

Journée Nationale des Cadres Techniques de Cyclisme

UFR STAPS BESANCON - Samedi 19 Novembre 2005



Fréquence cardiaque et entraînement en cyclisme

Pierre-Marie LEPRETRE, Benoît CLOAREC, Véronique L. BILLAT



Laboratoire d'Etude de la Physiologie de l'Exercice, EA-3872, département STAPS,
3bis impasse Christophe Colomb, Université d'Evry - Val d'Essonne, 91000, Evry, France.



Introduction

Objectifs

Hypothèses

Résultats

Applications

Conclusions



La consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}):

« quantité maximale d'oxygène captée par l'organisme au cours d'un exercice épuisant d'intensité croissante »

(Hill et Lupton, 1923)

La consommation d'oxygène (VO_2) :

- L'indice de la performance aérobique le plus étudié en laboratoire et sur le terrain;

- VO_{2max} = indice de la capacité aérobique humaine

VO_{2max} élevé \Rightarrow chance de performance importante

MAIS

Un indice onéreux à mesurer sur le terrain





La fréquence cardiaque (FC) comme mesure indirecte de la VO_2 ?

Introduction

Le principe de Fick:

Objectifs

$$VO_2 = \underbrace{Q_c}_{\text{Volume de sang éjecté par le cœur par minute}} \times \underbrace{a-vO_2\text{diff}}_{\text{Capacité du muscle à utiliser l'oxygène apporté par le sang}}$$

Hypothèses

Résultats

Applications

$$Q_c = \underbrace{VES}_{\text{Volume de sang éjecté par le cœur à chaque contraction, (force du cœur)}} \times \underbrace{FC}_{\text{Vitesse de contraction}}$$

Conclusions





La fréquence cardiaque (FC) comme mesure indirecte de la VO_2 ?

Introduction

$I > 60-65\%$ de VO_{2max} :

Objectifs

Plateau de VES = Force de contraction maximale
(Astrand et coll. 1967)

Hypothèses

Etat stable d'a- vO_2 diff = capacité d'extraction
maximale (Chuang et coll. 2000)

Résultats

⇒ Travail de VES et a- vO_2 diff en sorties longues?

Applications

⇒ Adaptation aérobie à l'effort visible à travers la
relation FC - Puissance

Conclusions

Problème: relation non linéaire (Brooke et coll. 1972)





Une interprétation métabolique de ce point de déflexion dans la relation FC – Puissance?

Introduction

Rupture de la linéarité de la relation VO_2 – Intensité à partir du seuil lactique (Zoldaz et coll. 1998).

Objectifs

Une relation significative entre: (Conconi et coll. 1982)

Hypothèses

- L'apparition du point de rupture dans la relation FC - Puissance (HRDP);
- L'identification du seuil lactique.

Résultats

Applications

Une extrapolation de la puissance au seuil lactique à partir de HRDP critiquée car protocole dépendante. (Jeunkendrup et coll. 1997, Jones et coll. 1995)

Conclusions



Comment expliquez l'apparition ou non du HRDP?





Une cause cardiovasculaire de ce point de déflexion de la fréquence cardiaque?

Introduction

Chez le sportif très entraîné:

Objectifs

Atteinte de VESmax à des intensités élevées
(Gledhill et coll. 1994)

Hypothèses

Peu de détection de HRDP (Jones et coll. 1995)

Résultats

MAIS

Applications

Une relation entre les adaptations cardiaques et le HRDP lorsqu'il est détecté

Conclusions

⇒HRPD =

un indice de la réponse de VES à prendre en compte dans le paramétrage de l'entraînement?





Une cause cardiovasculaire de ce point de déflexion de la fréquence cardiaque?

Introduction

Au niveau expérimental, 2 propriétés cardiaques:

Objectifs

La Relation Frank-Starling ou Tension - longueur
(composante inotropique)

Hypothèses

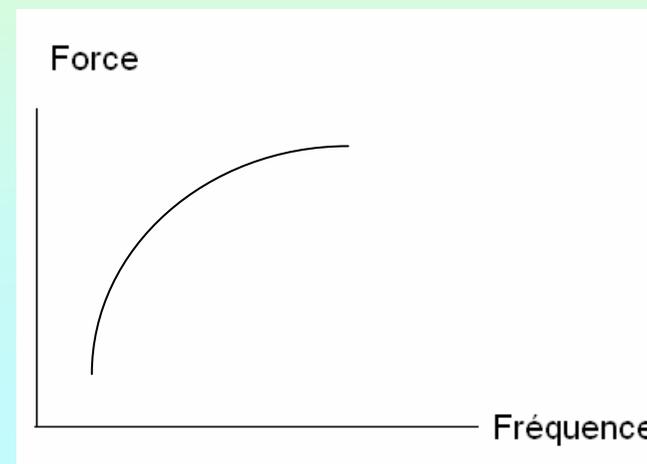
L'effet Treppe ou relation Force – Vitesse

Résultats

(composante chronotropique) (Alpert et coll. 1998)

Applications

Conclusions





Introduction

Objectifs

Déterminer si , au cours d'un exercice exhaustif d'intensité croissante:

Hypothèses

1) le point de rupture dans la relation FC – Puissance (HRDP) apparaît chez les sujets très entraînés;

Résultats

2) HRDP est associé à l'atteinte de VESmax;

Applications

3) Si l'intensité de l'exercice a un effet sur les réponses de VES.

Conclusions





Hypothèses 1 & 2

Introduction

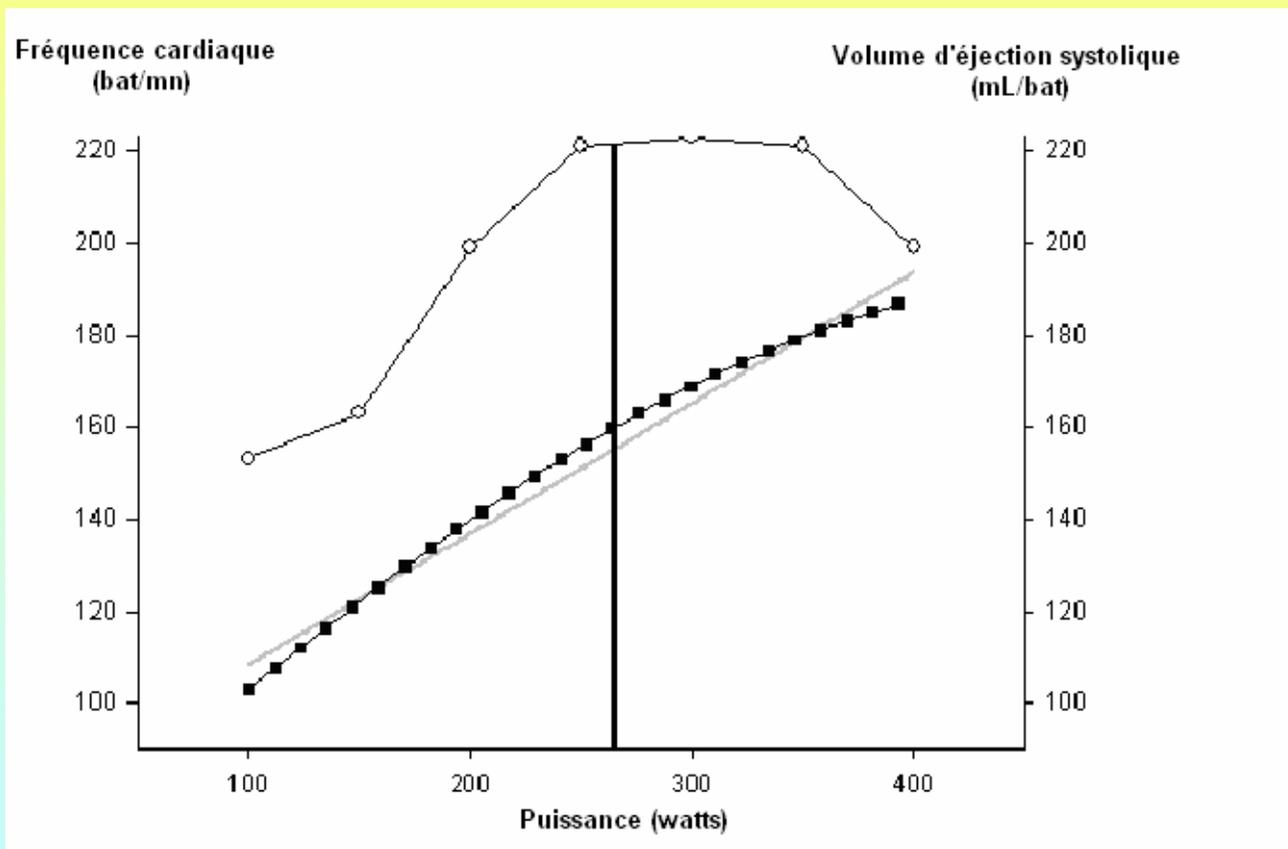
Objectifs

Hypothèses

Résultats

Applications

Conclusions





Population

↳ Sujets: 11 cyclistes et 11 triathlètes très entraînés

Introduction

Objectifs

Hypothèses

Résultats

Applications

Conclusions



Sujets (n = 22)	Age (années)	Masse (kg)	Stature (cm)	Masse grasse (%)
Moyenne ± DS	30 ± 7	71 ± 6	180 ± 7	11,8 ± 3,3





Introduction

Objectifs

Hypothèses

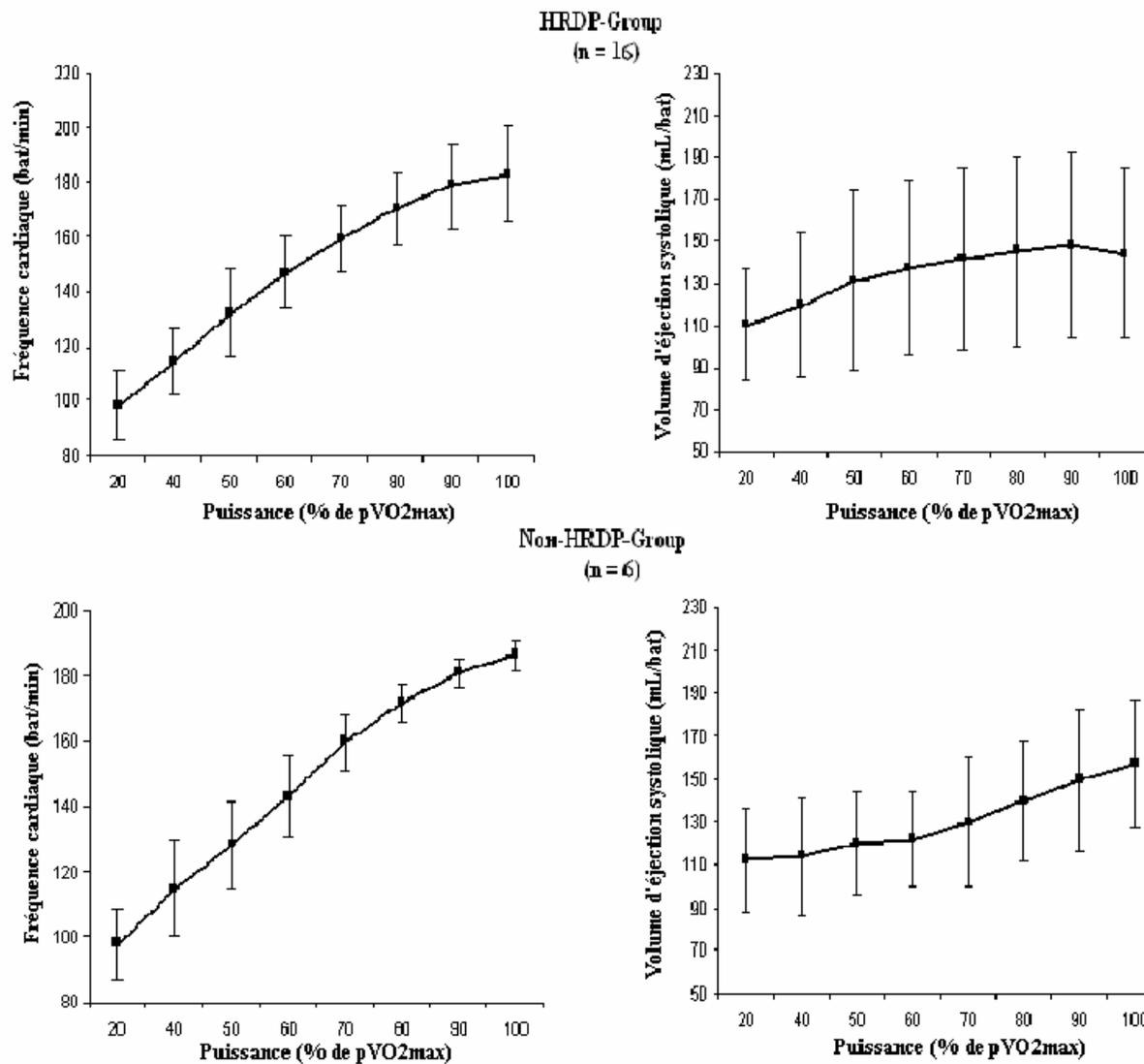
Résultats

Applications

Conclusions



Résultats





Résultats

Introduction

Objectifs

Hypothèses

Résultats

Applications

Conclusions

Sujets
(n=22)

HRDP
(n=16)

Non-HRDP
(n=6)

Age (années)

31 ± 7

30 ± 8

Taille (cm)

178 ± 7

181 ± 8

Masse (kg)

70 ± 6

73 ± 5

% de masse
grasse

$11,9 \pm 3,6$

$11,6 \pm 2,9$





Résultats

	Sujets (n=22)	HRDP (n=16)	Non-HRDP (n=6)
Introduction			
	VO_{2max} (mL.min ⁻¹)	5116 ± 554	5091 ± 562
Objectifs			
	FC (bat.min ⁻¹)	183 ± 10	191 ± 6
Hypothèses			
	VES (mL.bat ⁻¹)	153 ± 44	158 ± 31
	pVO _{2max} (watts)	383 ± 66	402 ± 59
Résultats			
	pSL (watts)	^a 289 ± 57 (75,1±6,7% pVO _{2max})	^a 313 ± 42 (78,2±3,4% pVO _{2max})
Applications			
	pVESmax (watts)	^{ab} 300 ± 67 (78,0±9,3% pVO _{2max})	^{*ab} 381 ± 75 (94,4±8,6% pVO _{2max})
Conclusions			
	pHRDP (watts)	^{ab} 300 ± 52 (78,3±7,0% pVO _{2max})	

*différence significative entre les groupes HRDP et Non-HRDP

^a différence significative avec pVO_{2max}

^b différence significative avec pSL





Résultats

Une relation significative entre pVESmax - pHRDP

Introduction

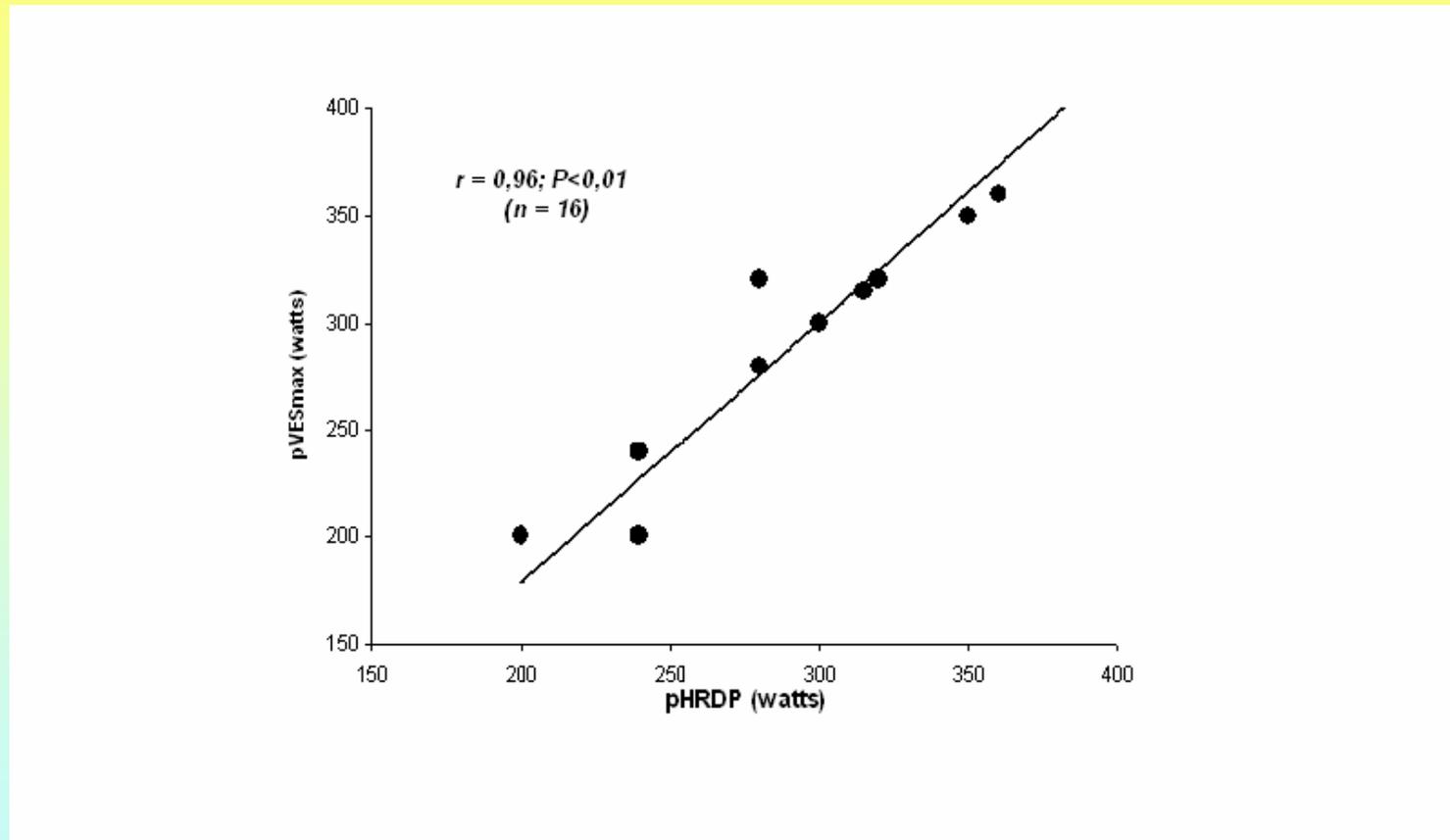
Objectifs

Hypothèses

Résultats

Applications

Conclusions



$R = 0,96 (P < 0,01; n = 16)$





Hypothèse 3

Introduction

↳ Lors d'un exercice épuisant à $pVO_{2max} > pVESmax$:

Objectifs

Sollicitation des valeurs maximales de VES .

Hypothèses

MAIS

↳ Lors d'un exercice épuisant à $p\Delta 50 < pVESmax$
MAIS $> pSeuil$ donc sollicitant VO_{2max}

Résultats

Des adaptations périphériques permettant de solliciter
 VO_{2max} sans les valeurs maximales de VES.

Applications

Conclusions

⇒ Des adaptations centrales et périphériques durée et intensité dépendantes afin de solliciter les valeurs maximales de VO_2 ?





Population

↳ Sujets: 9 triathlètes très entraînés

Introduction

Objectifs

Hypothèses

Résultats

Applications

Conclusions



Sujets (n = 9)	Age (années)	Masse (kg)	Stature (cm)	Masse grasse (%)
Moyenne ± DS	33 ± 7	71 ± 4	176 ± 4	11,4 ± 2,4





Résultats

	Sujets (n=11)	Test incrémenté	tlim100	tlimΔ50
Introduction				
Objectifs	Temps d'exercice (secondes)	1240 ± 153	*312 ± 145	<i>ab</i> 726 ± 195
Hypothèses	Puissance (watts)	344 ± 37 (100% pVO _{2max})	344 ± 37 (100% pVO _{2max})	<i>ab</i> 303 ± 38 (88,1 ± 11,1% pVO _{2max})
Résultats	pVESmax (watts)	<i>*a</i> 307 ± 18 (89,2 ± 5,2% pVO _{2max})		
Applications	VO ₂ (mL.min ⁻¹)	4277 ± 433	4211 ± 463	3950 ± 410
	FC (bat.min ⁻¹)	181 ± 15	185 ± 14	183 ± 15
	VES (mL.bat ⁻¹)	179 ± 34	173 ± 31	<i>a</i> 163 ± 31
Conclusions	Qc (L.min ⁻¹)	32,4 ± 5,5	31,7 ± 5,0	<i>a</i> 30,2 ± 4,4



*différence significative entre Test incrémenté et tlim100
a différence significative entre Test incrémenté et tlimΔ50
b différence significative entre tlim100 et tlimΔ50





Conclusions préliminaires

- Introduction Atteinte de VO_{2max} quelque soit la durée et l'intensité,
MAIS
- Objectifs Un temps de fatigue d'autant plus long que l'intensité est faible;
- Hypothèses
- Résultats Des adaptations différentes en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice pour atteindre les valeurs maximales de VO_2 :
- Applications
- Exercice long : adaptations périphériques;
 - Exercice court et maximal: adaptations centrales.
- Conclusions
- ⇒ Orienter les phases d'entraînement en fonction des effets recherchés?





Introduction

↳ Les effets d'un entraînement aérobie bien conduit:

Objectifs

✓ Une amélioration du débit cardiaque responsable d'une augmentation de $35 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ de $\text{VO}_{2\text{max}}$.
(Roca et coll. 1992)

Hypothèses

Résultats

✓ Un gain spécifique aux intensités de travail.
(Billat et coll. 2004, Pedersen et Jorgensen 1978, Ziemba et coll. 2003)

Applications

↳ HRDP = travail de la force de contraction du cœur?

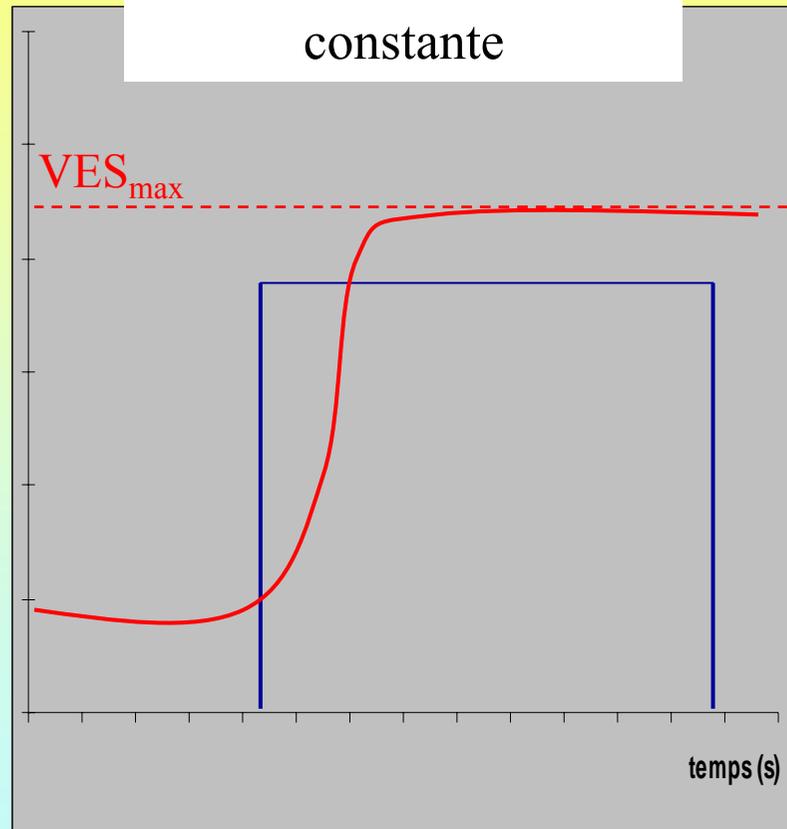
Conclusions

⇒ Un travail à HRDP ⇒ amélioration de $\text{VO}_{2\text{max}}$?

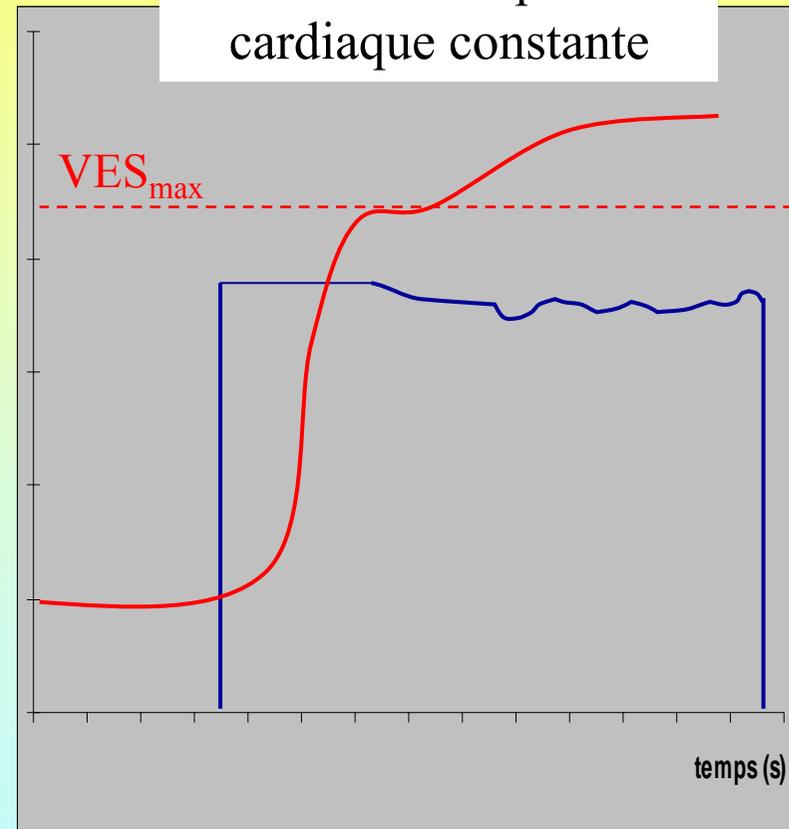


Hypothèse

Travail à Puissance
constante



Travail à Fréquence
cardiaque constante





Population

↳ Sujets: 9 triathlètes bien entraînés

Introduction

Objectifs

Hypothèses

Résultats

Applications

Conclusions



Sujets (n = 9)	Age (années)	Masse (kg)	Stature (cm)	Masse grasse (%)
Moyenne ± DS	15 ± 1	60 ± 15	170 ± 12	14,1 ± 5,0





Résultats

	Sujets (n=9)	Test incrémenté	tlimpVES _{max}	tlimFC@VES _{max}
Introduction	<hr/>			
	Temps			
Objectifs	d'exercice (secondes)	-	610 ± 401	1264 ± 800
	Puissance	255 ± 63	239 ± 62	<i>ab</i> 213 ± 70
Hypothèses	(watts)	(100%)	(93,7 ± 24,3%)	(83,5 ± 27,5%)
	VO ₂ (mL.min ⁻¹)	2829 ± 215	2970 ± 502	2748 ± 430
Résultats	FC (bat.min ⁻¹)	197 ± 6	196 ± 7	<i>ab</i> 192 ± 9
	VES (mL.bat ⁻¹)	106 ± 44	102 ± 40	<i>b</i> 112 ± 46
Applications	Qc (L.min ⁻¹)	20,5 ± 8,6	19,8 ± 7,6	21,3 ± 8,6
	a-vO ₂ diff (mL.100mL ⁻¹)	13,8 ± 2,5	15,0 ± 6,6	12,9 ± 5,0



*différence significative entre Test incrémenté et tlimpVES_{max}
a différence significative entre Test incrémenté et tlimFC@VES_{max}
b différence significative entre tlimpVES_{max} et tlimFC@VES_{max}





Conclusions préliminaires

Introduction

Un exercice supra seuil lactique à état stable de FC induit:

Objectifs

- Un temps d'exercice plus long avec une diminution significative de la puissance soutenue;

Hypothèses

- Des valeurs maximales de $VES > VES_{max}$ mesurées au cours d'un test incrémenté de détermination du VO_{2max} .

Résultats

Applications

⇒ HRDP = Une fréquence cardiaque optimale permettant l'amélioration de la force du cœur après 8 semaines d'entraînement à cette intensité?

Conclusions





Résultats

Introduction

Sujets
(n=8)

Pré entraînement

Post entraînement

Objectifs

Hypothèses

Age (années)

14,8 ± 1,0

15,1 ± 1,6

Résultats

Taille (cm)

164 ± 6

164 ± 7

Applications

Masse (kg)

50,4 ± 8,9

50,9 ± 8,4

Conclusions

% de masse
grasse

14,1 ± 5,0

14,1 ± 5,0

*différence significative entre Pré et Post entraînement





Résultats

Introduction	Sujets (n=8)	Pré entraînement	Post entraînement
Objectifs	VO ₂ (mL.min ⁻¹)	2753 ± 365	2902 ± 314
Hypothèses	FC (bat.min ⁻¹)	196 ± 11	200 ± 12
Résultats	VES (mL.bat ⁻¹)	95 ± 32	*121 ± 33
Applications	Qc (L.min ⁻¹)	18,6 ± 6,2	*23,4 ± 5,7
Conclusions	FC@VESmax (bat.min ⁻¹)	195 ± 12	197 ± 10
	a-vO ₂ diff _{max} (mL.100mL ⁻¹)	14,8 ± 5,9	12,4 ± 5,5

*différence significative entre Pré et Post entraînement





Résultats

Introduction

Objectifs

Hypothèses

Résultats

Applications

Conclusions

Sujets
(n=8)

Pré entraînement

Post entraînement

pVO_{2max} (watts)

220 ± 43

229 ± 52

pVESmax (watts)
(% de pVO_{2max})

^a201 ± 56
(90,7 ± 14,2)

220 ± 57
(95,8 ± 6,0)

pLT (watts)
(% de pVO_{2max})

^a170 ± 35
(77,2 ± 6,3)

^a182 ± 45
(78,9 ± 4,3)



* différence significative entre Pré et Post entraînement
^a différence significative entre pVO_{2max} et les autres puissances





Introduction

↳ Il existe une puissance \neq du seuil lactique pour laquelle VES atteint sa valeur maximale ($pVES_{max}$).

Objectifs

Hypothèses

↳ Au cours d'un exercice épuisant d'intensité croissante, $pVES_{max}$ peut être extrapolée à partir de l'identification du point de déflexion de la fréquence cardiaque (HRDP).

Résultats

Applications

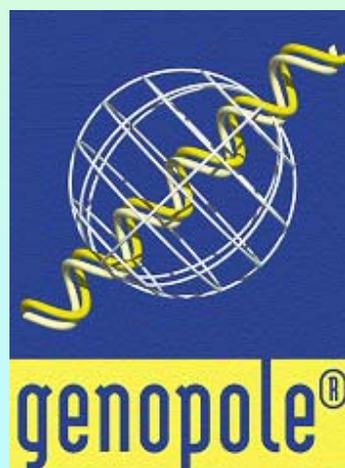
↳ Le seul travail à $FC@VES_{max}$ ne suffit pas pour améliorer VO_{2max} et sa puissance associée.

Conclusions





Merci de votre attention!
Rendez-vous sur le www.billat.net



Introduction Objectif **Méthodes**

Identifier les facteurs responsables de la réponse de $\dot{V}O_2$ lors d'exercice épuisant et d'intensité sévère



Méthodes de mesure du VES et de $\dot{V}O_2$

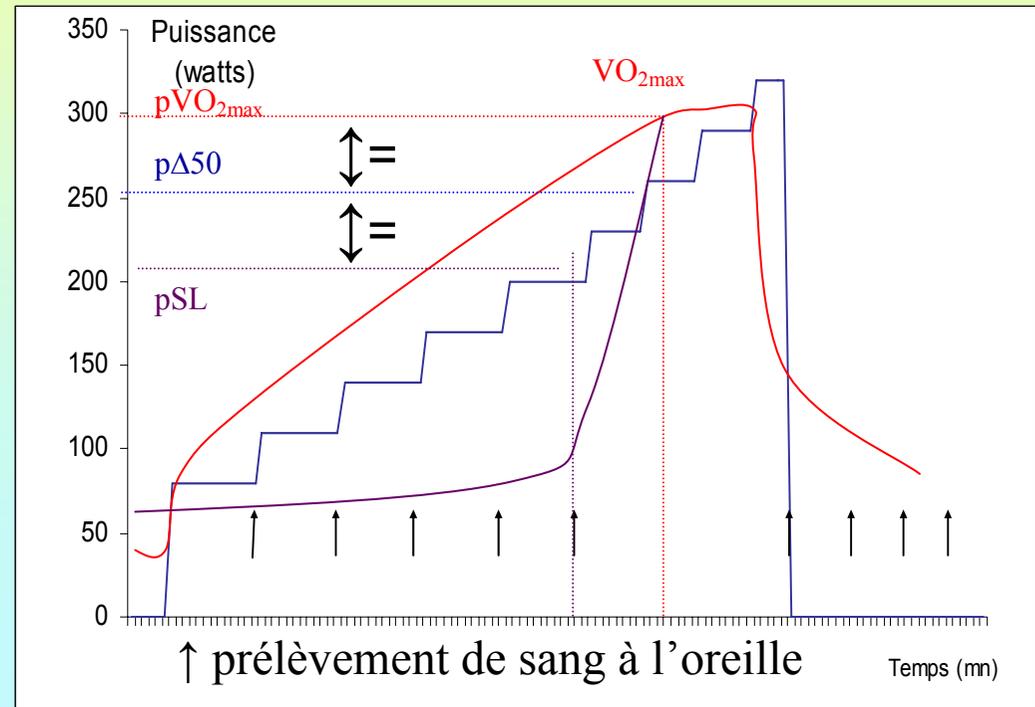


Introduction Objectif Méthodes

↳ Protocole

- ✓ En position droite, sur un ergomètre à cycle
(**ERGOLINE 900, Hellige, USA**)
- ✓ Un test d'intensité croissante de détermination de:

- VO_{2max} et pVO_{2max} ;
- SL et pSL;
- $p\Delta 50$ = la puissance à mi-chemin entre pVO_{2max} et pSL;
- VES_{max} et $pVES_{max}$.



↳ Critères d'atteinte de:

✓ $VO_{2\max}$ (Taylor et coll. 1955):

- ✦ 2 valeurs (15-s) successives $< 150 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;
- ✦ 1 quotient respiratoire (RER) ≥ 1.1 ;
- ✦ 1 concentration en lactates sanguins $\geq 8 \text{ mM}$;
- ✦ $FC_{\max} \geq 90 \%$ de FC_{\max} théorique ($220 - \text{âge}$).

✓ Seuil lactique

(Aunola et coll. 1986):

- ✦ Début de l'accélération de l'accumulation des lactates dans le sang $\sim 4 \text{ mM}$.

✓ FC_{\max} , VES_{\max}

(Neto et coll. 2003):

- ✦ Erreur de mesure = différence de 20 % entre 2 valeurs successives.



↳ Enregistrements des variables physiologiques

- ✓ VO_2 , VCO_2 et V_E : mesures en cycle à cycle
(K4b², Cosmed, Italie).
- ✓ FC: mesures battement par battement
(S810i, Polar, Finlande).
- ✓ VES par mesures des variations électriques de l'impédance thoracique à chaque battement cardiaque
(Physioflow PF05L1, Manatec, France).
- ✓ Concentration en lactates sanguins ([La])
(Lactate Pro LT, Arkay Inc, Japan).
- ✓ Saturation du sang artériel en O_2 (SaO_2) à partir du pouls d' O_2
(Ohmeda 3800, Data-Ohmeda, USA).



Analyseur portatif des échanges gazeux **Cosmed K4b²**

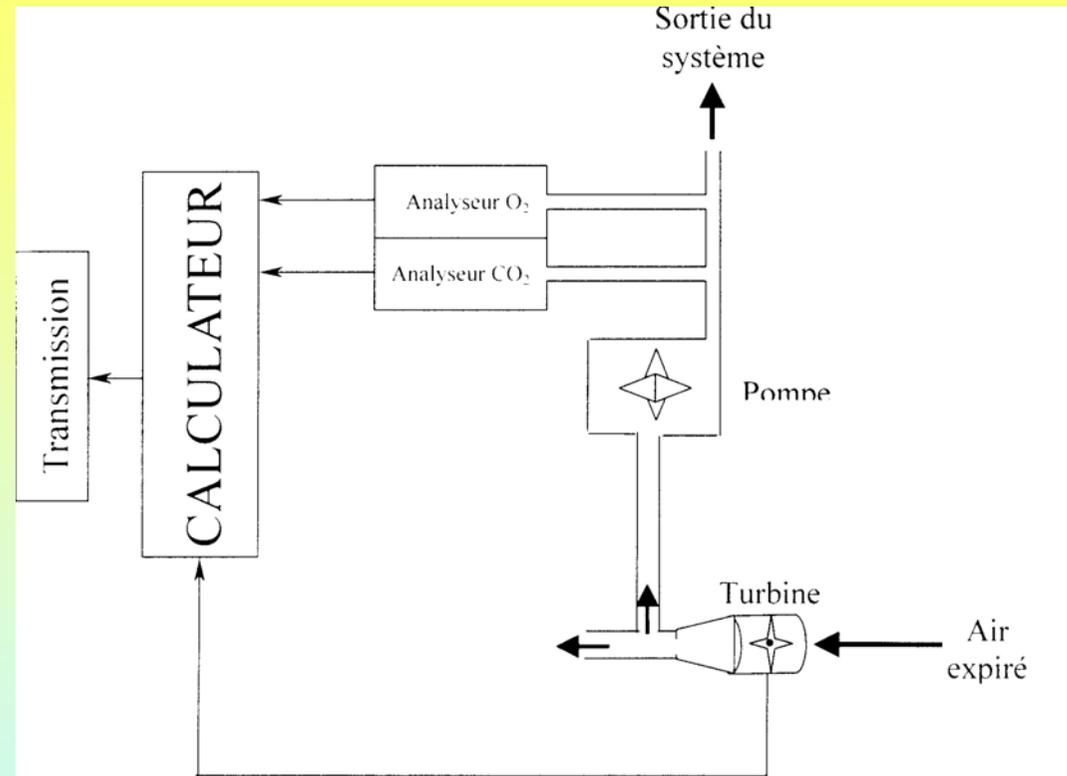


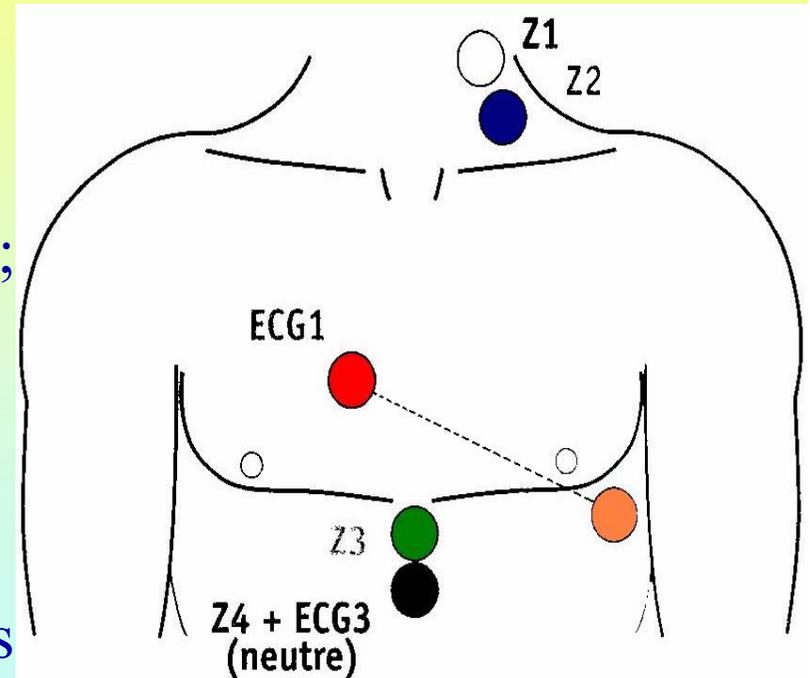
Figure 2.1 : Schématisation du système d'analyse cycle à cycle.



$$\dot{V}O_2 = (\dot{V}_E \times \frac{100 - (F_E O_2 + F_E CO_2)}{100 - (F_I O_2 + F_I CO_2)} \times F_I O_2) - (\dot{V}_E \times F_E O_2)$$

↳ Principe de la cardiographie par impédance électrothoracique (Kucibek et coll. 1974)

- ✓ Application d'un courant alternatif de haute fréquence
- ✓ Entre 2 couples d'électrodes (1 émettrice, 1 réceptrice):
 - Au niveau de l'appendice xiphoïde;
 - Au niveau de la fosse claviculaire.
- ✓ Objectif: mesurer la longueur électrique du thorax (L, i.e la distance entre les 2 pools



⇒ mesures de l'impédance basale (Z_0, Ω) et ses variations ($\Delta Z, \Omega$)

↳ Equation de Sramek-Bernstein (Bernstein D. 1986)

✓ Le thorax comme un volume conique caractérisé par:

➤ Une perfusion sanguine homogène
⇒ **impédance moyenne de repos (Z_0, Ω)**

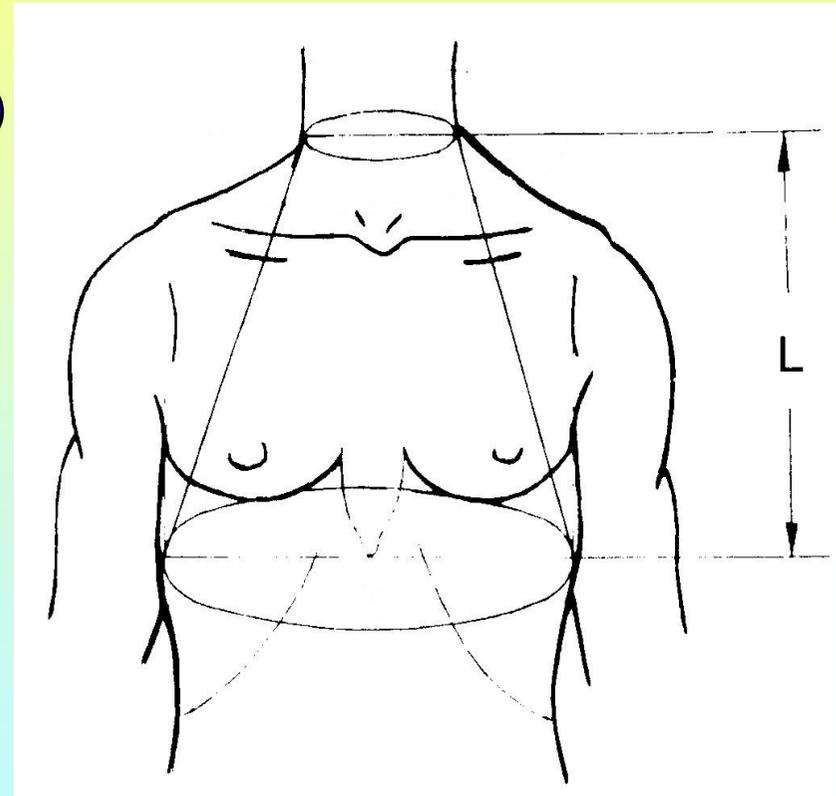
➤ Une longueur électrique:
 $L = 0.17 \times \text{hauteur du sujet}$

➤ Une circonférence:
 $C = 2\pi r \approx 3L$

➤ Une résistance électrique
proportionnelle aux dimensions
du modèle (Circonférence et longueur)



⇒ **Volume du tissu non neutre électriquement (VEPT)**



Impédancemètre électro-thoracique **Physioflow PF05L1**

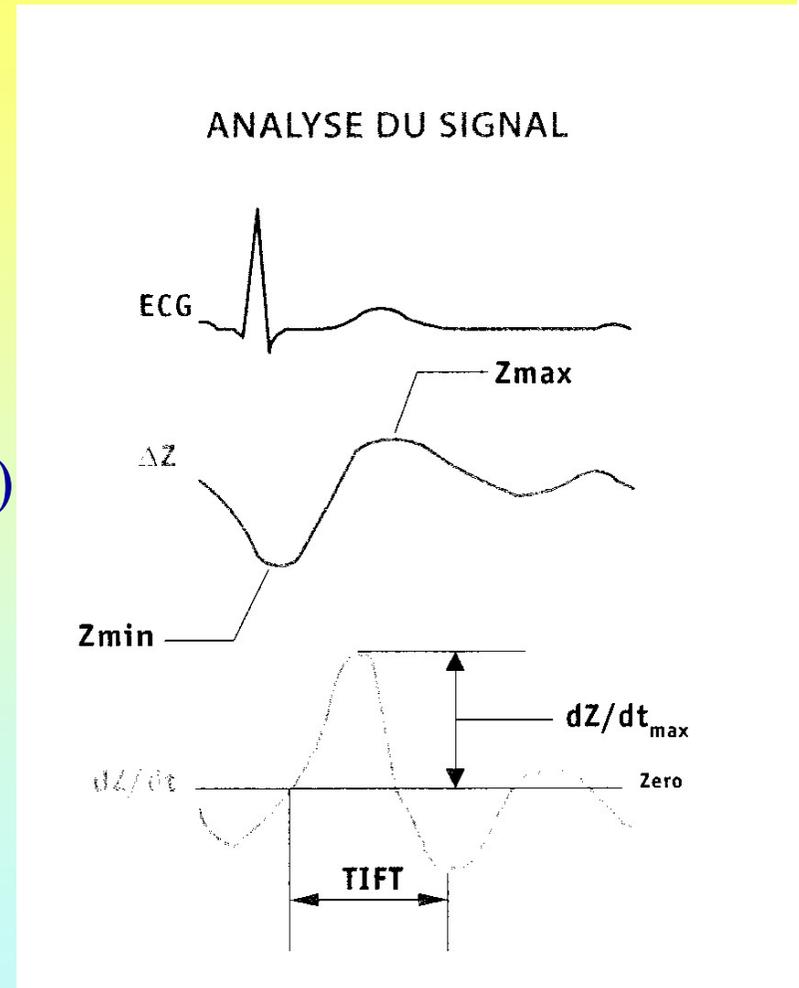
- Variations pulsatiles du flux sanguin au niveau du thorax
⇒ **variation négative de l'impédance (ΔZ)**
- Calcul de la dérivée première par rapport au temps de la variation maximale du signal d'impédance (dZ/dt)
- Mesure de la durée d'inversion du flux sanguin thoracique (TFIT)
(i.e temps d'éjection du ventricule gauche)
- Calcul du volume d'éjection systolique:

$$VES = VEPT \times [(dZ/dt) / \Delta Z] \times TFIT$$

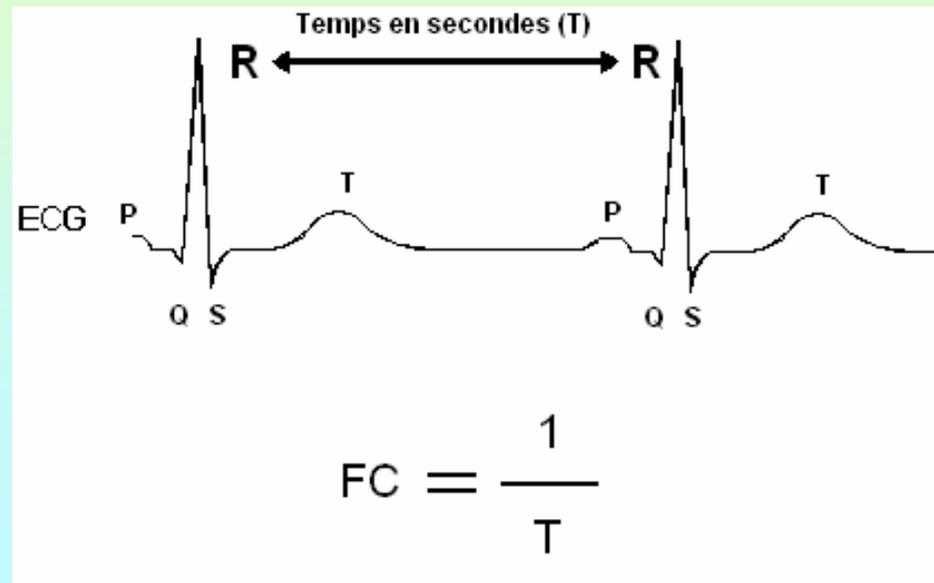


↳ **Mesure du débit cardiaque**

$$Q_c = FC \times VES$$



Cardiofréquencemètre « beat-to-beat » **Polar S810i**



Analyseur portatif des lactates sanguins **Lactate Pro LT**

