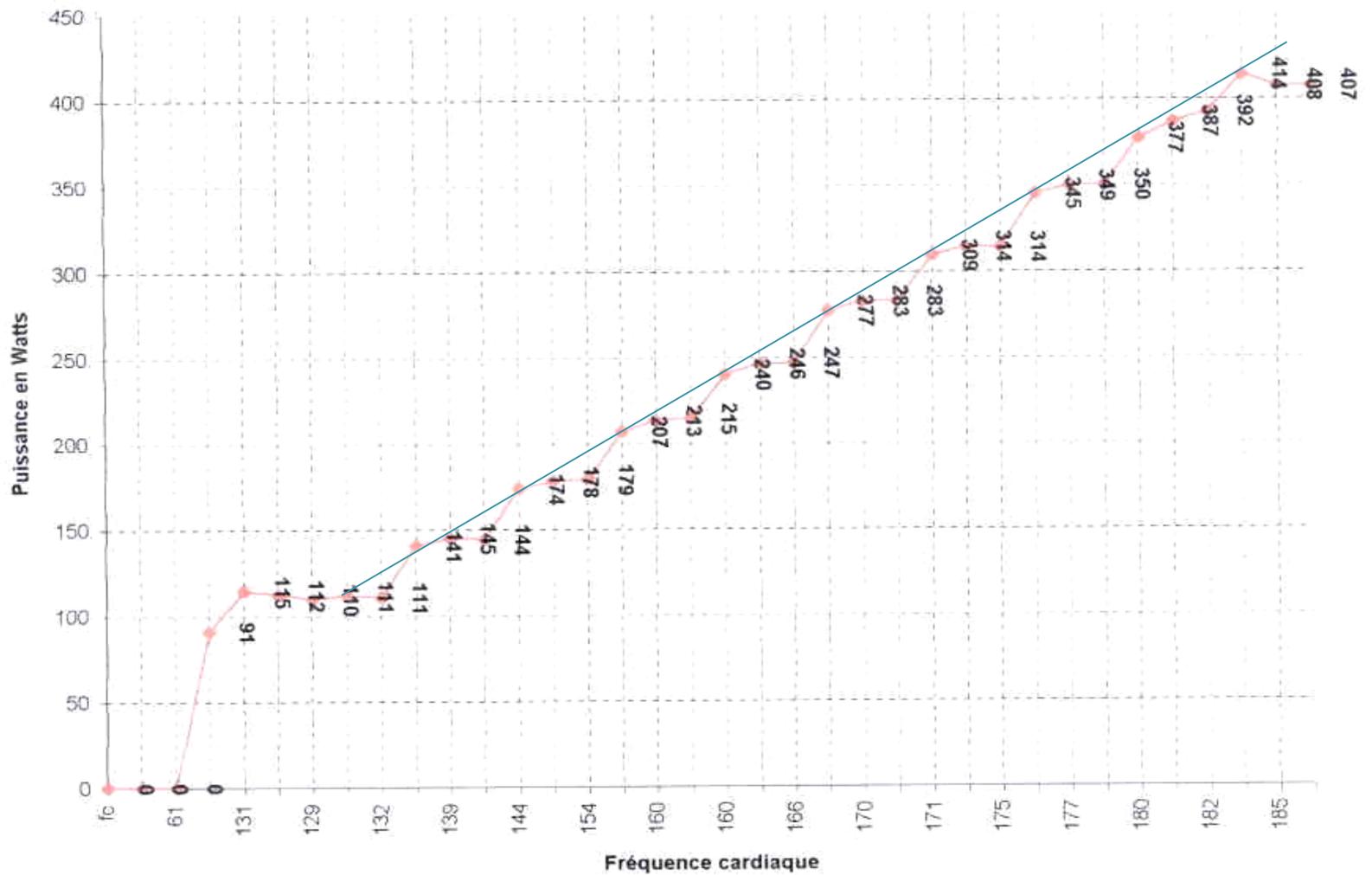


Figure 6. Évolution de la fréquence cardiaque en fonction de la puissance de l'exercice → PMA ici autour de 410 Watts.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max)

1.3.1 Épreuves maximales aérobie triangulaire

Inconvénients de cette méthode :

- ✓ Marge d'erreur de l'ordre de 10% car le rendement mécanique brut (énergie mécanique produite sur la dépense métabolique) n'est pas connu (il varie entre 20 et 25%) ;
- ✓ Fiabilité + ou – des données chiffrées fournies par l'ergomètre (Puissance en Watts) ;
- ✓ Pénibilité pour le sujet → motivation nécessaire pour obtenir des résultats fiables (mais comme en méthode directe).

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.3.1 Épreuves maximales aérobie rectangulaire

Test de 5 min sur ergocycle : maintenir la puissance maximale pendant 5 minutes.
La puissance moyenne est la PMA.

Inconvénient :

- Gestion de l'allure (ne convient pas à des débutants).
- Pénibilité ++.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.3.2 Épreuves sous-maximales aérobie (Astrand, 1954)

Ces méthodes sont fondées sur des corrélations statistiques entre la puissance, la FC et VO_2 .

Ces corrélations permettent d'**estimer** $\text{VO}_2 \text{ max}$ sans que le sujet n'atteigne sa consommation maximale d'oxygène.

I. La consommation maximale d'oxygène (VO_2max)

1.3.2 Épreuves sous-maximales aérobie (Astrand, 1954)

Ces méthodes reposent sur les deux hypothèses suivantes :

□ il existe une relation linéaire entre la FC et VO_2 . Statistiquement, à un % donné de VO_2max correspond une FC : **$\% \text{VO}_2\text{max} = 0,77 \times \text{FC} - 48,6$**

(128 bpm = 50% de VO_2max)

□ comme PMA \rightarrow FC max, VO_2max peut être extrapolé à partir de FC max qui est approximativement la même pour une population homogène de même âge ($220 - \text{âge}$).

Zoom sur la fréquence cardiaque maximale théorique

Différentes formules existent pour estimer la FCM :

- $FCM = 220 - \text{âge}$ (Astrand et Ryhming, 1954).
- $FCM = 205,8 - 0,685 \times \text{âge}$ (Inbaret *al.* 1994).
- $FCM = 208,754 - 0,734 \times \text{âge}$ (Robergs et Lanwher, 2002).
- $FCM = 207 - 0,7 \times \text{âge}$ (Gellish *et al.* 2007).
- $FCM = 191,5 - 0.007 \times \text{âge}^2$ (Gellish & Coll. 2007)

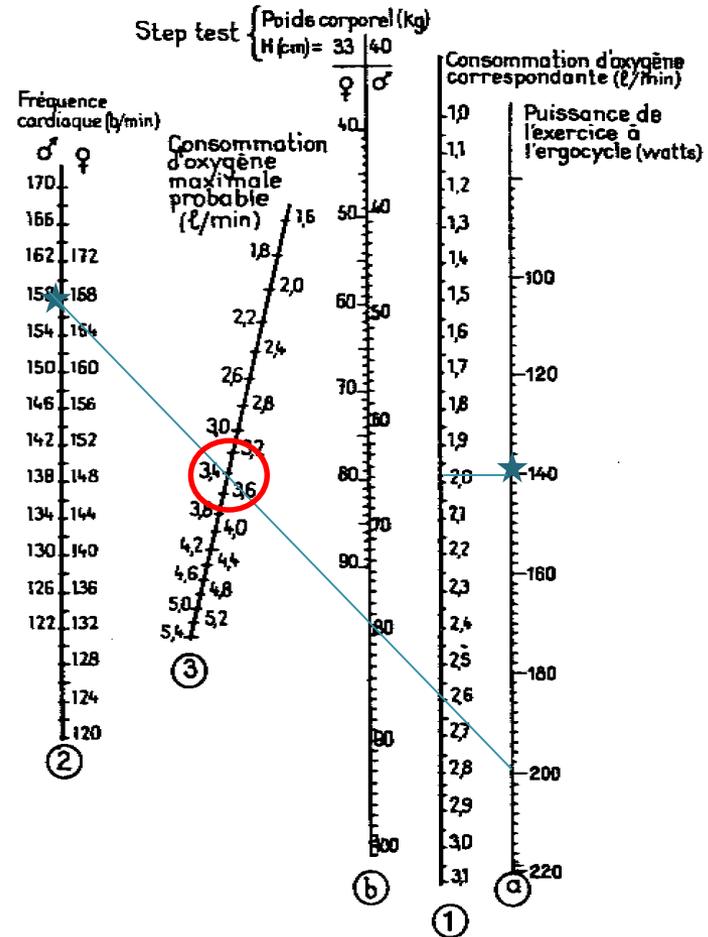
I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max)

1.3.2 Epreuves sous-maximales aérobie

L'épreuve consiste à faire pédaler le sujet pendant 6 min à une puissance constante (environ 2 W/kg). La FC est mesurée à la dernière minute quand l'état est considéré comme stable. Elle doit être supérieure à 130 bpm.

Ces relations, établies sur des groupes de sujets jeunes et bien entraînés, ont donné lieu à la construction de nomogrammes dont le plus connu est celui d'Astrand et Ryhming (1954).

Figure 8.
 Nomogramme
 d'Astrand et
 Ryhming (1954)



On procède successivement aux opérations suivantes :

- indiquer la puissance développée en portant un point sur l'échelle a (ergocyclomètre) ou b (step-test ; homme ou femme),
- tirer un trait horizontal partant de ce point sur l'échelle 1 : on a la valeur de la $\dot{V}O_2$ pour cet exercice,
- indiquer la fréquence cardiaque correspondante et mesurée, en portant un point sur l'échelle 2, homme ou femme,
- tirer une droite entre le point déterminé sur l'échelle 1 et sur l'échelle 2,
- l'intersection avec l'échelle 3 donne la valeur de la $\dot{V}O_2$ max probable.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max)

1.3.2 Épreuves sous-maximales aérobie

Inconvénients de cette méthode = marge importante d'erreur de l'ordre de 10 à 20 % :

- ✓ car le rendement musculaire n'est pas connu (variations entre 20 et 25%) ;
- ✓ fiabilité des puissances fournies par l'ergomètre ;
- ✓ différences interindividuelles concernant les valeurs de FC max estimée : $220 - \text{âge} \pm 10$ bpm.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2 \text{ max}$)

1.3.2 Épreuves sous-maximales aérobie

Deux adaptations possibles de cette méthode pour la rendre plus fiable :

❑ l'erreur d'estimation de $\dot{V}O_2 \text{ max}$ est réduite si on se réfère non pas à une relation établie pour un groupe, mais à une relation individuelle
→ établir la droite reliant la FC à la puissance, toujours pour une épreuve sous-maximale ;

❑ effectuer un calibrage de la fréquence cardiaque maximale en organisant une épreuve maximale (possible sur le terrain).

Puissance
en Watts

460
440
420
400
380
360
340
320
300
280
260
240
220
200
180
160
140
120
100

PMA estimée = 340 watts donc $VO_2\text{max} = 67 \text{ ml/mn/kg}$ pour $p = 70 \text{ kg}$

FC max =
220 - âge



Relevé des FC à différentes puissance d'un effort sous-maximal → deux points peuvent suffire pour établir une droite, dont l'intersection avec la FC admise pour l'âge du sujet donne une valeur individuelle estimée de $VO_2\text{max}$

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.4 Épreuves de terrain

Ces méthodes reposent sur l'organisation d'une épreuve permettant une évaluation de la **vitesse maximale aérobie** (course à pieds, natation), **ou de la puissance maximale aérobie** (cyclisme, aviron...). $\text{VO}_2 \text{ max}$ est ensuite extrapolé à partir de la valeur de VMA ou de PMA obtenue

Remarque : les cyclistes peuvent aujourd'hui réaliser des tests de terrain sur la base de mesures de puissance établies par des dispositifs embarqués.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.4.1 Le test de Cooper

Inconvénients de ce test :

- ✓ allure laissée au choix du coureur donc pas forcément régulière (problème de gestion de l'effort, notamment chez les débutants) ;
- ✓ la plupart des sujets ne peuvent maintenir $\text{VO}_2 \text{ max}$ sur 12 min. (ce test mesure aussi l'endurance aérobie du sujet).

D'ou l'utilisation d'un autre test : **le demi-Cooper**

$$\text{VMA} = \frac{\text{distance}}{100}$$

km/h m

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.4.2 Le test de 5 minutes de Chamoux et al. (1996)

Epreuve rectangulaire qui consiste à parcourir la plus grande distance possible en 5 minutes.

$$\text{VMA (km/h)} = \text{distance (m)} / 120.$$

Test fiable seulement pour les sujets entraînés qui savent gérer leur allure de course et qui sont motivés (car pénibilité de l'effort).

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2 \text{ max}$)

1.4.3 Test de Léger-Boucher (1980)

Épreuve qui s'inspire du protocole triangulaire de mesure de $\dot{V}O_2 \text{ max}$ en labo. Il s'agit pour les coureurs de suivre la vitesse indiquée par une bande sonore pré-enregistrée, celle-ci étant incrémentée de 1km/h toutes les 2 min (à partir de 8 km/h).

→ à chaque son, il faut être positionné au niveau de l'un des repères placés tous les 50m le long d'une piste de 400m.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max)

1.4.3 Test de Léger-Boucher (1980)

Variantes au Léger-Boucher :

- ❑ **l'épreuve de course navette de Léger et Lambert (1982)** : épreuve qui procède par des navettes aller-retour, entre deux plots espacés de 20 m (facilité d'utilisation mais relances constantes nécessaires).
- ❑ **le VAM-éval de Cazorla et Léger (1992)** : même protocole que Léger-Boucher, mais la vitesse est incrémentée de 0,5 km/h toutes les mn depuis 8.5 km/h (→VMA obtenues plus précises).

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.4.4 Épreuve de Brue (1985)

Il s'agit de suivre un « lièvre » cycliste dont la vitesse est très rigoureusement imposée (braquet et fréquence de pédalage). L'allure est augmentée de 0,25 à 0,30 km/h toutes les 30'' selon les paliers (vitesse de départ = 6,5 km/h).

VMA correspond au dernier palier complété, et $\text{VO}_2 \text{ max}$ peut être estimé selon l'équation de Léger et Mercier (1983) :

$$\text{VO}_2 \text{ max} = 3,5 \times V$$

ml/min/kg km/h

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.4.4 Épreuve de Brue (1985)



Inconvénients :

- La course est moins régulière pour les coureurs les plus éloignés du vélo.
- Mais le coureur situé juste derrière le vélo profite lui d'un abri aérodynamique (surtout à partir de 15 km/h).

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max)

1.4.5 Épreuve 45/15 de Gacon (1994)

Test intermittent dont le principe est de réaliser 45" d'effort puis 15" de récup. Il s'agit de parcourir une succession de distances données correspondant à une vitesse imposée de + en + élevée. La vitesse croît de 0.5 km/h par cycle d'une minute.

Lorsque le coureur n'arrive pas au repère au sol imposé, il s'arrête et note le palier. La dernière vitesse maintenue est la VMA (VMA intermittente car obtenue à l'occasion d'un test intermittent).

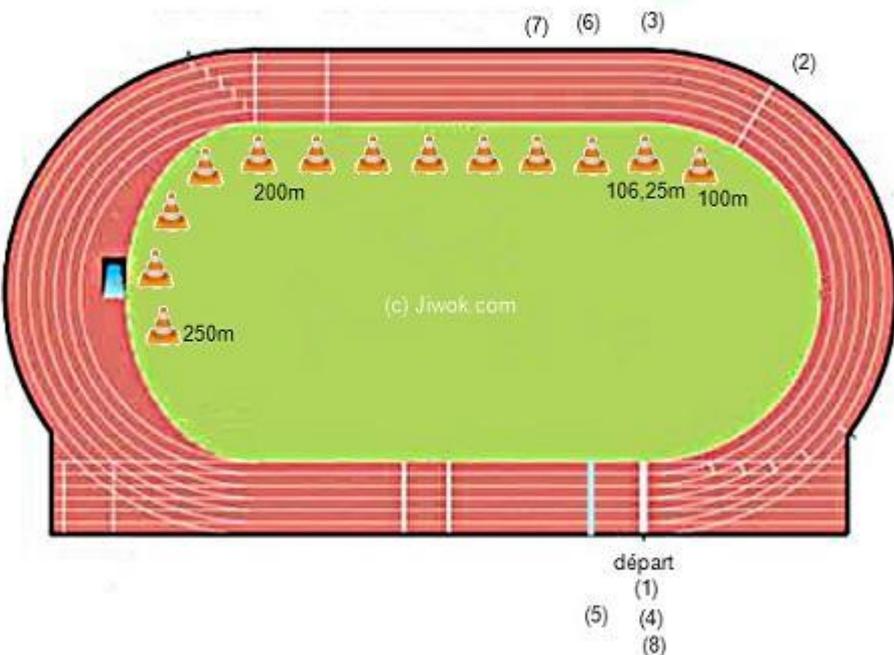


Figure 9. Déroulement du test 45/15 de Gacon

Palier	Vitesse km/h	Distance pour 45"	Temps au 100 m
1	8	100	45
2	8,5	106,25	42,5
3	9	112,5	40
4	9,5	118,75	37,89
5	10	125	36
6	10,5	131,25	34,29
7	11	137,5	32,73
8	11,5	143,75	31,3
9	12	150	30
10	12,5	156,25	28,8
11	13	162,5	27,69
12	13,5	168,75	26,67
13	14	175	25,71
14	14,5	181,25	24,83
15	15	187,5	24
16	15,5	193,75	23,23
17	16	200	22,5
18	16,5	206,25	21,82
19	17	212,5	21,18
20	17,5	218,75	20,57
21	18	225	20
22	18,5	231,25	19,46
23	19	237,5	18,95
24	19,5	243,75	18,46
25	20	250	18

Vidéo explicative : <https://youtu.be/gnzsM3VAPpl>

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max)

1.4.6 Le TUB II de Cazorla (1990)

C'est un test intermittent à intensité progressive dont le principe est de réaliser des paliers de 3 min séparés par un intervalle de repos de 1 min. sur une piste balisée par des plots tous les 20 mètres.

Le progression est de 8, 10, 12 km/h, puis 13, 14, 15, 16, 17, 18... km/h. Un retard sur 3 ou 4 plots consécutifs marque l'arrêt du test.

Ce test donne la valeur de la VMA intermittente.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.4.7 Le 30/15 IFT (Intermittent Fitnessse Test) de Martin Buchheit

Test intermittent qui donne donc une VMA intermittente (intéressant pour les sports co.).

C'est un test en course navette qui alterne des périodes de course de 30 sec. et des périodes de marches de 15 sec.

Le test démarre à 8km/h soit une marche rapide et augmente de 0.5km/h par palier.

Pour en savoir plus : [30-15 IFT | Martin Buchheit \(martin-buchheit.net\)](https://www.martin-buchheit.net/30-15-IFT)

I. La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max)

1.4.7 Validité et reproductibilité des tests

VMA déterminées par différents tests chez les mêmes sujets (d'après Cazorla et al.)

VMA km/h	Léger-Boucher	Vam-éval	TUB2	Brue
	17,2 +/- 1,1	17,3 +/- 1,1	17,4 +/- 1,0	17,8 +/- 0,9

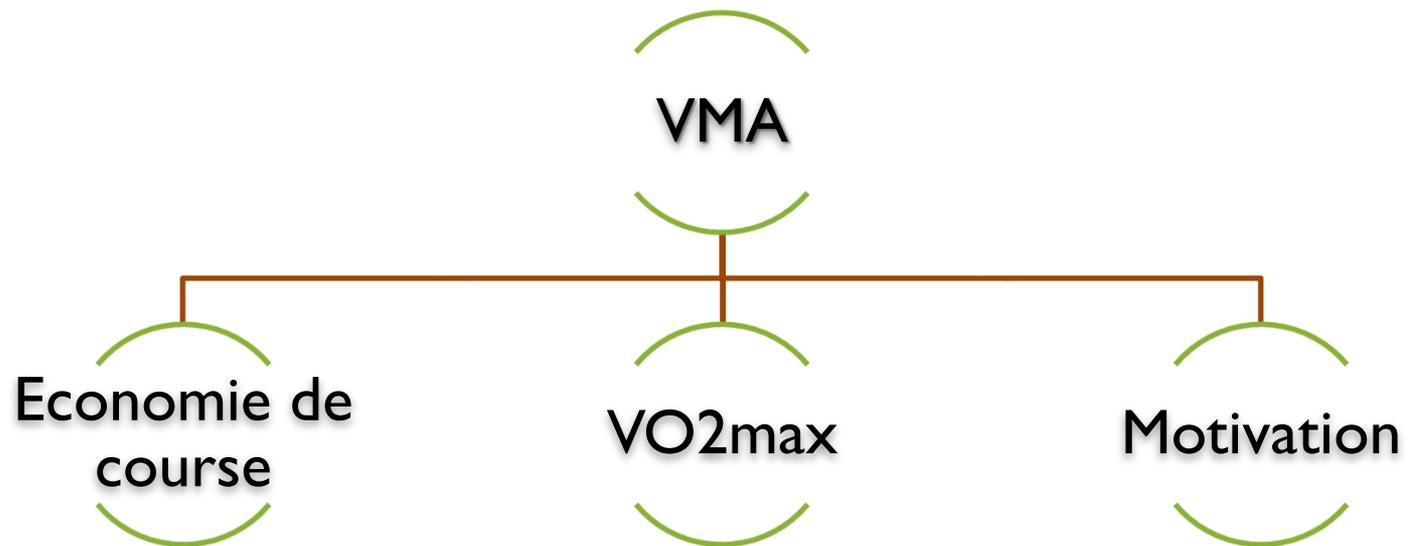
Les tests peuvent conduire à une surestimation de la VMA en raison de l'impossibilité de savoir à partir de quelle vitesse la consommation d'oxygène plafonne.

→ V.Billat (1998) propose de vérifier la VMA par un test rectangulaire de « temps limite » à VMA, celui-ci devant être soutenu au moins 3 minutes.

I. La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

1.5 Conclusion sur VMA et $\text{VO}_2 \text{ max}$

VMA ne dépend pas seulement de la consommation maximale d'oxygène. Trois facteurs interviennent dans VMA :



II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Selon Jürgen Weineck (1992), **l'endurance** est la capacité psychique et physique que possède l'athlète pour résister à la fatigue.

L'endurance aérobie peut se définir comme la capacité d'utiliser un pourcentage le plus élevé possible de sa consommation maximale d'oxygène sur une durée la plus longue possible.

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

La consommation maximale d'oxygène ne peut être maintenue qu'un temps limité, de 4 à 10 min. selon l'aptitude, et en moyenne autour de 6 min. C'est dans l'accumulation de lactates qu'il faut voir les raisons de cette limitation dans le temps (cette accumulation s'accompagne d'**une baisse du pH sanguin et musculaire** par une augmentation de proton H^+ , ce qui perturbe les contractions musculaires). En effet, l'intensité d'exercice correspondant à $VO_2\text{max}$ est une intensité où l'on observe une augmentation continue de la production de lactates. Cette augmentation va rapidement provoquer une fatigue musculaire rendant la poursuite de l'exercice impossible au même niveau d'intensité.

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Attention : « *Le lactate n'est donc pas le "déchet sans valeur" et encore moins cette "toxine qui empoisonne le muscle" comme il est dit quelquefois mais rien de plus qu'un métabolite intermédiaire à fort potentiel énergétique* » (Cazorla et coll., 2001).

Pour en savoir plus sujet le sujet :

- Guillaume Travaillant, *L'acide lactique est innocent*, 2007 : <https://e-s-c.fr/lib/ckeditor/kcfinder/upload/files/CP%20-%20Acide%20lactique.pdf>
- G.Thibault, F.Péronnet, *La mauvaise réputation*, in Sport et Vie n°92, 2005.
- L.Léger, G.Cazorla, C.Petitbois, L.Bosquet, *Lactate et exercice : mythes et réalités*, in Revue STAPS n°54, 2001 : <https://www.cairn.info/revue-staps-2001-1-page-63.htm>

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Une question importante pour l'athlète et l'entraîneur est de repérer l'intensité de l'effort au-delà de laquelle l'athlète s'épuise rapidement par acidose musculaire. La notion de **transition aérobie – anaérobie** rend intelligible ce niveau d'intensité : **il s'agit de l'intensité de travail à partir de laquelle la contribution du métabolisme anaérobie à la fourniture d'énergie augmente rapidement, avec une augmentation très marquée de la lactatémie.**

La notion de seuil est définie par « **le décrochage de la linéarité lors de l'exercice à intensité croissante** » (J. Poortmans, N.Boisseau, Biochimie des APS, 2003).

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Deux points d'inflexion de l'évolution de la lactatémie en fonction de la puissance de l'exercice délimitent cette zone :

- **le seuil aérobie est un seuil d'apparition des lactates** (proche du seuil ventilatoire 1 ou SV1) : il correspondrait à une lactatémie égale à 2 mmol.l^{-1} (moyenne statistique). En réalité dès le début de l'exercice il y a déjà production de lactates, mais à des niveaux très faibles (le seuil aérobie marquerait une première légère rupture).
- **le seuil anaérobie serait un seuil d'accumulation des lactates** (proche du seuil ventilatoire 2 ou SV2) : il correspondrait à une lactatémie égale à 4 mmol.l^{-1} (d'après Keul et al., 1978 ; Kinderman et al., 1979).

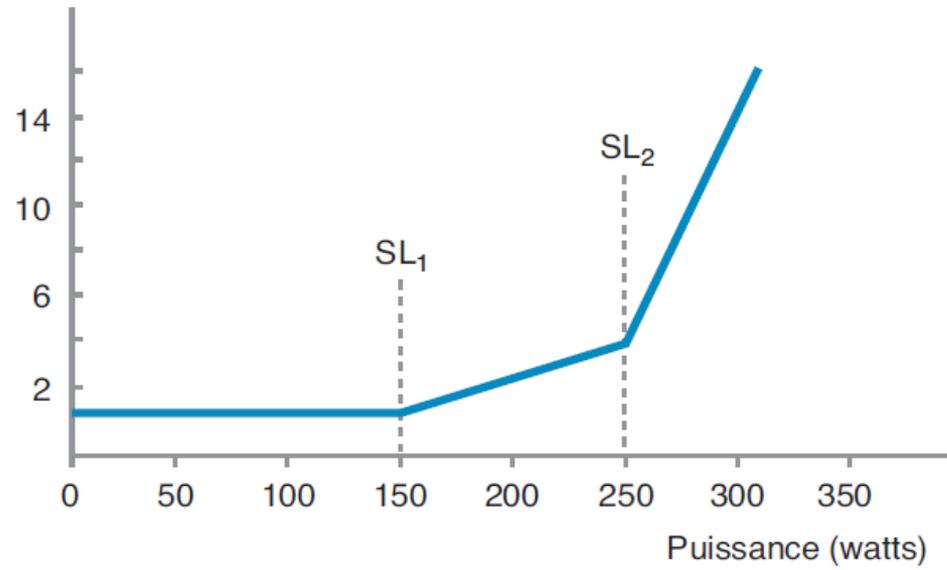
II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

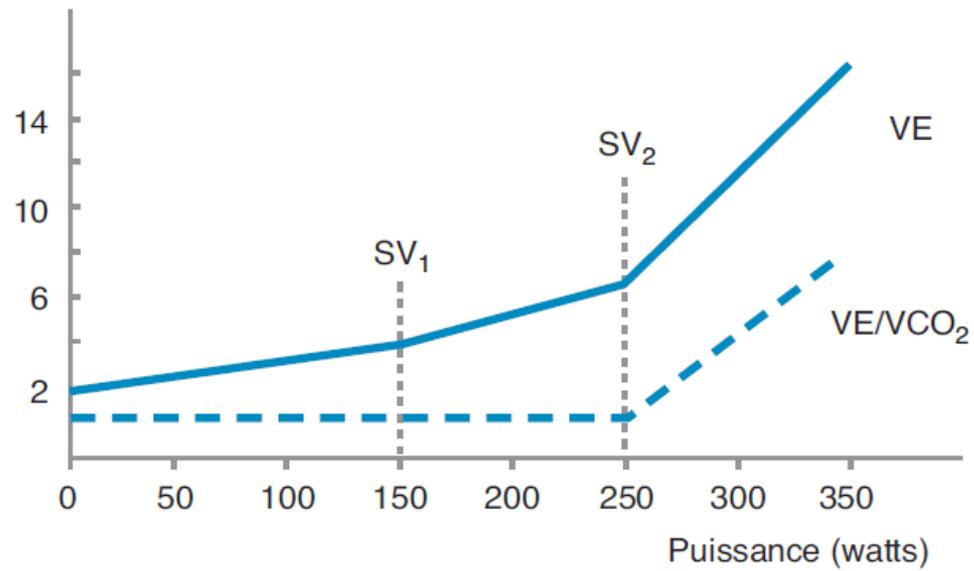
Passé le seuil anaérobie (seuil lactique 2, seuil ventilatoire 2), l'équilibre est rompu entre la vitesse de production et la vitesse d'élimination des lactates → **le sportif ne pourra pas maintenir sa puissance d'exercice au même niveau très longtemps** (il est « dans le rouge »). Notons que la valeur de 4 mmol.l⁻¹ correspond à une moyenne statistique et ne tient pas compte des ≠ interindividuelles, **elle est donc largement remise en question** aujourd'hui.

Mais si l'intensité de l'exercice se situe en-deçà du seuil anaérobie, l'effort pourra être maintenu à la même intensité beaucoup plus longtemps. D'autres paramètres interviendront alors pour limiter le maintien de la puissance d'exercice sur la durée (les réserves en glycogène musculaire ou les capacités de thermorégulation).

Lactatémie (mM/L)



Paramètres ventilatoires



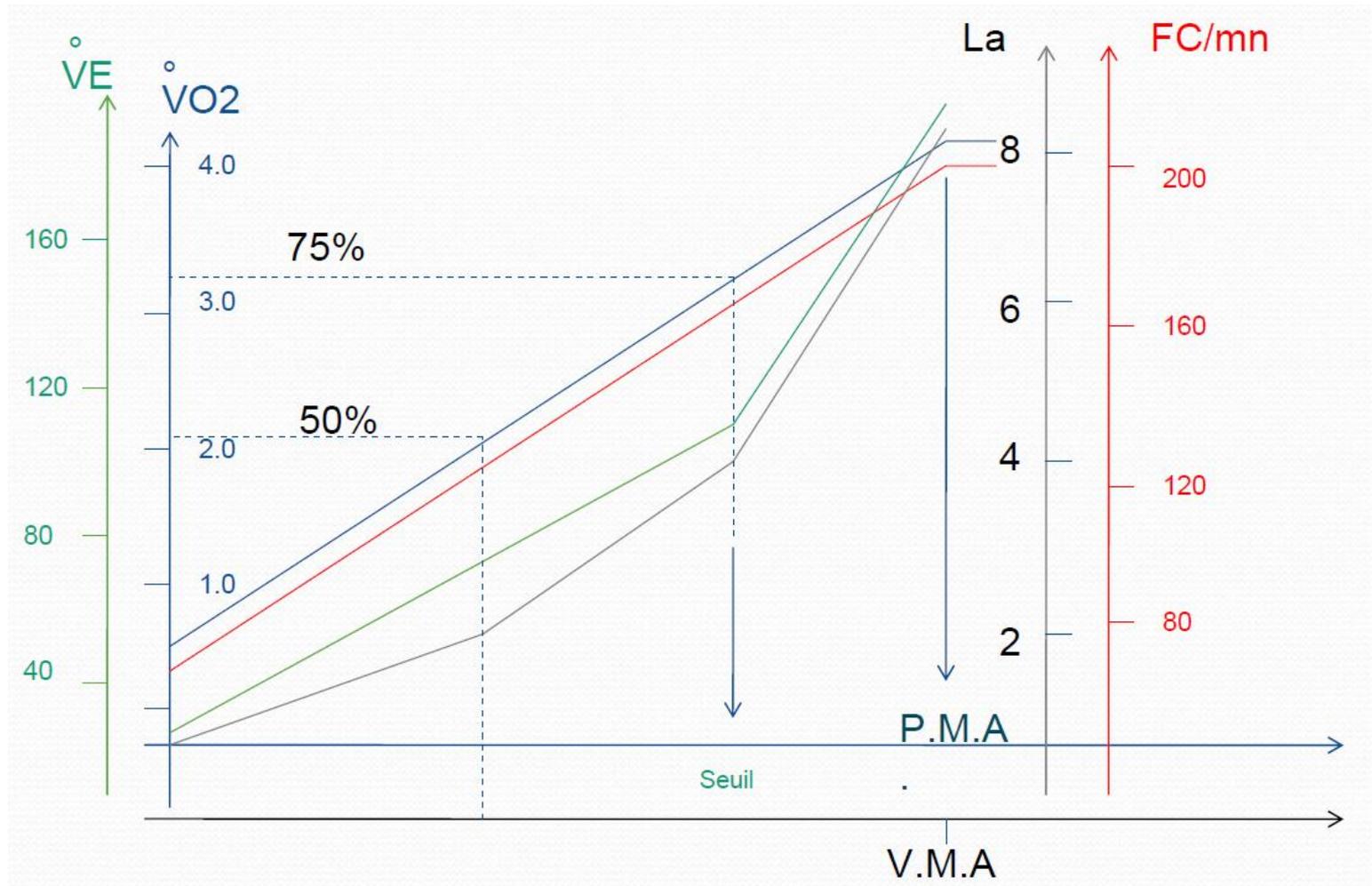


Figure II. Évolution du débit ventilatoire (VE), de la consommation d'oxygène (VO₂), de la lactatémie (La), en fonction de la puissance de l'exercice.

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Zone de transition et performance : les étroites corrélations qui unissent l'intensité de l'exercice au niveau du seuil anaérobie et la performance à l'exercice de moyenne et de longue durée confèrent à cette notion un intérêt de premier ordre. En effet, plus la zone de transition est élevée, et plus la performance est bonne.

Les corrélations obtenues avec la performance sont plus étroites que celles que l'on obtient à partir de $VO_2\text{max}$ dès que la durée de l'effort dépasse 30 min.

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

La notion de transition aérobie – anaérobie conditionne en grande partie **l'endurance aérobie**, c'est à dire la capacité d'un organisme à maintenir un pourcentage élevé de sa consommation maximale d'oxygène le plus longtemps possible.

Un écart de quelques % entre deux sportifs constitue pour celui qui dispose du seuil anaérobie le plus élevé un atout considérable.

Les vainqueurs du Tour les plus puissants depuis trente ans

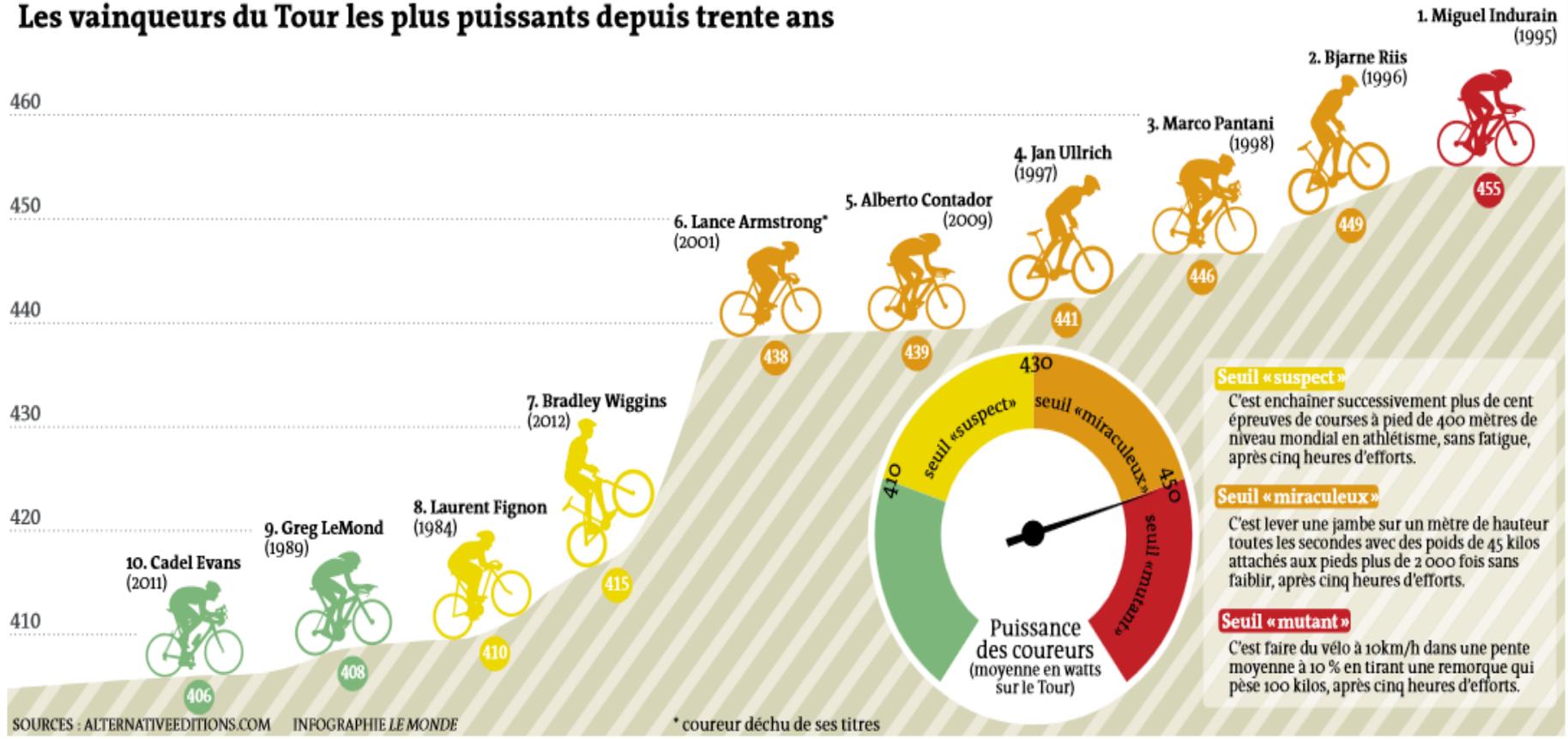


Figure 12. Les puissances au seuil anaérobie relevées chez les vainqueurs du Tour de France sur un col l'année de leur victoire (effort de plus de 40 minutes).

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Quelle est la signification physiologique du seuil anaérobie ? Les lactates sont-ils vraiment responsables de la fatigue musculaire ? **Le seuil anaérobie existe-il ?**



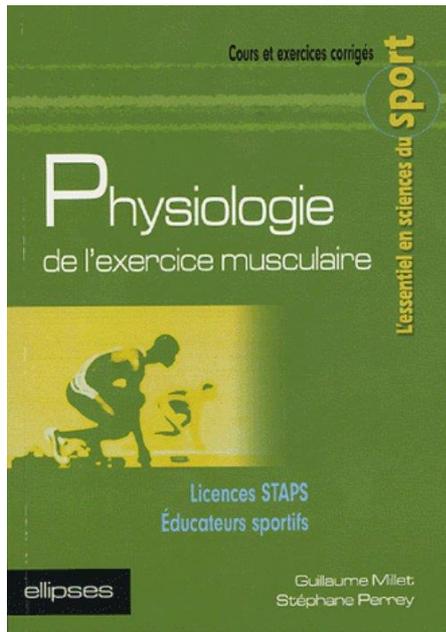
« Les chercheurs se montrent désormais beaucoup plus prudents. Sur le terrain on continue d'y faire souvent référence, tout simplement parce que, du point de vue de l'athlète, la notion correspond à un champ de sensations relativement précises et reste assez utile dans la programmation de l'entraînement » (G.Goetghebuer, La mauvaise réputation de l'acide lactique, Sport & Vie hors-série n°18, août 2003).

→ Voir cours L2 de Hervé Assadi

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Quelle est la signification physiologique du seuil anaérobie ? Les lactates sont-ils vraiment responsables de la fatigue musculaire ? **Le seuil anaérobie existe-il ?**



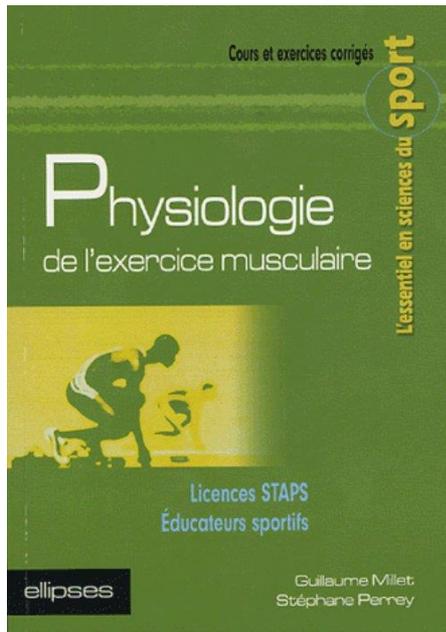
« Et puis il faut garder à l'esprit que le lactate sanguin résulte d'un équilibre entre la production et l'élimination de lactate dans le sang donc utiliser le lactate sanguin comme reflet de la production de lactate dans le muscle est critiquable sur le plan théorique » (G.Millet, Physiologie de l'exercice musculaire, Ellipses, Paris, 2005).

→ La signification biologique de ce type de seuil reste à déterminer

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Quelle est la signification physiologique du seuil anaérobie ? Les lactates sont-ils vraiment responsables de la fatigue musculaire ? **Le seuil anaérobie existe-il ?**

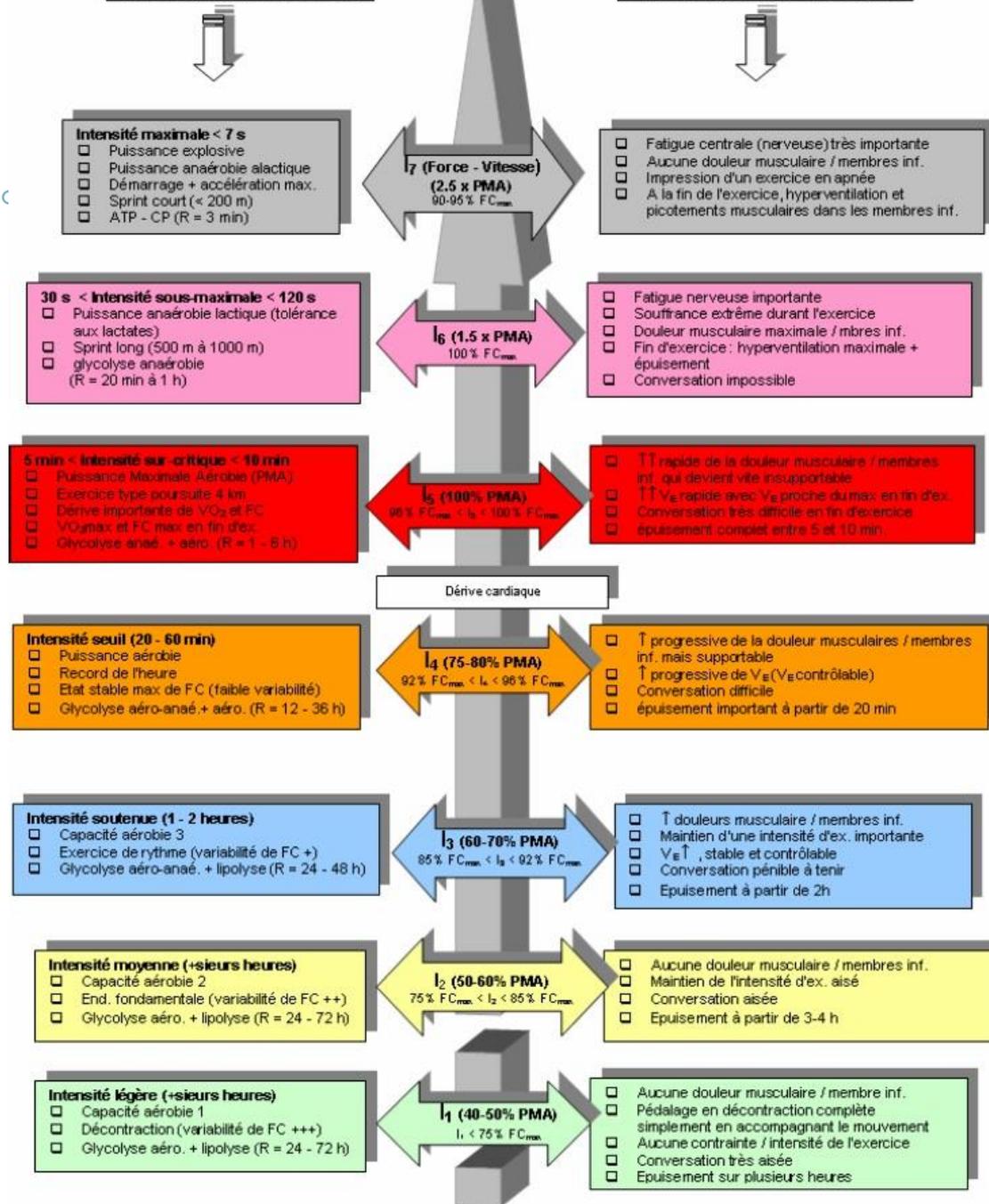


« Malgré ses limites, le seuil anaérobie est très utilisé sur le plan clinique (pour la détermination de la tolérance à l'effort) et pour la conduite de l'entraînement (point de repère pour les intensités d'entraînement) » (G.Millet, *Physiologie de l'exercice musculaire*, Ellipses, Paris, 2005).

→ Par exemple en cyclisme : voir diapo suivante.

Intensité de l'exercice

Perception de l'exercice



Echelle d'Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice (échelle d'ESIE, Grappe et coll., 1999)

II. L'endurance aérobie

2.1 Rappel théorique : définitions

Quelle est la signification physiologique du seuil anaérobie ? Les lactates sont-ils vraiment responsables de la fatigue musculaire ? **Le seuil anaérobie existe-il ?**

- **Il n'existerait pas de véritable « seuil » marquant une rupture, mais plutôt des intensités maximales d'effort différentes selon la durée de l'effort.**
- *« Par conséquent, il ne sert à rien de chercher des zones cibles d'entraînement à partir de mesures de lactatémies à l'exercice. Une alternative, bien plus simple, consiste tout simplement à appliquer le principe de spécificité de l'entraînement et à mettre l'accent sur des intensités qui se rapprochent de celles des compétitions pour lesquelles l'athlète se prépare » (G.Travaillant, 2005).*

II. L'endurance aérobie

2.2 Test : temps limite à la PMA ou à la VMA (V.Billat, 1998)

Le test permet de connaître la durée de maintien de la VMA, et donc de VO_2 max.

Protocole : le sportif (qui 1 à 2 semaine(s) auparavant a effectué une épreuve de détermination de VMA sur le terrain) s'échauffe 15-20 min. à 60% de la VMA. Puis en 20", il atteint sa VMA et la maintient le plus longtemps possible. La durée obtenue correspond au temps limite à VO_2 max.

II. L'endurance aérobie

2.2 Temps limite à la PMA ou à la VMA (V.Billat, 1998)

Les variations interindividuelles sont fortes et vont de 4 à 11 minutes.

A VO_2 max égal, deux types de sujets sont distingués :

- ✓ ceux qui sont capables de maintenir VO_2 max longtemps (> à 6 min.) ;
- ✓ ceux qui ne peuvent maintenir VO_2 max plus de 6 min.

II. L'endurance aérobie

2.2 Temps limite à la PMA ou à la VMA (V.Billat, 1998)

Trois grands avantages à ce test :

- ✓ il permet de vérifier la VMA obtenue lors d'épreuves de terrain de type triangulaire par un test rectangulaire ;
- ✓ il constitue un cadre de référence complémentaire pour le choix de la durée d'entraînement à $VO_2\text{max}$ (→ individualiser plus finement les charges de travail) ;
- ✓ il constitue un critère d'évaluation de l'aptitude aérobie complémentaire de $VO_2\text{max}$.

II. L'endurance aérobie

2.3 L'évaluation du seuil anaérobie par une épreuve rectangulaire

Le seuil anaérobie peut être évalué sur le terrain (ou sur un ergomètre en laboratoire) à partir d'une épreuve rectangulaire (Grappe, 2006).

- Protocole = après 15 min. d'échauffement, réaliser un effort de 20 min. en continu à intensité maximale sur cette durée.
 - La vitesse moyenne est la vitesse au seuil anaérobie (course à pieds).
 - La puissance moyenne est la puissance au seuil anaérobie (cyclisme).
 - La fréquence cardiaque est la FC au seuil.

II. L'endurance aérobie

2.3 L'évaluation du seuil anaérobie par une épreuve rectangulaire

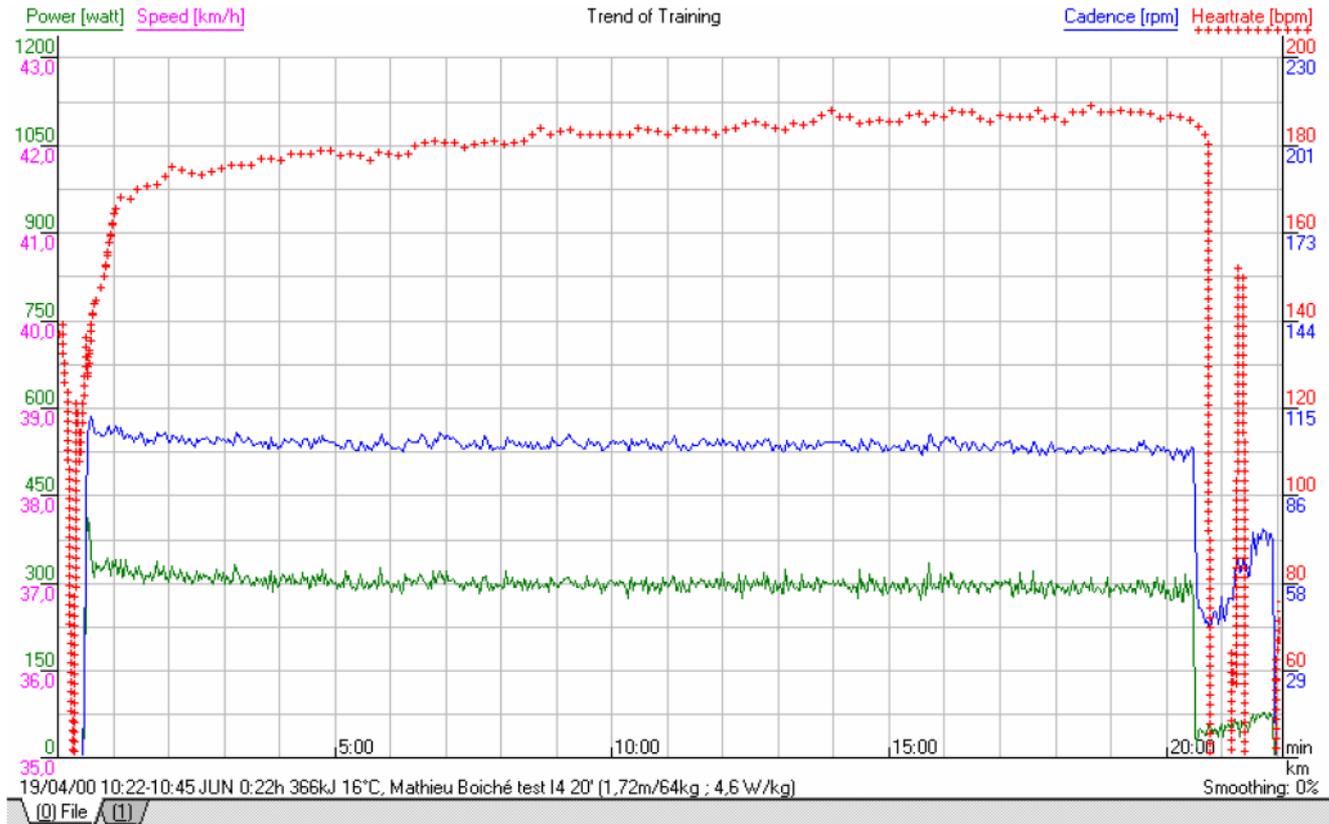


Figure 12. Fréquence cardiaque (en rouge), Cadence (en bleu), et Puissance (en vert) en cours d'une épreuve d'effort de 20 min. sur ergocycle. D'après F.Grappe, 2006.

II. L'endurance aérobie

2.4 L'évaluation du seuil anaérobie par une épreuve triangulaire

Le seuil anaérobie peut être évalué à partir de la mesure de trois grands paramètres au cours d'une épreuve triangulaire :

- la **lactatémie** ou concentration sanguine en lactates (L) → seuils lactiques 1 et 2 ;
- le **débit ventilatoire** (V_e) et le **rapport débit ventilatoire / CO₂ rejeté** (V_e/V_{CO_2}) → seuils ventilatoires 1 et 2 ;
- la **fréquence cardiaque** (FC) ???

II. L'endurance aérobie

2.3.1 La mesure de l'évolution des lactates dans le sang (SL1 et SL2)

Il s'agit de doser les lactates sanguins à chaque palier d'une épreuve triangulaire.

L'objectif est de saisir la valeur de la puissance (et la FC correspondante) à partir de laquelle la lactatémie dépasse 4 mmol.L^{-1} (Kinderman et al, 1979). → remis en question.

En raison des différences interindividuelles concernant la valeur de lactatémie au seuil anaérobie (en réalité entre 3,5 et 6,5), une détermination plus fiable se base sur l'observation d'une cinétique (méthode logarithmique pour identifier une « cassure » dans la courbe) et non sur le relevé de valeurs.

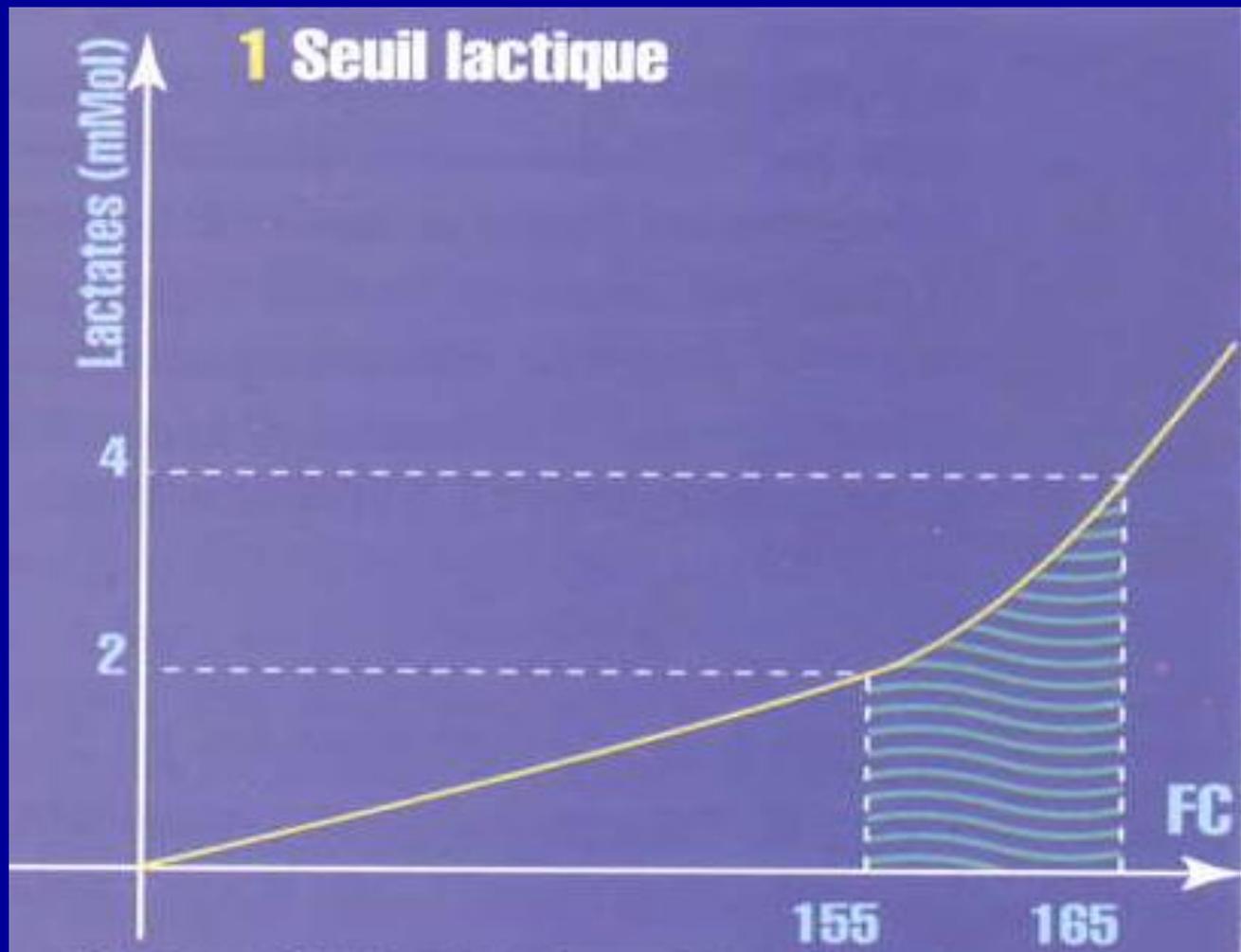


Figure 13. Mesure de l'évolution des lactates sanguins : la partie hachurée correspond à la zone de transition, et se situe entre le seuil aérobie et le seuil anaérobie

II. L'endurance aérobie

2.3.2 L'évolution des paramètres ventilatoires (VE , VCO_2 , VO_2)

- **Le seuil ventilatoire 1** (SV1 ou seuil d'adaptation ventilatoire) est défini comme un changement de régime ventilatoire, avec une augmentation de la VE qui n'est plus proportionnelle à l'augmentation de la VO_2 , la dépasse et suit alors la progression de la VCO_2 .
- **Le seuil ventilatoire 2** (SV2 ou seuil d'inadaptation ventilatoire), où la VE croît encore plus vite que la VCO_2 .

Paramètres ventilatoires

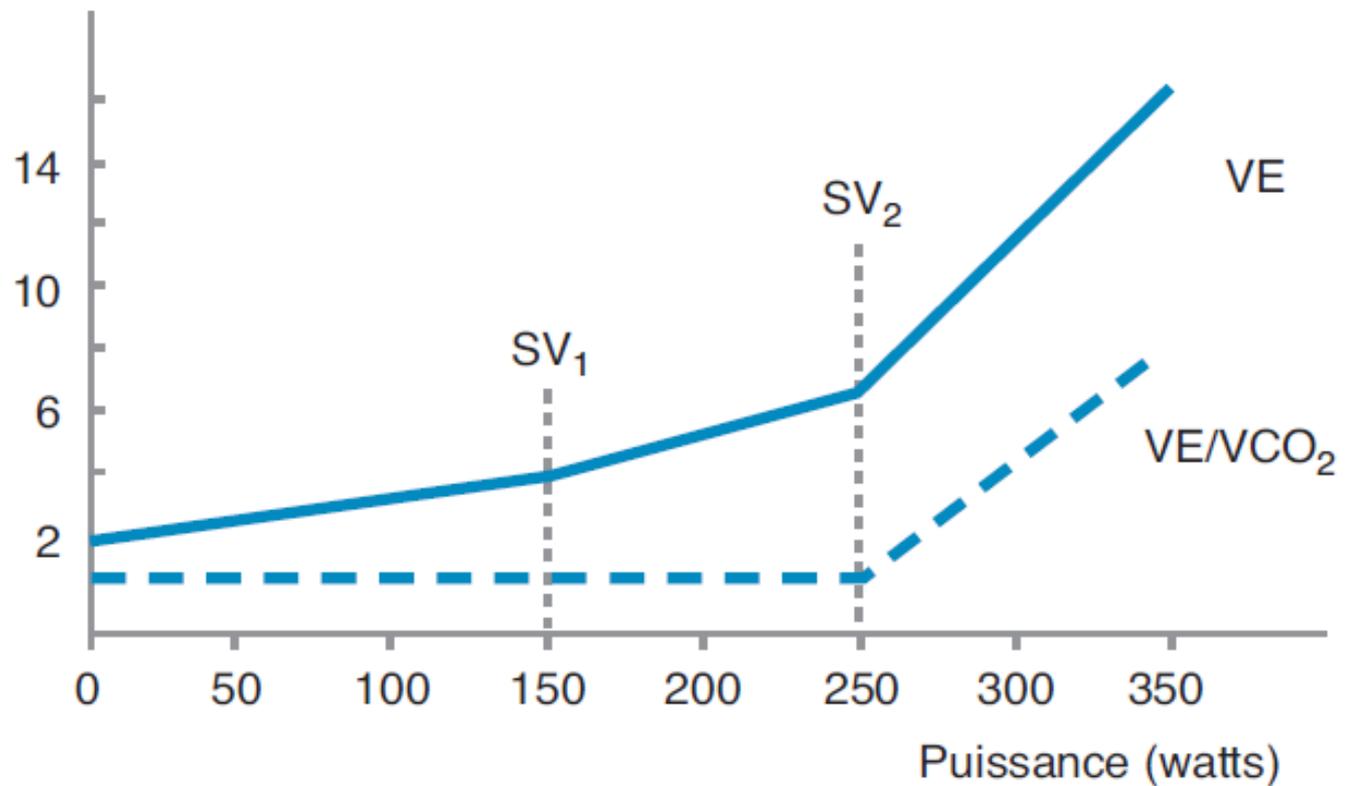


Figure 14. Mesure de l'évolution du débit ventilatoire et de rapport ventilation / CO₂ rejeté lors d'un effort incrémenté. On remarque 2 cassures ou inflexions qui correspondent successivement au seuil ventilatoire 1 et au seuil ventilatoire 2.

II. L'endurance aérobie

2.3.3 La mesure de l'évolution de la fréquence cardiaque (FC) : le test de Conconi

Selon Conconi, la relation entre la puissance de l'exercice et la FC n'est pas strictement linéaire, mais **elle s'infléchit** passé un certain niveau d'effort.

Ce point de déflexion correspondrait au seuil anaérobie → mise au point d'un test triangulaire pouvant être réalisé sur le terrain permettant d'estimer, à partir de l'évolution de la FC, le seuil anaérobie (Conconi et al., 1982).

Nombreuses critiques → ce point d'inflexion existe-t-il vraiment ? Concordance entre seuil et point d'inflexion ?

II. L'endurance aérobie

Figure 15. Mise en évidence d'un point de déflexion dans l'évolution de la FC selon la puissance de l'exercice. D'après Conconi (1982) ce point correspond au seuil anaérobie.

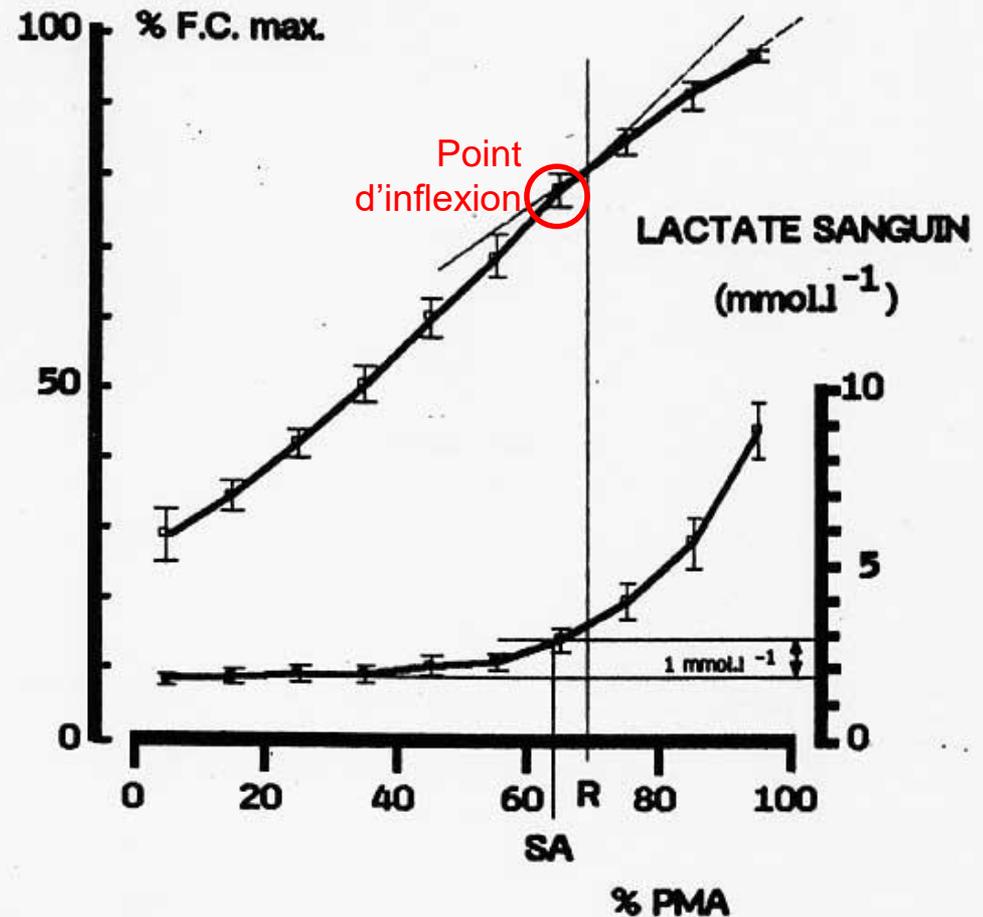


Figure 1 – Évolution de la fréquence cardiaque et de la concentration sanguine du lactate en fonction de la puissance relative (% P.M.A.). Mesures pratiquées sur les 8 sujets sédentaires avant entraînement. SA : seuil anaérobie – R : point de rupture de la courbe d'évolution de la fréquence cardiaque.

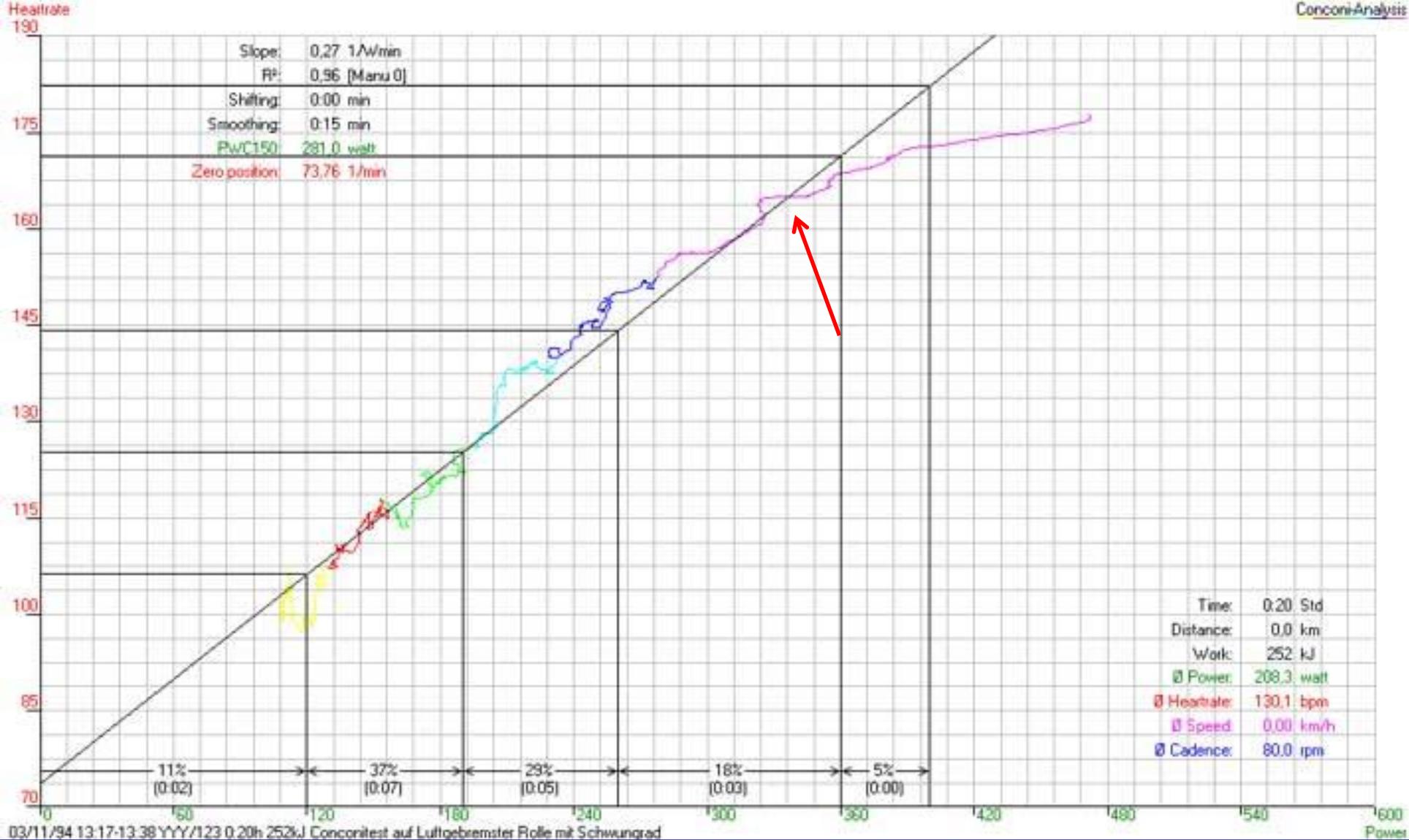


Figure 16. Mesure de l'évolution la fréquence cardiaque selon la puissance de l'exercice : le point d'inflexion (ici environ 165 bpm pour 340 W) correspond au seuil anaérobie

Charge[Watt]

F.C.[#/min]

PA [mmHg]

On remarque deux droites de relations
entre la F.C. et la puissance

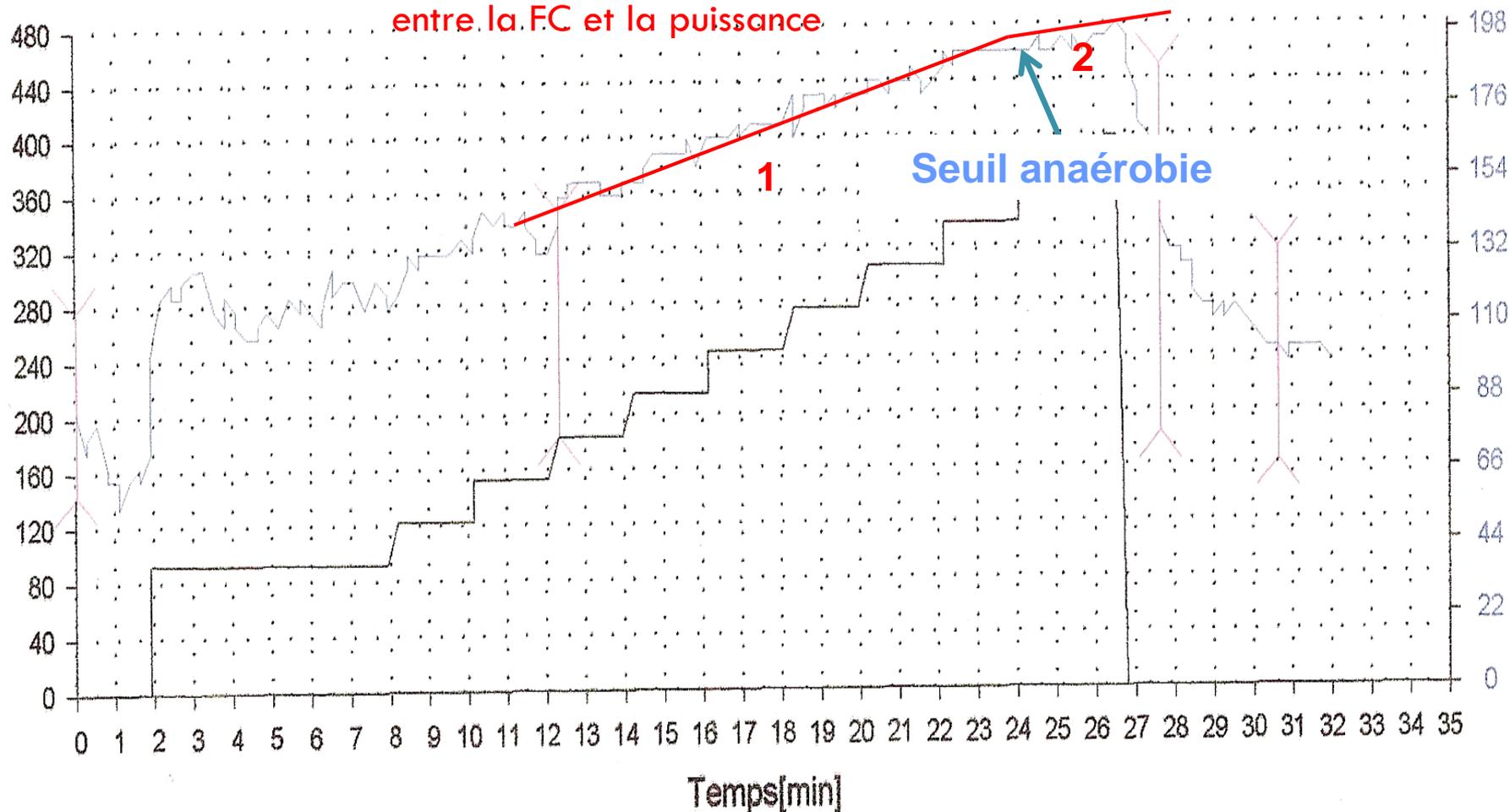


Figure 17. Mesure de l'évolution la fréquence cardiaque selon la puissance de l'exercice : le point d'inflexion (ici environ 188 bpm pour 320W) correspond au seuil anaérobie

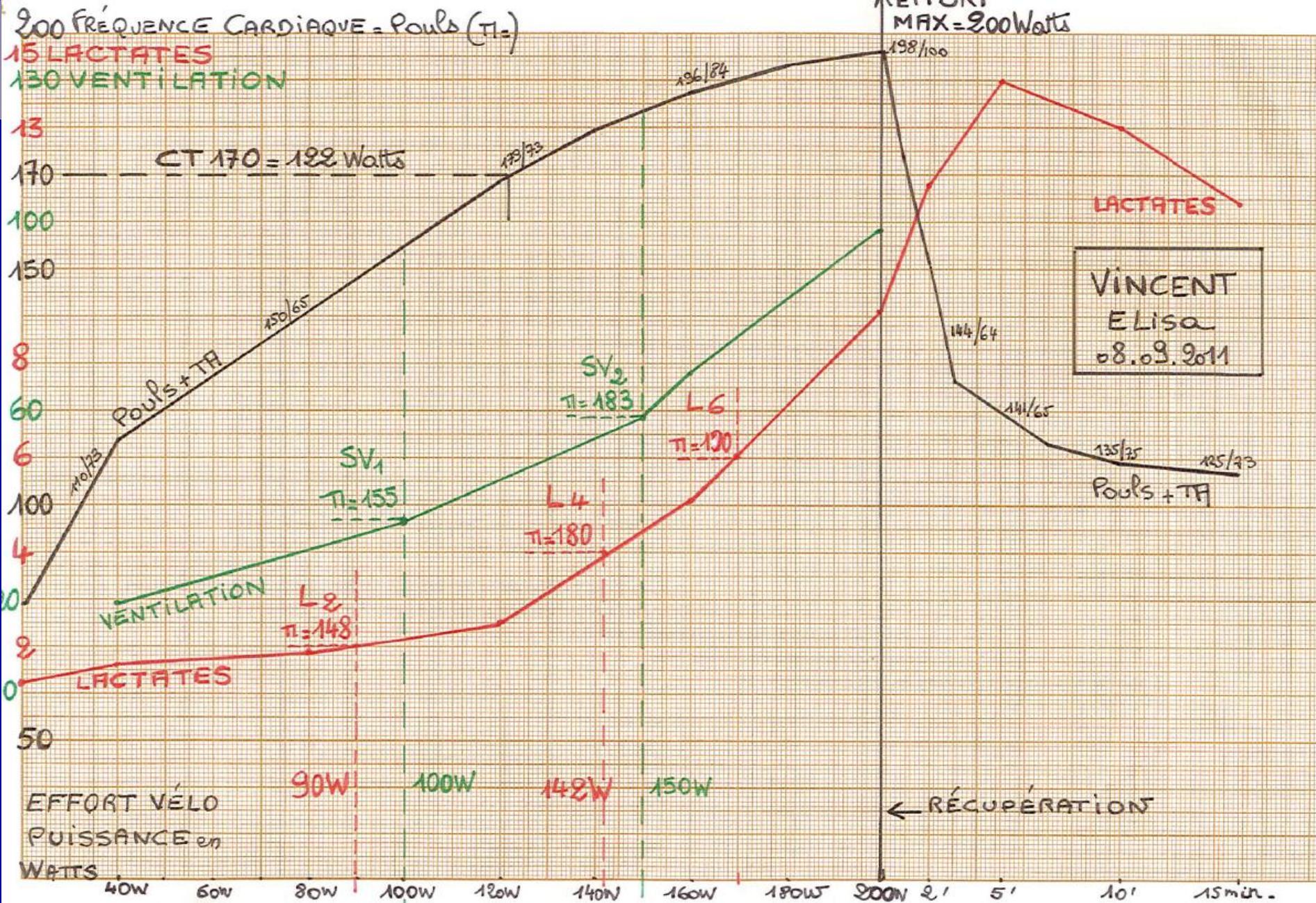


Figure 18. Point d'inflexion ici vers 150W et 184 bpm.

II. L'endurance aérobie

2.3.3 La mesure de l'évolution de la fréquence cardiaque (FC) : le test de Conconi

« Cette méthode très populaire car ne nécessitant que la mesure de la fréquence cardiaque pose quelques problèmes :

- 1. Le point de déflexion n'existe pas chez tout le monde ;***
- 2. Quand il existe, des imprécisions sur le point de déflexion de l'ordre de 5% peuvent donner des différences de 1 km.h⁻¹ sur des allures d'entraînement au seuil ;*
- 3. La concordance entre l'apparition de ce seuil de déflexion et le seuil lactique n'est pas systématique » (Guillaume Millet, 2005).*

II. L'endurance aérobie

2.3.3 La mesure de l'évolution de la fréquence cardiaque (FC) : le test de Conconi

Protocole et déroulement du test :

- Une piste de 400 mètres étalonnée par des plots tous les 20 mètres.
- Une bande sonore préenregistrée avec un matériel de sonorisation.
- Un cardiofréquencemètre qui enregistre la FC toutes les 5 secondes (ou moins).
- Un échauffement de 15 à 20 minutes.
- L'allure augmente tous les 200 mètres = le coureur augmente sa vitesse de 0,5 km/h par paliers de 200 mètres (à partir de 8 km/h).
- L'athlète respecte l'allure imposée par la bande sonore jusqu'à ce qu'il ne puisse plus suivre.

II. L'endurance aérobie

2.3.3 La mesure de l'évolution de la fréquence cardiaque (FC) : le test de Conconi

Le test de Conconi permet d'obtenir les résultats suivants :

1. Pour les données recueillies au dernier parler :
 - **La FC max.**
 - **La VMA → donc estimation de VO_2 max.**
2. Pour les données recueillies au point de déviation de la FC (s'il existe) :
 - **La FC au seuil anaérobie.**
 - **La vitesse au seuil anaérobie.**

II. L'endurance aérobie

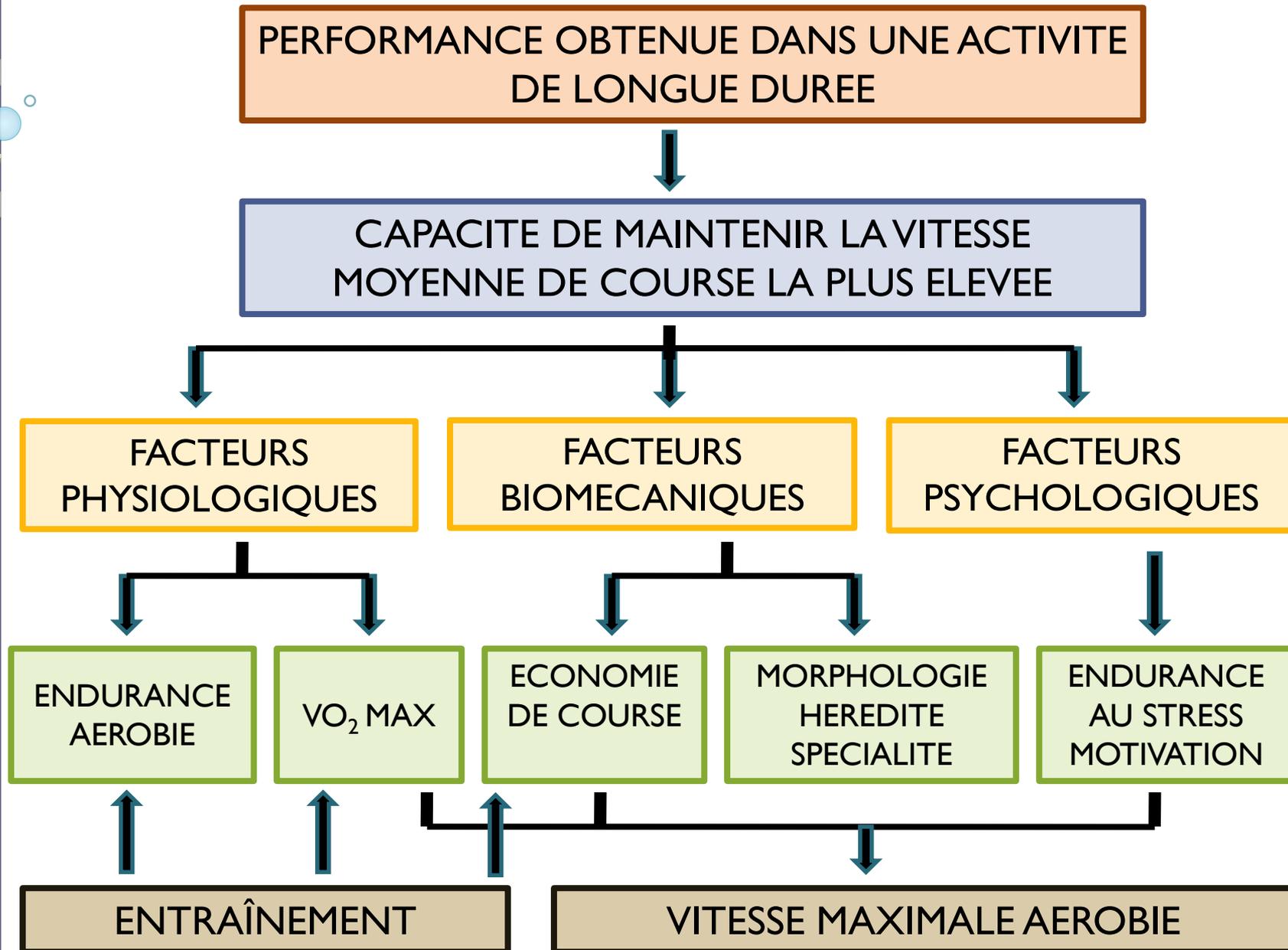
2.3.4 Vérification de la valeur estimée du seuil anaérobie

Il est possible de vérifier la valeur de FC (+ la vitesse ou la puissance) correspondant au seuil anaérobie par une épreuve rectangulaire de 20 min.

Si le sujet ne peut maintenir cette intensité d'exercice pendant 20', c'est que le seuil a été surévalué. S'il peut aller plus vite, c'est que le seuil a été sous-évalué.

Mais fiabilité de cette « vérification » que pour des sportifs entraînés car nécessité de savoir gérer une allure + grande motivation.

Conclusion



Conclusion

- Ainsi, Di Prampero, Atchou, Brückner & Moia (1986) modélisent la performance en course de longue durée à partir du $\dot{V}O_2 \text{ max}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), de la fraction du $\dot{V}O_2 \text{ max}$ 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 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ soutenu lors de la course, soit en augmentant le $\dot{V}O_2 \text{ max}$, soit en diminuant le coût énergétique de la course ou par toute combinaison de ces trois paramètres