



Physiologie à l'effort et exploration

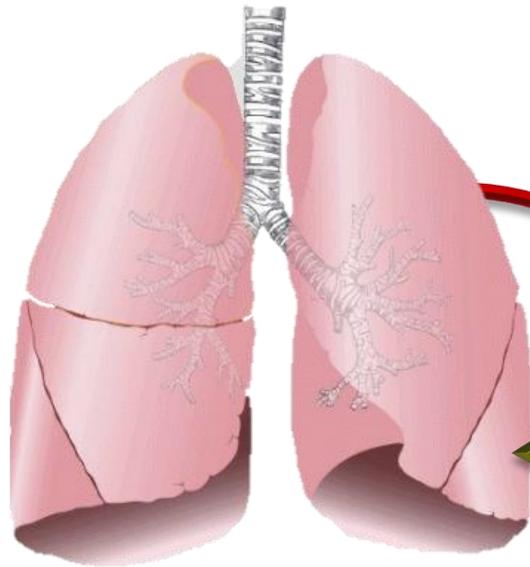
Dr Amandine RAPIN
CHU de REIMS



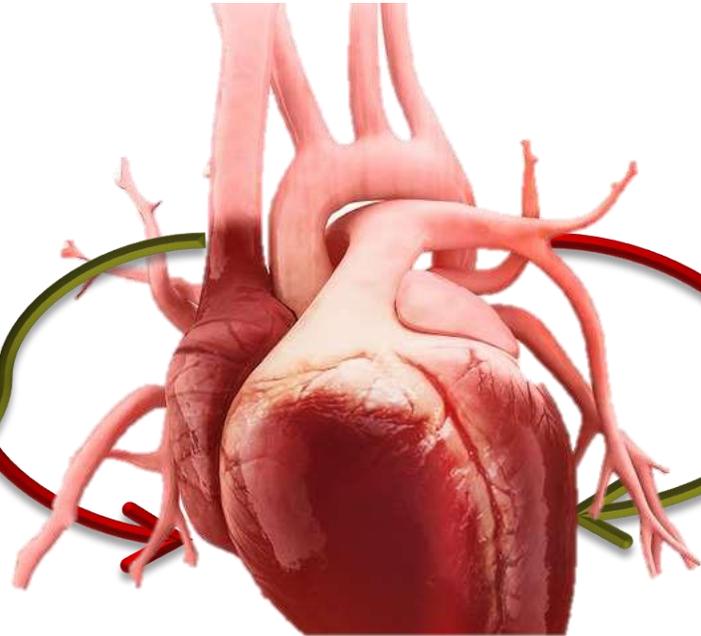
**Adaptation à
l'effort**

La question : D'où ça vient ?

Système respiratoire



Système
cardiovasculaire



Système musculaire et
énergétique



Système de transport de l'oxygène

Adaptation à l'exercice

- Puiser dans ses réserves



Énergétiques, métaboliques

Musculaires

Endocriniennes

Cardio-respiratoires

Neurologique

Ostéoligamentaires

Adaptation à l'exercice



- Puiser dans ses réserves

Énergétiques, métaboliques

Musculaires

Endocriniennes

Cardio-respiratoires

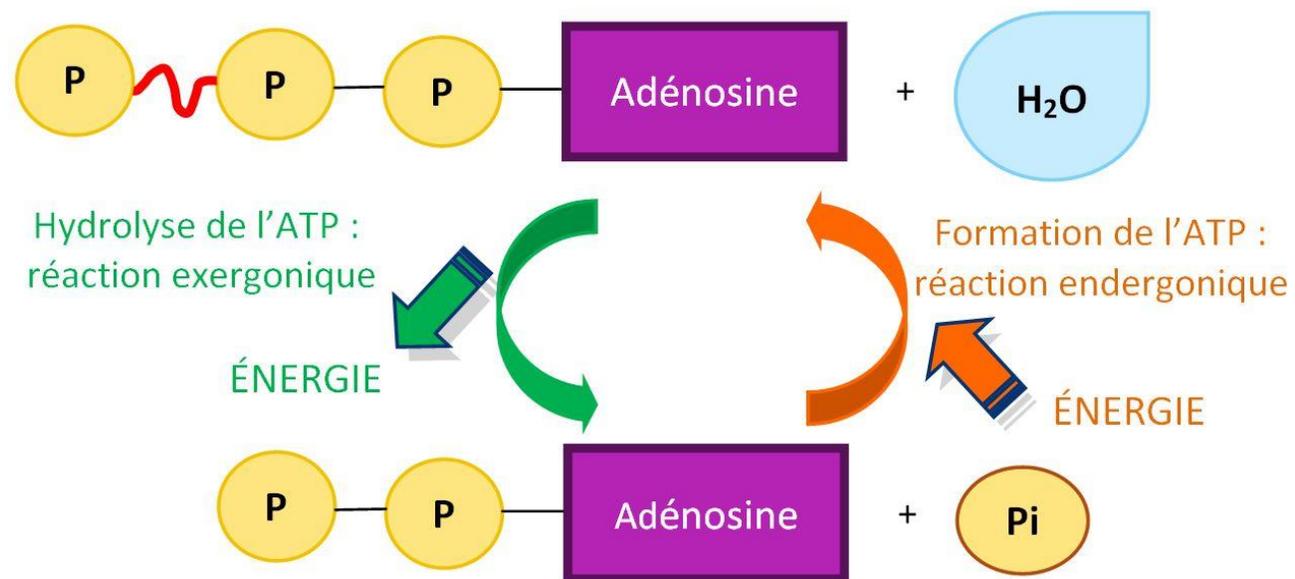
Neurologique

Ostéoligamentaires

Le carburant : l'ATP



- ATP



Substrats énergétiques



Glucides

Glycogène (foie et muscles)
Stocks fonction des apports alimentaire

4,1 kCal/g

Lipides

Efforts prolongés + peu intenses
Stock principal mais moins accessible
Débit énergétique faible

9,4 kCal/g

Protéines

Glucogénèse ou néoglucogénèse
5 à 10% d'énergie quand effort prolongé

4,1 kCal/g

Métabolismes

Anaérobie alactique

Sources → ATP -CP
Résidus → ADP
Oxygène → Non

Délais → Nul
Durée max → 7 à 15s
Durée de reconstitution → 2-5 min

Facteurs limitants
Stocks ATP et CP
Système enzymatique

Qualités
Intensité très élevée
en faible quantité
Vitesse d'exécution

Anaérobie lactique

Sources → Glycogène - glucose
Résidus → Acide lactique
Oxygène → Peu

Délais → 5 à 30s
Durée max → 45s à 2 min
Durée de reconstitution → 1h – 48h

Facteurs limitants
Taux d'acide lactique
Système enzymatique

Qualités
Intensité très importante
en quantité moyenne
Résistance / Intensité



Aérobie

Sources → Glucides-Lipides
Résidus → Eau (sueur) – CO2
Oxygène → Oui

Délais → 2 à 3 min
Durée max → ...
Durée de reconstitution → 24 -36h

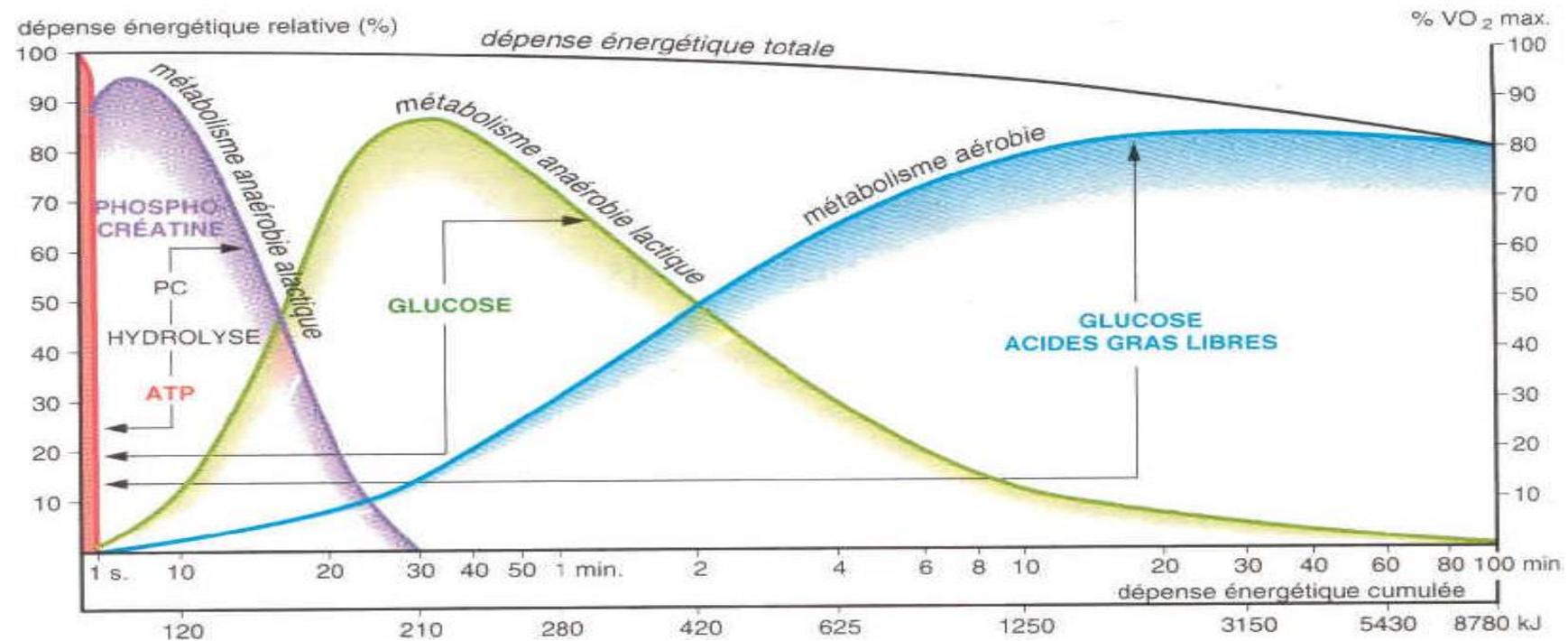
Facteurs limitants
VO2max
Stock de glycogène/substrats
Chaleur

Qualités
Intensité liée au VO2 max
en grande quantité
Endurance

Interaction des métabolismes



- Fonctionnement concomitant
- Jamais à 100%
- Toujours prédominance d'une voie sur les autres



Adaptation à l'exercice



- Puiser dans ses réserves

Énergétiques, métaboliques

Musculaires

Endocriniennes

Cardio-respiratoires

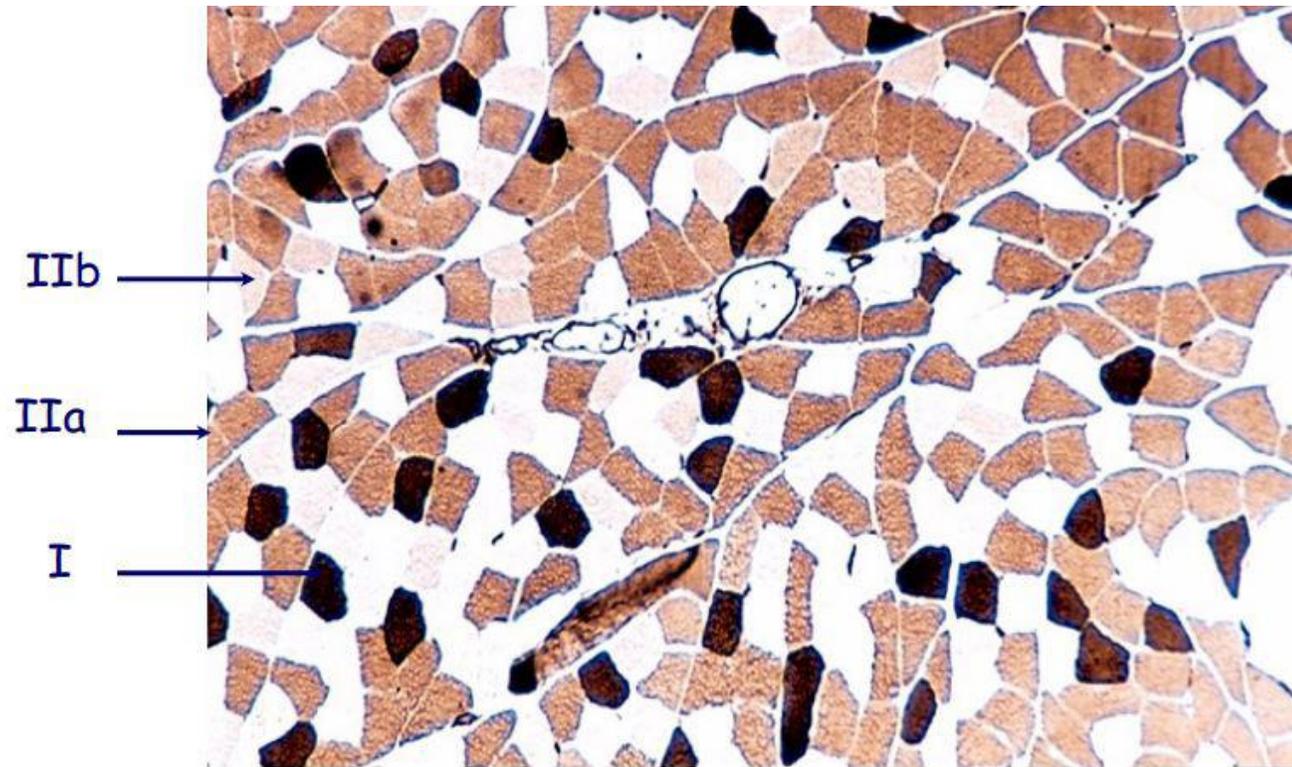
Neurologique

Ostéoligamentaires

Fibres musculaires



- I ou ST, IIa ou FTa, IIx ou FTb



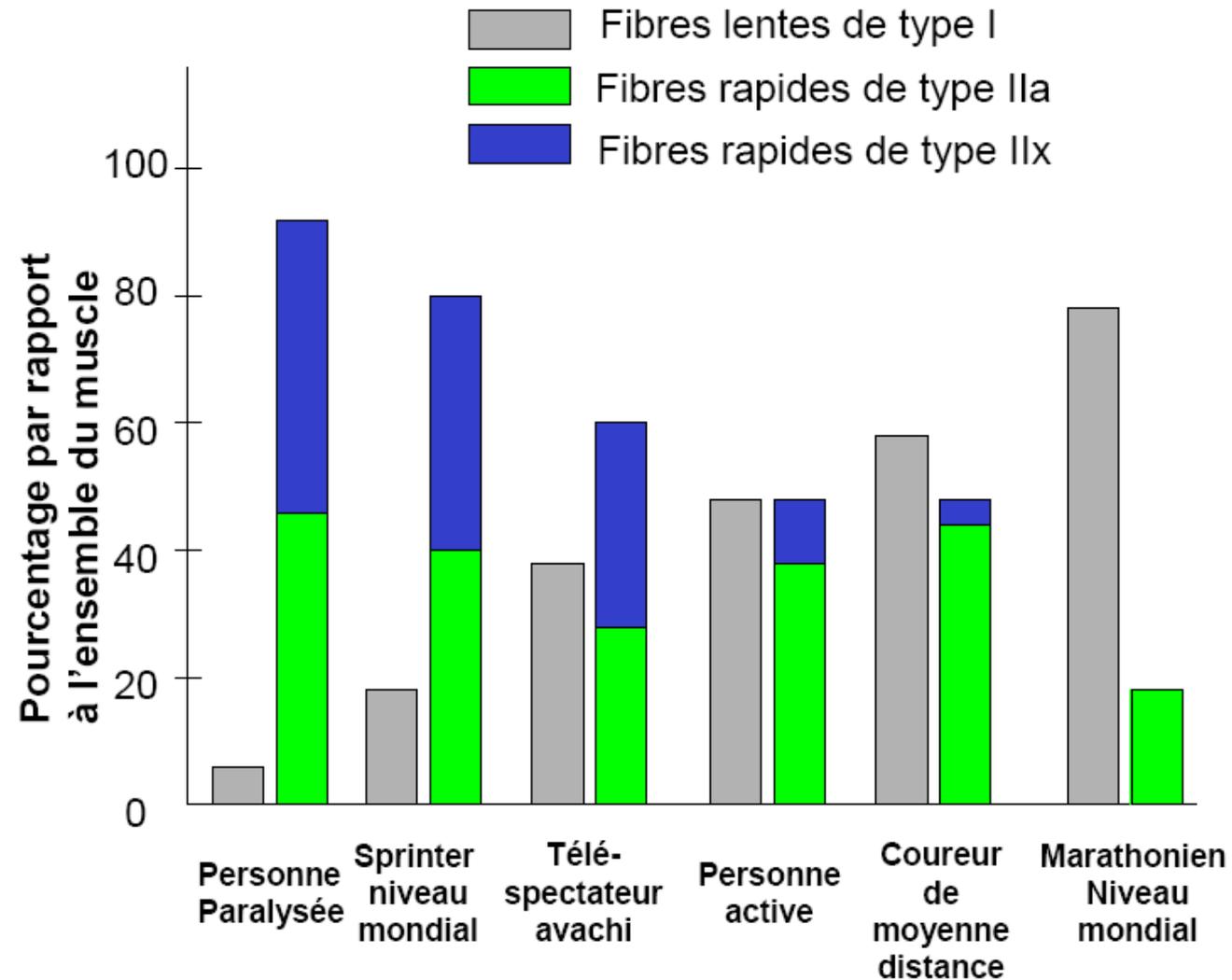
Fibres musculaires



Caractéristiques	Fibre type I	Fibre type IIa	Fibre type IIb
<i>Innervation</i> Q Fibre par MN	UM lente faible	UM intermédiaire Intermédiaire	UM rapide Importante
<i>Voie métabolique</i> Réserve glycogène Réserves triglycérides	Aérobie + +++	Mixte ++ ++	Anaérobie +++ +
<i>Vitesse de contraction</i> Force développée Fatigabilité	Lente + +	Moyenne ++ ++	Rapide +++ +++
<i>Activité</i>	Mixte		



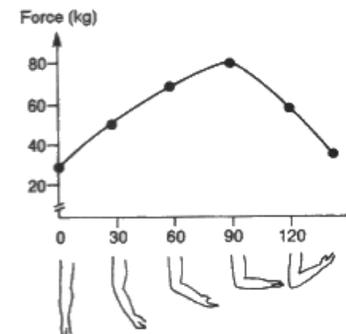
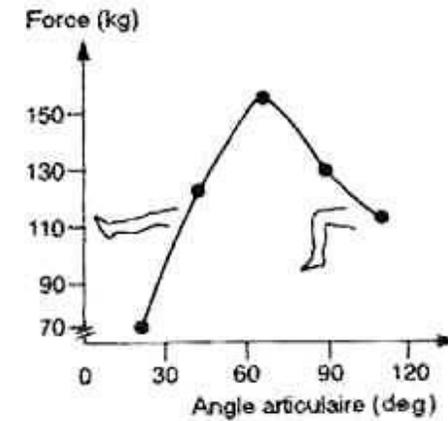
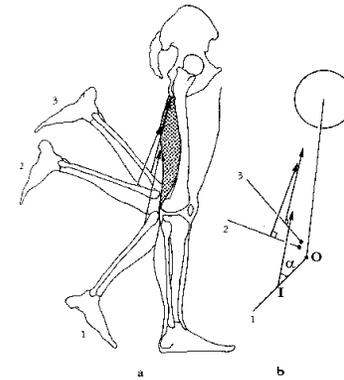
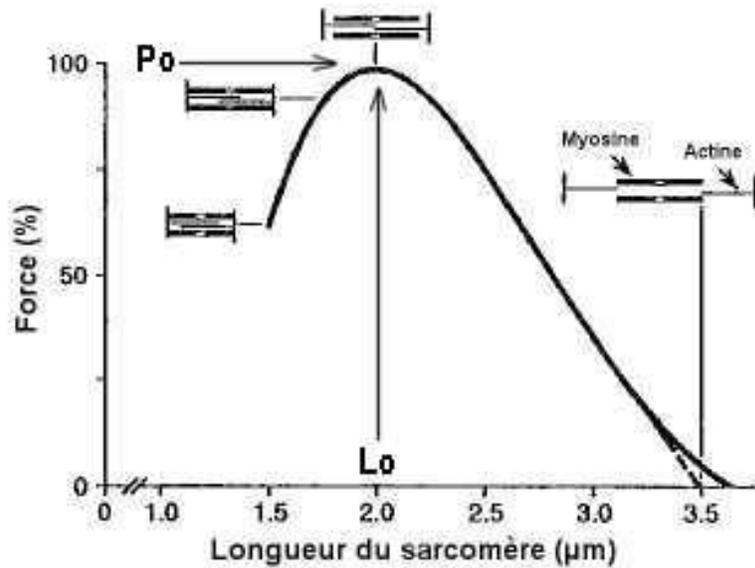
Fibres musculaires



Propriétés musculaires



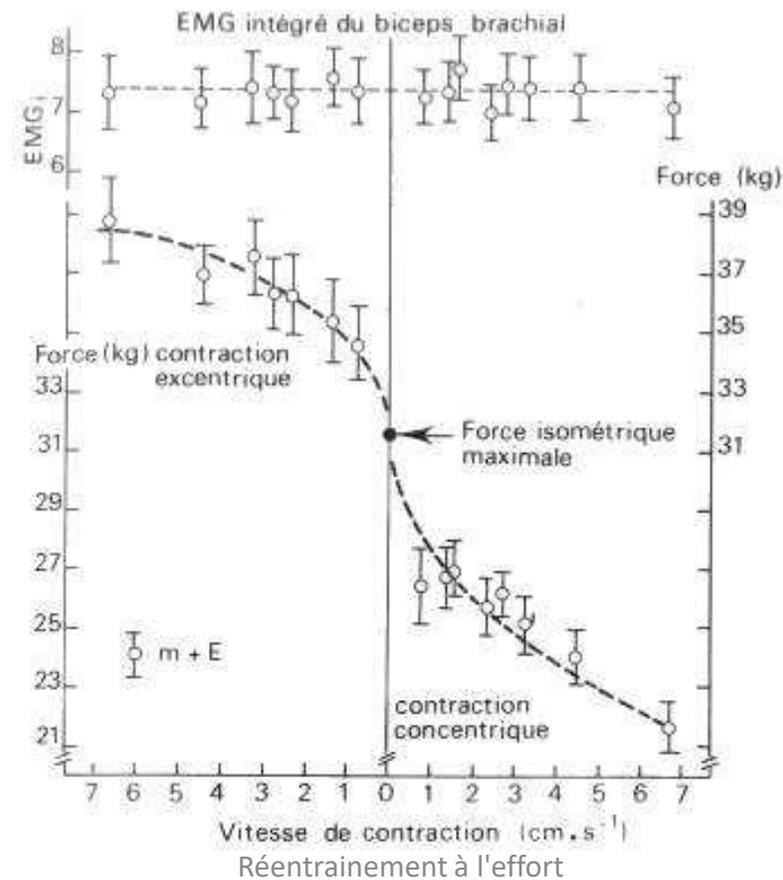
- Relation force/longueur



Propriétés musculaires



- Relation force-vitesse



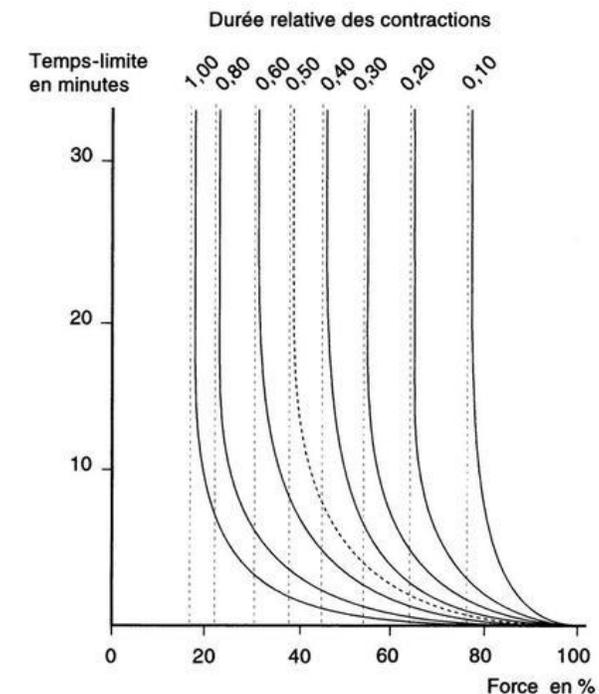
Propriétés musculaires



• Relation force-répétition

• Travail musculaire statique

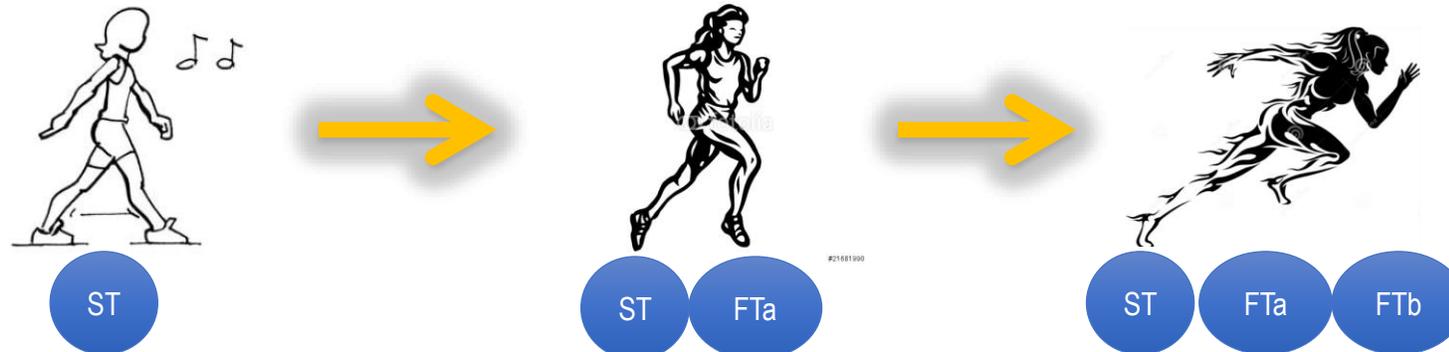
- Augmentation de intensité force/ diminution de la durée
- Temps limite (ischémie): propre à chaque force critique
 - Illimité si critique = 15-20% FMV
 - Autour de 1 min pour 50% de FMV
 - Plus long en intermittent qu'en continu
 - Activité intermittente avec
temps travail= temps repos
 - Critique = 40% FMV



Unités motrices et recrutement



- Fibre musculaire : Loi du tout ou rien
- Unité motrice
 - Loi du tout ou rien
 - Nombre fibre musculaire unité FT > unité ST
 - Principe d'ordre de recrutement
 - Fibre ST → fibre FTa → fibre FTb
 - Principe de taille



Plasticité musculaire



- Adaptation structurale
 - Loi de Howald



Fibres lentes
Myosine S,s

Fibres rapides
Myosine F,f

Effet de l'âge



- Différenciations dans les premières années de vie
 - Détermination génétique
 - Fonction du type de neurone
- Avec le vieillissement



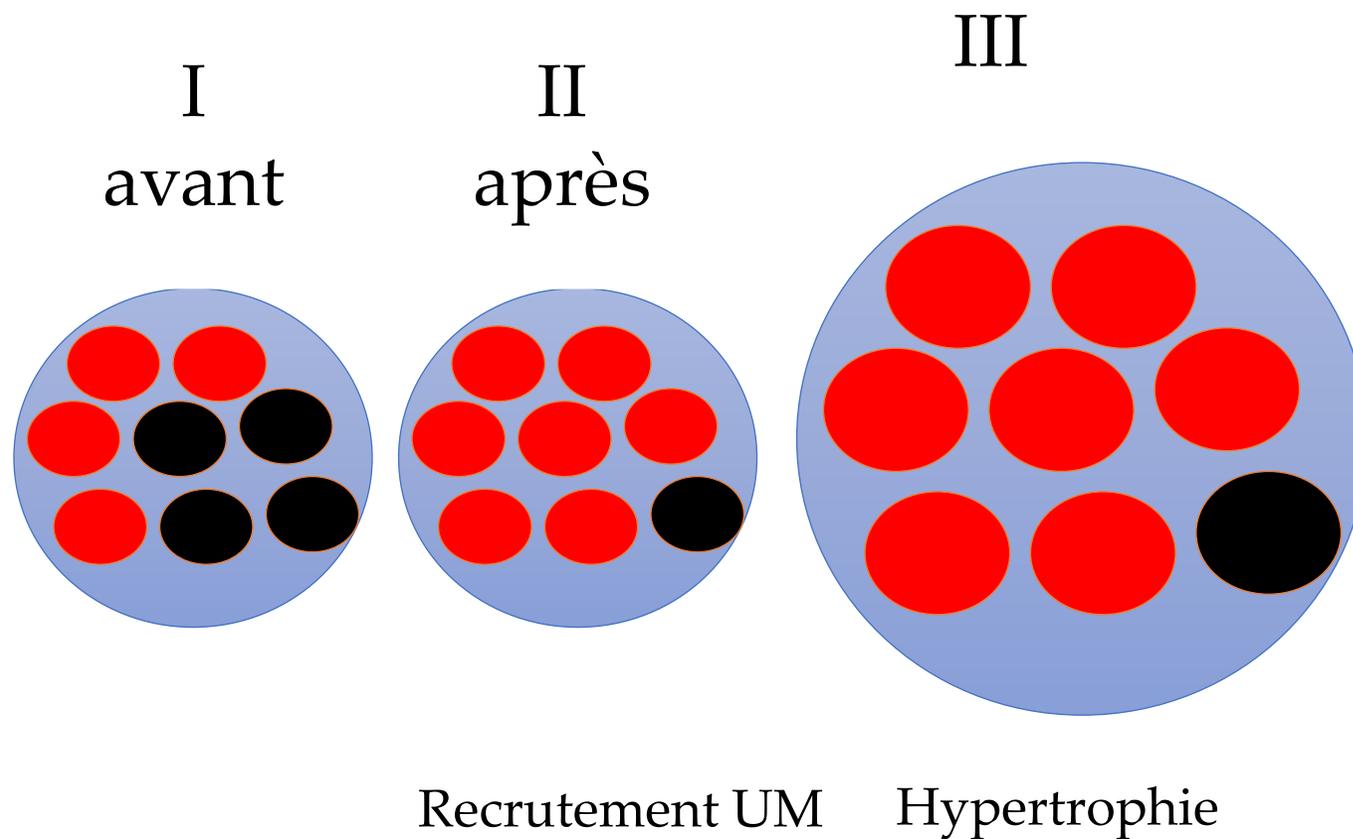
FT ↗ et ST ↘



Plasticité musculaire



- Facteurs neuronaux et recrutement des UM



Adaptation à l'exercice



- Puiser dans ses réserves

Énergétiques, métaboliques

Musculaires

Endocriniennes

Cardio-respiratoires

Neurologique

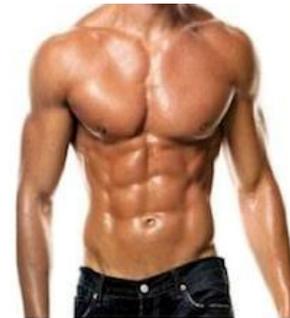
Ostéoligamentaires

Hormones



- Stéroïdes

- Corticosurrénales
- Ovaires/testicules
- Placenta



- Non stéroïdes

- Dérivées des acides aminés
 - Thyroïde, médullosurrénale
- Peptidiques/protéiques

Faciliter
l'utilisation du
glucose et des
acides gras

Régulation du métabolisme du glucose

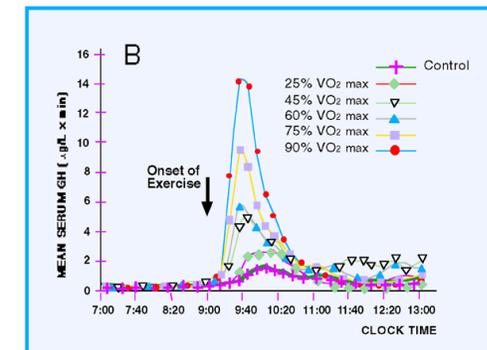
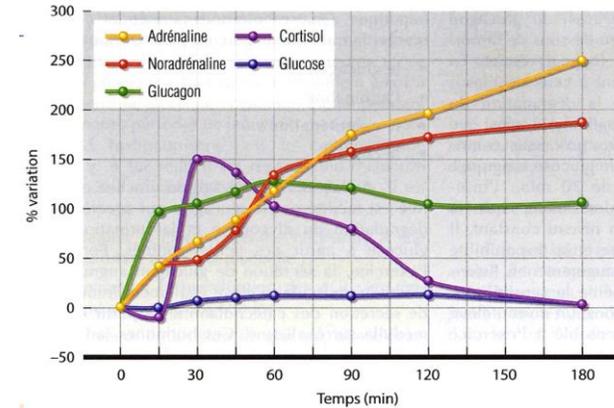


• Augmentation de la quantité de glucose plasmatique

- Glucagon
 - Adrénaline
 - Noradrénaline
- } ↗ glycogénèse
- Cortisol
- ↗ catabolisme protéique
- Hormone de croissance :
 - ↗ sortie acide gras libres
 - ↘ entrée du glucose dans la cellule

• Augmentation de la consommation

- Hormones thyroïdiennes ↗ catabolisme glucose et graisse
- Insuline ↗ entrée glucose dans la cellule



Régulation du métabolisme des AG



- Augmentation de la lipolyse
 - Insuline
 - Cortisol
 - Adrénaline/Noradrénaline
 - Hormone de croissance
- Augmenter la mobilité et l'utilisation des graisses
 - Cortisol
 - Hormones thyroïdienne

Régulation hydro-électrolytique



- Essentiel pour maintenir les fonctions cardio-vasculaire et thermique
- Glandes en causes
 - Lobe postérieur de l'hypophyse
 - ADH → diminution de la perte d'eau
 - Cortex surrénalien
 - Aldostérone → balance sodium/potassium
 - Reins
 - Érythropoïétine
 - Rénine

Adaptation à l'exercice



- Puiser dans ses réserves

Énergétiques, métaboliques

Musculaires

Endocriniennes

Cardio-respiratoires

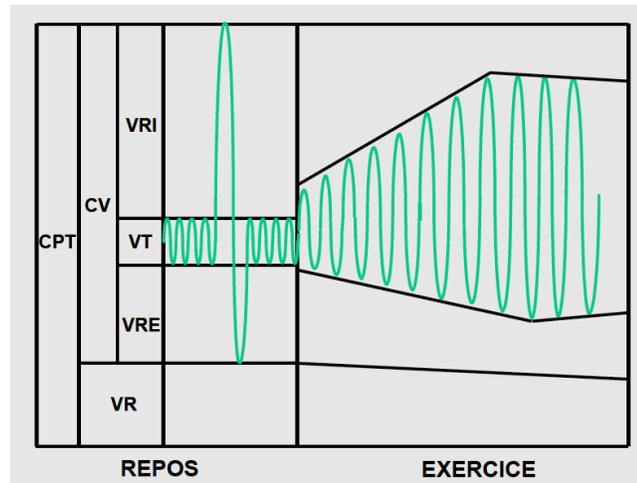
Neurologique

Ostéoligamentaires

Adaptation pulmonaire

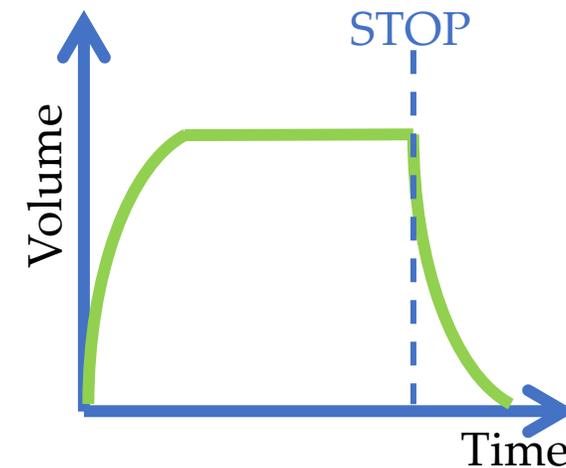
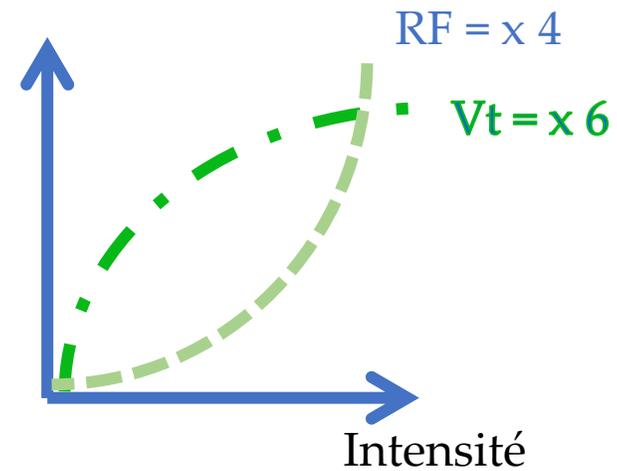


- Adaptation ventilatoire



↑ Volume courant
↑ Fréquence respiratoire

$V_{max} = 35 \text{ à } 40 \text{ VEMS}$



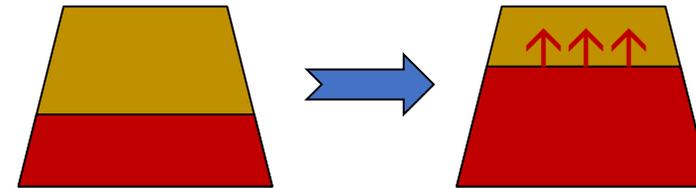
Adaptation pulmonaire



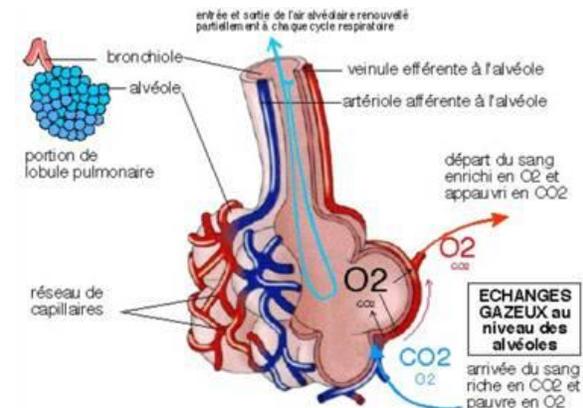
- Adaptation de la diffusion alvéolo-capillaire

- ↑ surface d'échange dans le capillaire
- ↑ recrutement des capillaires

- ↓ temps d'échange



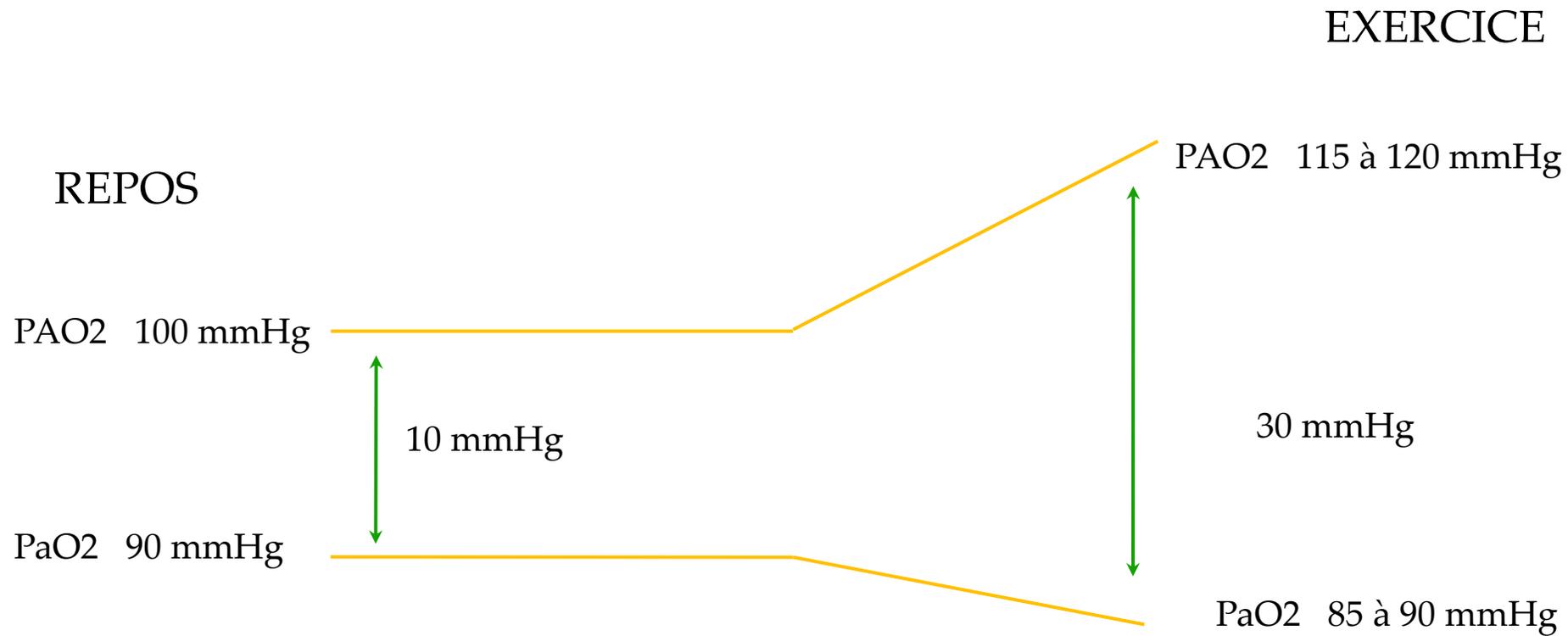
- ↑ des différences de pression
 - PAO2 100mmHg → 120mmHg
 - PvO2 40mmHg → 20mmHg
 - DAV O2 25% → 75-80%



Adaptation pulmonaire



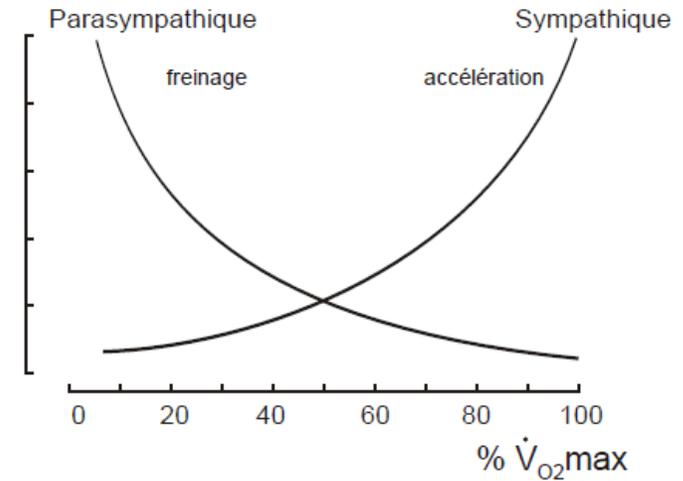
- Adaptation de la diffusion alvéolo-capillaire



Adaptation cardio-circulatoire



- ↑ Débit cardiaque = x 4 à 5
 - ↑ VES
 - ↑ FC
 - Jusque 50-60% VO₂Max = levé frein vagal
 - Ensuite action Σ et cathécolamine



- Equation de Fick

$$VO_2 = VES * FC * D(A-V)O_2$$

Adaptation cardio-vasculaire



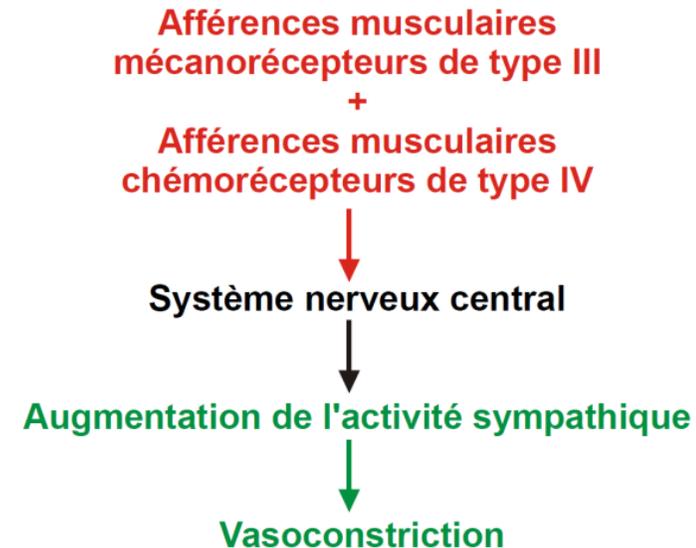
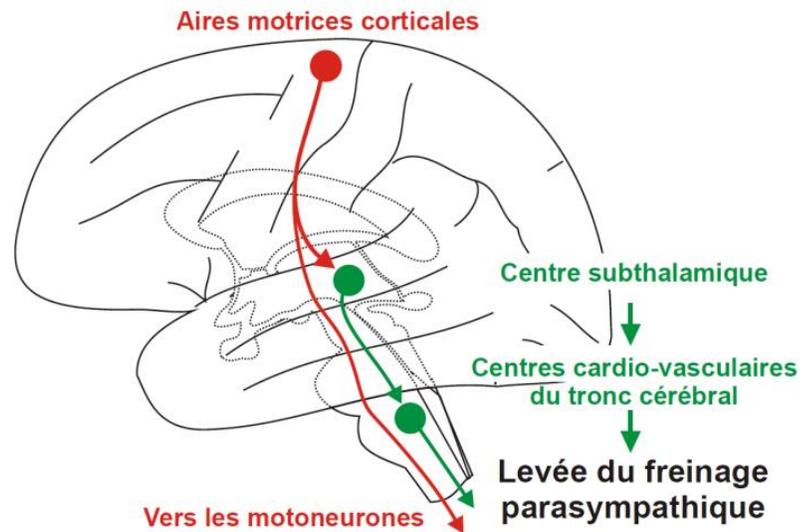
- Facteurs de variations du débit cardiaque
 - Exercice
 - Intensité, Type, Durée
 - Âge
 - Sexe
 - Entraînement
 - Position

	Repos		Exercice modéré		Exercice intense	
	Couché	Debout	Couché	Debout	Couché	Debout
Qc (l/min)	9,2	6,6	19,0	16,9	26,3	24,5
VES (ml)	141	103	163	149	164	155
Fc (batt/min)	65	64	115	112	160	159

Adaptation cardio-vasculaire



- ↑ Tension artérielle
 - ↑ Débit cardiaque
 - ↑ Résistances périphériques

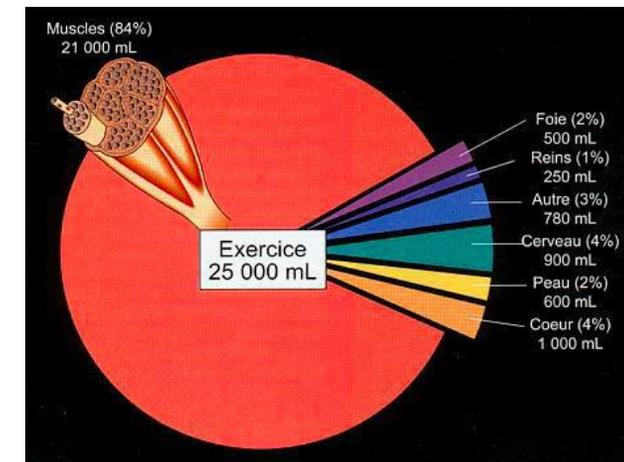
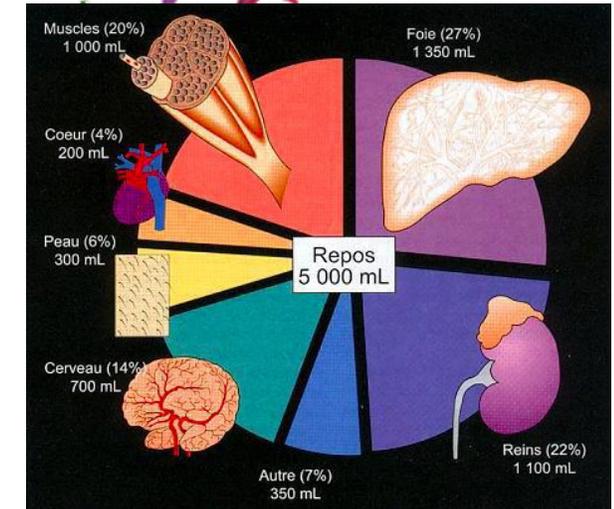


Adaptation cardio-vasculaire



• Répartition des volumes

- Mécanismes locaux, hormonaux, sympathiques
- Débit sanguin musculaire :
 - Repos 3,4ml/min/100g → 50-80ml/min/100g
- C(a-v)O₂
 - 4-5mlO₂/100ml → 12-16mlO₂/100ml



Effets de l'activité physique

Effet du réentraînement à l'effort

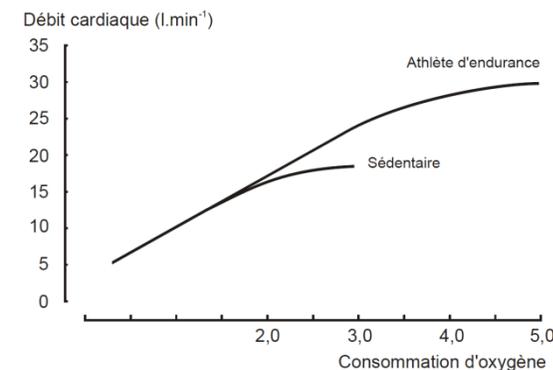


- Pulmonaire

- ↑ diffusion alvéolo-capillaire
- ↑ capacités respiratoires

- Cardiaque

- ↑ débit cardiaque : ↑ VES, ↓ FC
- Effets anti-arythmogène
- Anti-ischémique
- Anti-thrombotique



Effet du réentraînement à l'effort



- Vasculaire

- ↓ de la TA par ↓ résistances périphériques
- ↑ cellules endothéliales souches circulantes
- ↓ dysfonctionnement endothélial

- Musculaire

- ↑ perfusion musculaire
- ↑ force musculaire

Effet du réentraînement à l'effort



- **Métabolique**
 - ↑ endurance à l'effort
 - ↑ VO2Max ↑ seuil anaérobie
- **Hormonal**
 - ↓ insulino-résistance
 - Système rénine angiotensine : ↓ résistances périphériques
 - ↓ hyper-adrénergie

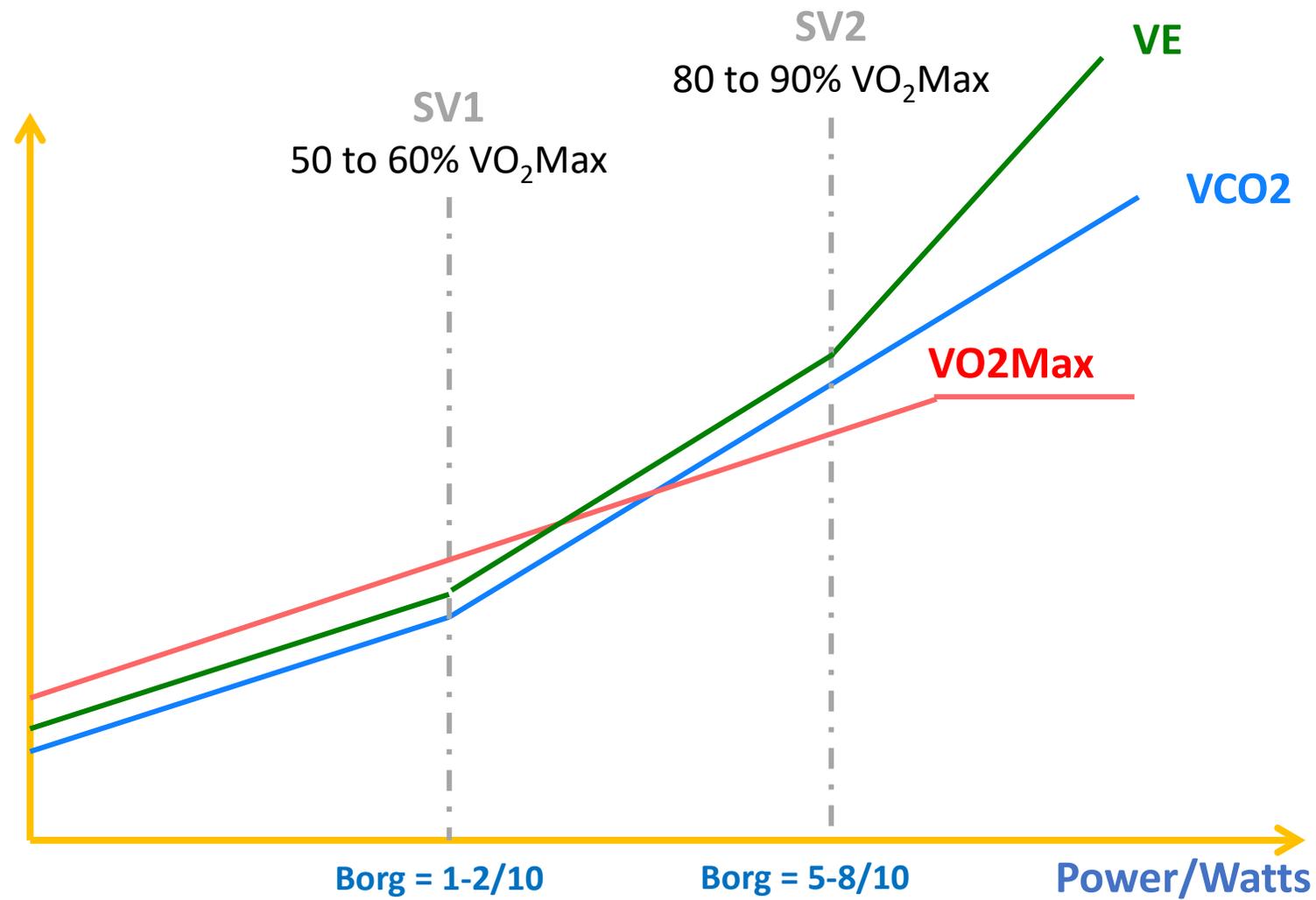
Effet du réentraînement à l'effort



- Global
 - ↑ endurance à l'effort
 - ↓ sensation de fatigue
 - ↓ mortalité
 - ↓ évènement cardiovasculaire
 - ↓ surcharge pondérale
 - ...



**Epreuve
d'effort**



1. EEX interprétable ?



- $VO_2/\text{watts} = 8,3 \text{ à } 12,3 \text{ ml/min/watts}$
 - ($\approx 1,5\text{L}$ d'O₂ pour 100 watts)
 - Si trop bas = problème étalonnage, analyseur, vélo...
 - Si trop haut = idem ou travail parasite ou hyperventilation effort ou obésité...
- Valeurs de repos :
 - $V_t = 0,5\text{L}$
 - $VO_2 = 3,5 \text{ ml/min/kg}$
 - $RER \text{ repos} = 0,85$

2. EFX maximale ?



- Au moins 3 critères de maximalités parmi :
 - *Plateau de VO₂ (se suffit à lui-même)*
 - RER > 1,1
 - Acidose métabolique = baisse de 0,04 de pH
 - Lactatémie max > 8 mmol/L
 - Réserve chronotrope > 10% ou FCMax > 85 voire 90% de FCMT
 - Epuisement de la réserve ventilatoire (< 30%)
 - Epuisement : impossibilité de maintenir un pédalage efficace
 - ...

3. Quelle tolérance à l'effort ?

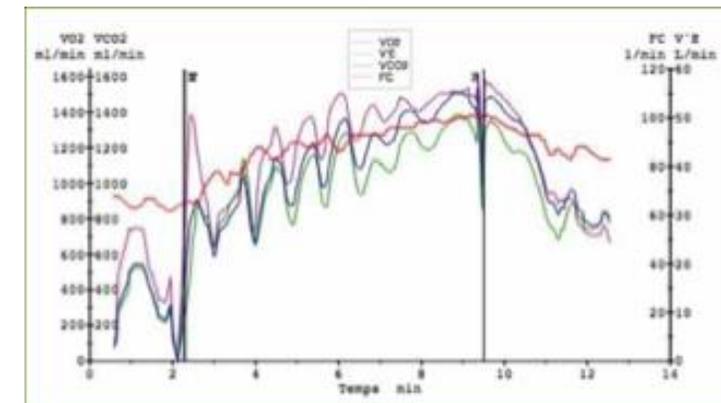
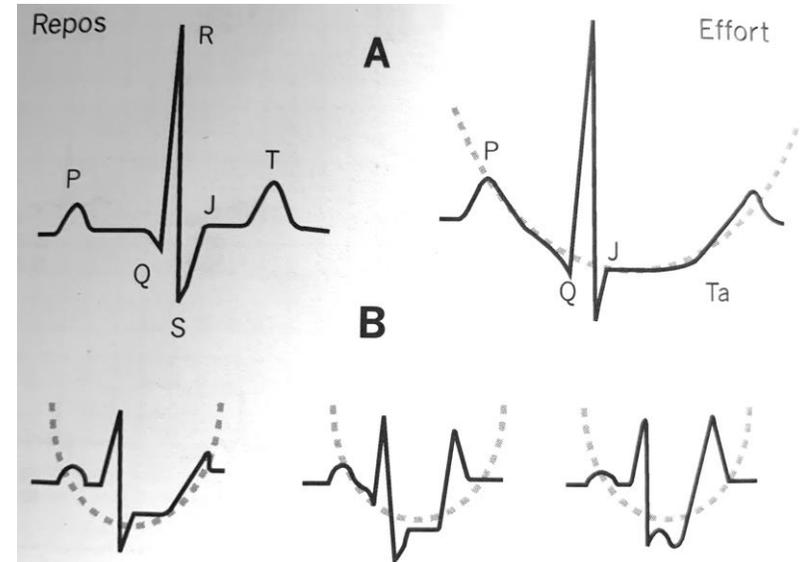


- Selon le $VO_2\text{Max}/\text{pic}/\text{SL}$
 - $VO_2\text{pic} \geq 85\%$ de $VO_2\text{MT}$ = normal
 - $60\% < VO_2\text{pic} \leq 85\%$ = intolérance modérée
 - $40\% < VO_2\text{pic} \leq 60\%$ = intolérance sévère
 - $VO_2\text{pic} \leq 40\%$ = intolérance très sévère
- À modérer en fonction :
 - Du calcul de théorique
 - De l'adaptation ventilatoire
 - Des facteurs limitants

4. Limitation cardiovasculaire ?



- Insuffisance chronotrope
- Pouls d'O₂ effondré
- Ischémie/trouble du rythme
- Absence d'augmentation de la PA
- Mais aussi :
 - Réserve ventilatoire importante
 - Pente VE/VCO₂ > 30
 - Temps ½ VO₂ ≤ 80ms
 - Oscillations respiratoires
 - VD/Vt augmenté = anomalie ventilation/perfusion
 - ...



5. Limitation ventilatoire ?



- Épuisement rapide de la RV
- Anomalie mécanique ventilatoire
 - cinétique V_t/FR
 - Hyperventilation inappropriée
- Anomalie échangeur gazeux
 - Chute de $PaO_2 \geq 10$ mmHg
 - Chute de $SaO_2 \geq 4$ %
- Mais aussi :
 - Réserve chronotrope importante
 - Hypoventilation alvéolaire (augmentation $PaCO_2$ avec ventilation régulière)
 - Obstruction post effort
 - ...

6. Limitation périphérique



- $SV1 \leq 40\%$ de $VO2MT$
- Épuisement
- Symptômes

ET réserve chronotrope préservé, RV intacte.

- Absence d'augmentation des lactates
- Élévation trop importante de l'ammoniémie



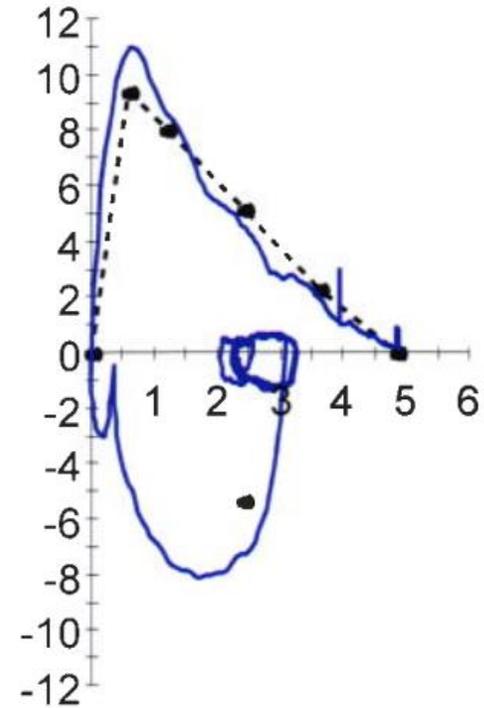
Exemples

Homme de
37 ans,
fatigue

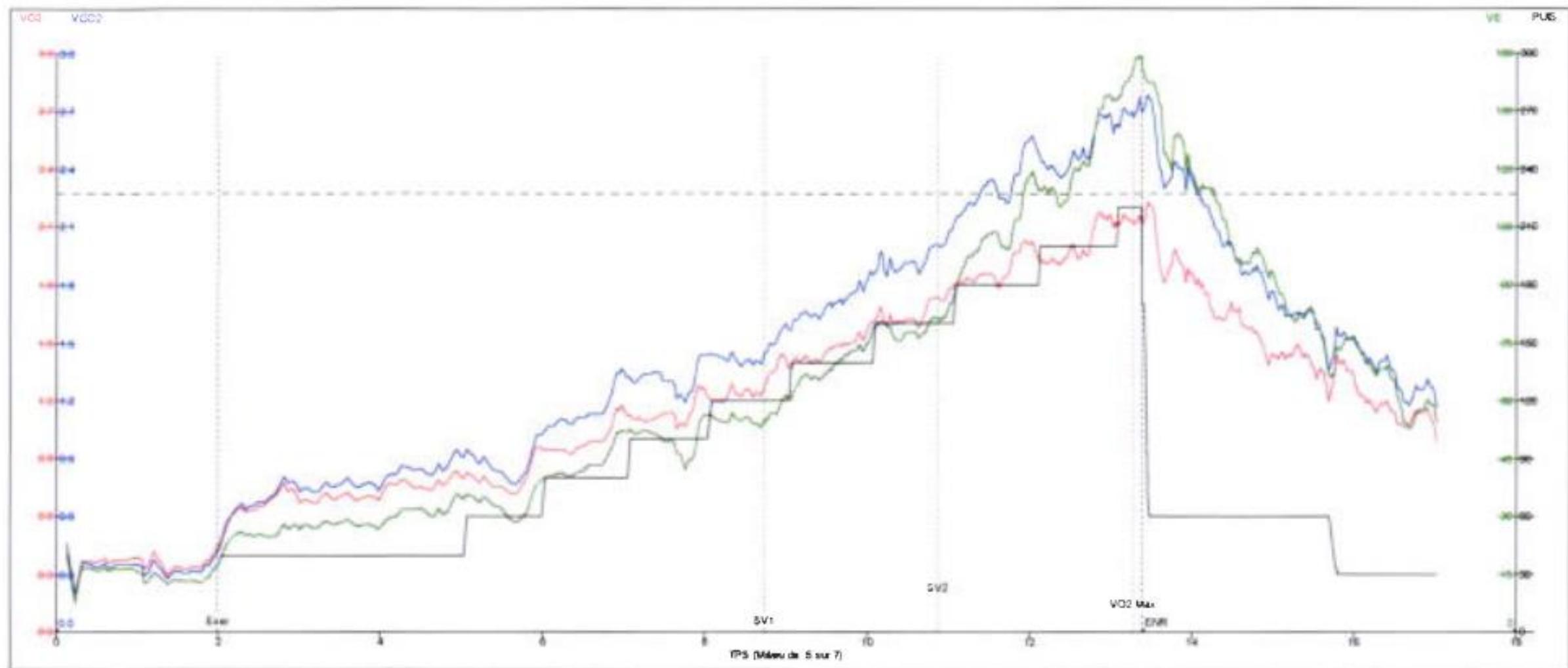


	<u>Actuel</u>	<u>Pred</u>	<u>%Pred</u>
CVF (L)	4,90	4,83	101
VEMS (L)	3,97	4,00	99
VEMS/CVF (%)	81	81	100
VEMS/CVL (%)		83	
DEM75% (L/sec)	8,61	8,06	106
DEM50% (L/sec)	4,45	5,17	85
DEM25% (L/sec)	1,86	2,28	81
DEP (L/sec)	10,96	9,35	117
DEM. 25-75% (L/sec)	3,74	4,51	83

Actuel %Pred %Chng



---●--- Pred — Pré



Homme de 37 ans, fatigue

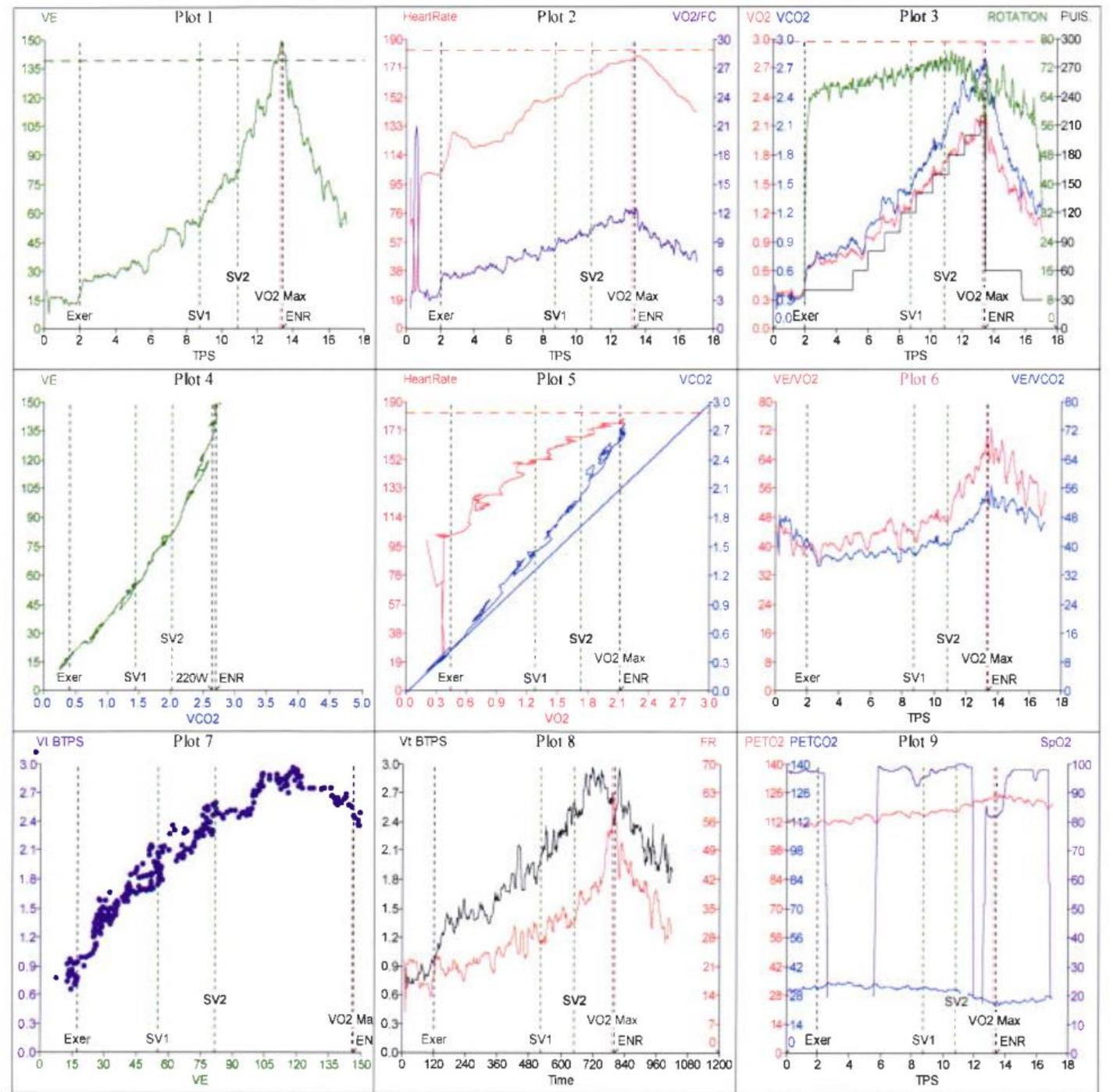


Palier	Puissance	F pédalage	FC	Sat	Dyspnée	Myalgie	Fatigue	TA
repos			102	97	0	0	0	136/63
1	40	65	105	97	1	0	0	
2	40	65	120		1	0	0	
3	40	65						196/72
4	60	68	133	98	1	0	1	160/90
5	80							
6	100	66	148	99	2	0	2	170/90
7	120	73	152	95	3	0	3	
8	140							190/90
9	160							
10	180							200/90
11	200							
12	220				7	7	7	
13								
14								
15								
16								
17								
18								
	Puissance	Temps	FC	Sat	Dyspnée	Myalgie	Fatigue	TA
Recup 1		3mn						161
Recup 2		5mn						141/70
Recup 3								

Motif d'arrêt *moyeu de force*

↓
Add + IT

Homme de 37 ans, fatigue



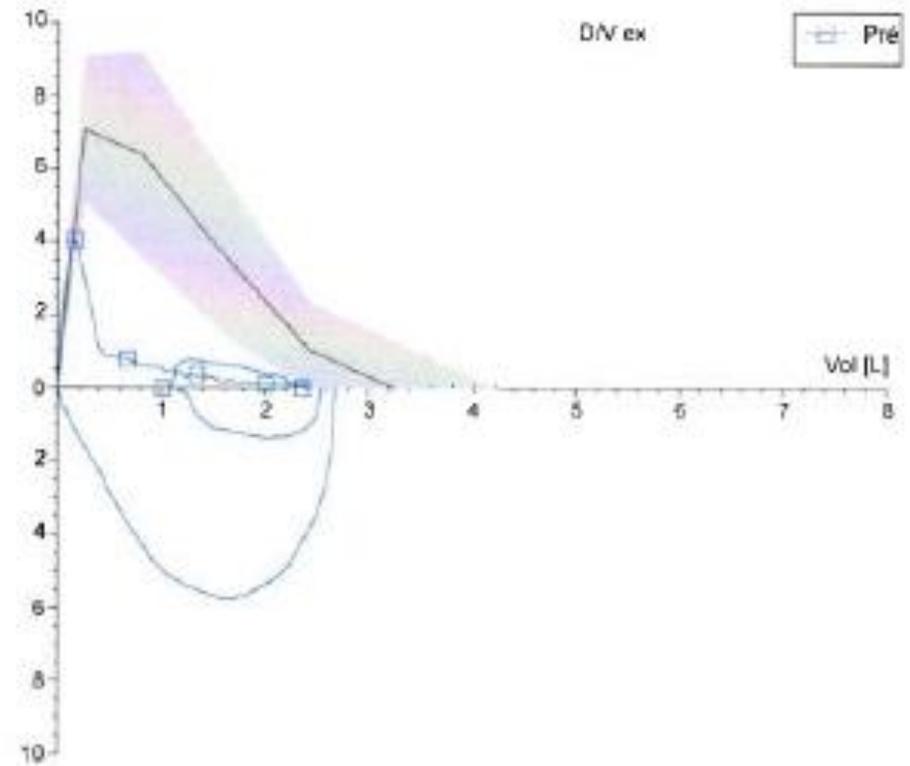
Homme de 37 ans, fatigue



	<u>Repos</u>	<u>SV1</u>	<u>SV2</u>	<u>V02 Max</u>	<u>Pred</u>	<u>VO2 Max/Pred (%)</u>	<u>AT / Pred (%)</u>
TPS (min)	1:57	8:44	10:52	13:17			
Temps Exercice (min)		6:46	8:54	11:19			
-							
---- TRAVAIL ----							
PUIS. (Watts)	0	120	160	220	227	97	53
ROTATION (RPM)		68	71	67			
-							
---- METABOLISME----							
VO2 (L/min)	0,41	1,28	1,73	2,11	2,97	71	43
VO2/KG (mL/kg/min)	4,6	14,2	19,3	23,5	32,9	71	43
VCO2 (mL/min)	388	1448	2009	2668			
VCO2 (L/min)	0,39	1,45	2,01	2,67			
Q.R	0,94	1,13	1,16	1,26			
METS	1,3	4,1	5,5	6,7	9,4	71	43
VE/VCO2	42	38	41	55			
VE/VO2	40	43	47	69	33	211	132
PETCO2 (mmHg)	32	32	31	24			
SpO2 (%)	97	95	100	82			
VO2WorkSlope (mL/mi)		8,4	8,1	8,4			
-							
--- VENTILATION ---							
VE (L/min)	16,4	55,2	81,6	146,5	139,0	105	40
Vt (mL)	936	2038	2607	2452			
FR (br/min)	17	27	31	60			
Rés.Vent. (%)	88,2	60,2	41,2	-5,5			
Vd/Vt - est	0,33	0,24	0,22	0,28			
Vd/Vt - meas							
P(A-a)O2 (mmHg)							
-							
--- CARDIAQUE ---							
FC (BPM)	101	152	167	177	183	97	83
%FMT (%)	55	83	91	97			
VO2/FC (mL/beat)	4	8	10	12	16	74	52
--- GAZ DU SANG--							
PaO2_man (mmHg)							
PaCO2_man (mmHg)							
pH							
SaO2 (%)	97	95	100	82			

Commentaires Post-Test: Impossibilité de maintenir un pédalage efficace. Dyspnée, myalgies et fatigue à 7/10.

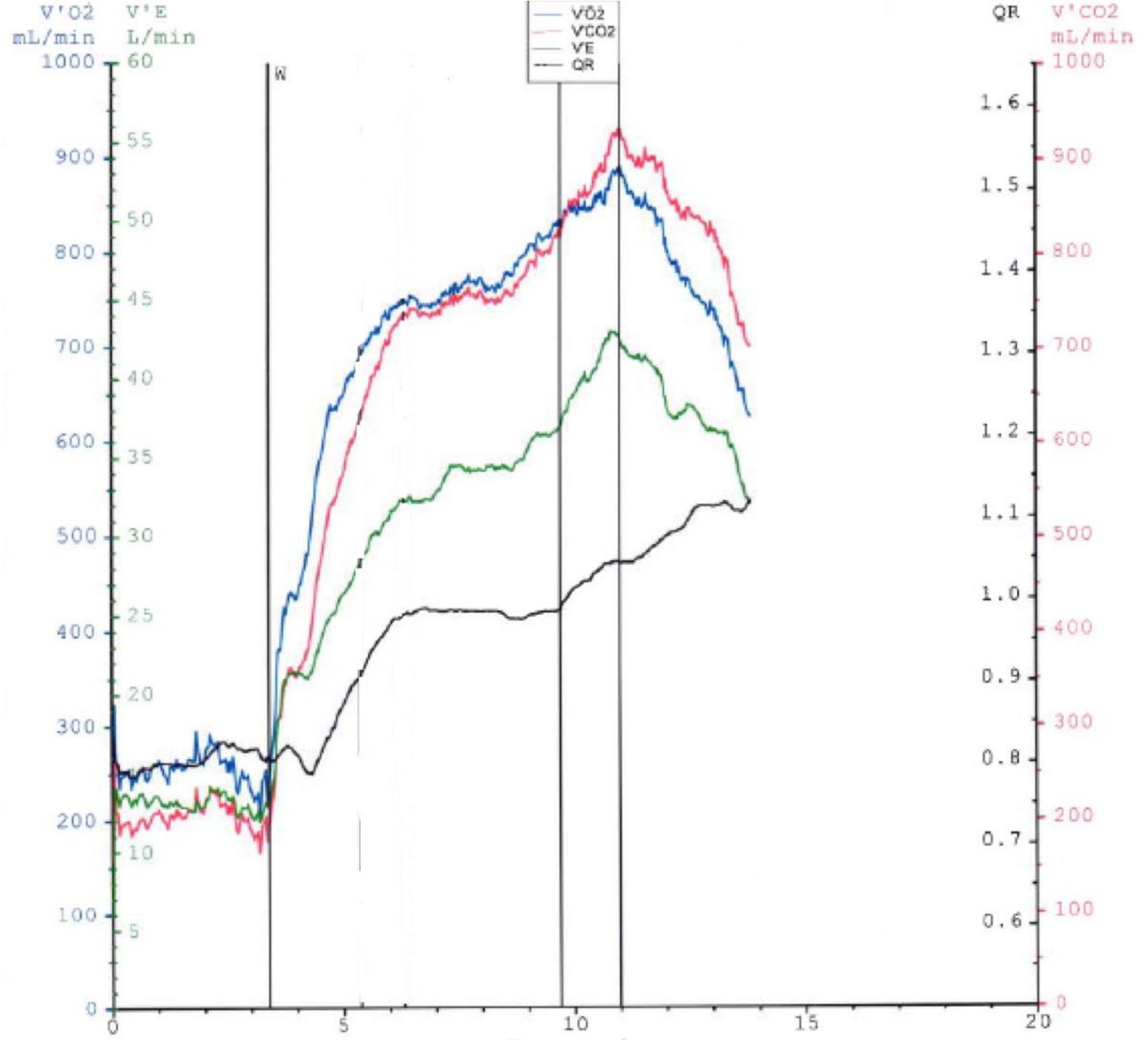
Homme
76 ans
76 ans, 166cm



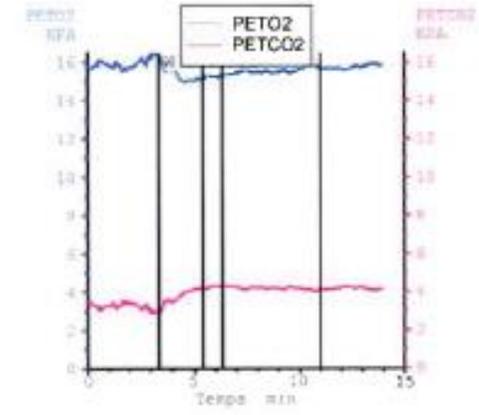
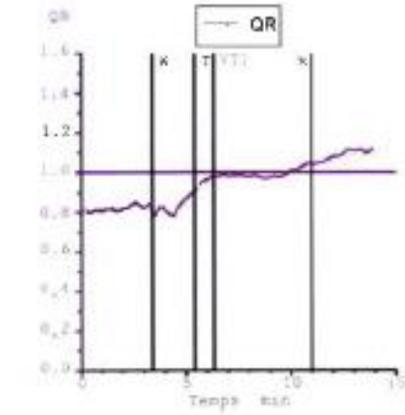
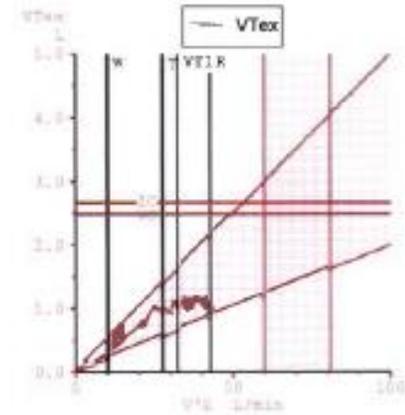
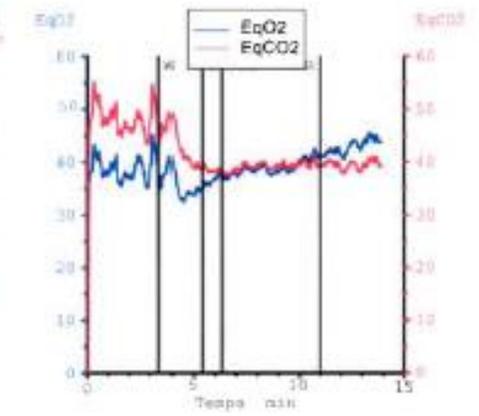
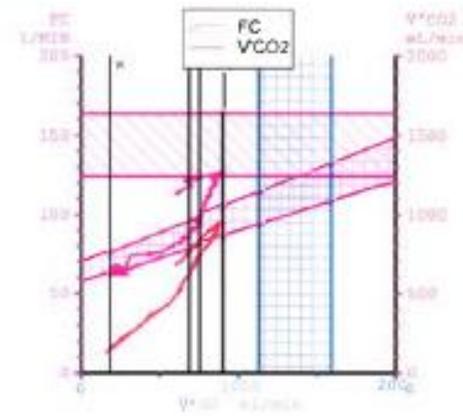
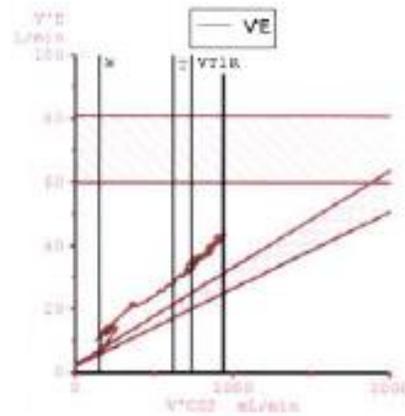
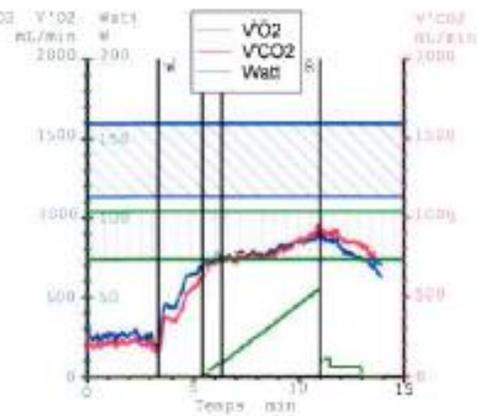
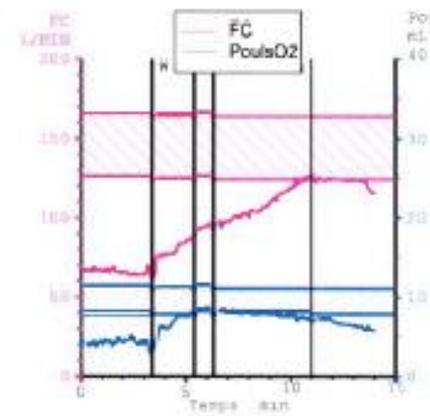
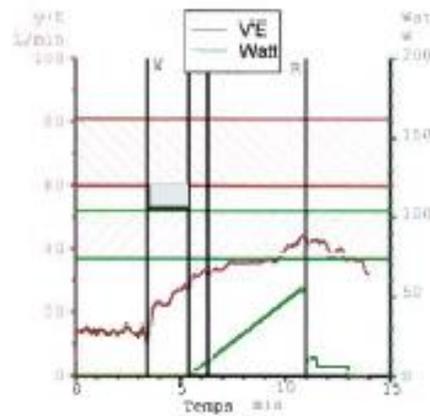
Débit-Volume Pre-Post

	Théo	Pré	%...
CV	3.35	2.67	80
CVF	3.25	2.36	73
VEMS	2.44	1.00	41
VEMS%CV	73.53	37.59	51
Cl_F	2.49	2.36	95
DEP	7.07	4.05	57
DEM75	6.39	0.78	12
DEM50	3.59	0.37	10
DEM25	1.02	0.11	10
Date test		27.09.19	
Heure test		09:03	

Homme
76 ans
76 ans, 166cm



Homme
76 ans
76 ans, 166cm



Homme
76 ans
76 ans, 166cm



Paliers Par min	P watts	FC / min	SpO2 %	Dyspnée 0/7 Borg	Myalgies 0/7 Borg	Fatiga bilité 0/7	T.A mm Hg	Lactate mmol/L
			97%	0			14/14	
Repos								
1	78	0		0			15/17	
2	71	0						
3	72	10		2				
4	70	20	98	3			15/18	
5	70	30		3				
6	67	40	90	3			16/19	
7		50		4				
8				5	0			
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
Récup								
	active							
1 min 30		124	89				15/17	
3 min								
	passive							
6								

soffle Ø doulun

Homme
76 ans
76 ans, 166cm



		Repos (R) 8 Moyenne	SV1 [Manuel] 8 Moyenne	SV2 [Manuel] 8 Moyenne	VO2Pic 8 Moyenne	VO2Pic [Théo] 8 Moyenne	VO2Pic [%ThéoMax] 8 Moyenne
Temps	[min]	03:22	06:19	09:41	10:53		
Watt	[W]	0	8	42	54	89	61
V'O2	[mL/min]	234	751	830	908	1363	67
VO2/kg/min	[(mL/min)/kg]	3.5	11.4	12.6	13.8		
V'CO2	[mL/min]	192	737	819	951		
QR		0.82	0.98	0.99	1.05		
RR VEM5%	[%]	64	8	-6	-24	28	-86
MET		1.3	4.2	4.6	5.1		
V'E	[L/min]	13	32	37	44	70	62
VTex	[L]	0.499	1.025	1.065	0.941		
FR	[L/MIN]	25.7	31.6	34.8	46.4	41.6	112
EqO2		42.8	38.5	40.1	42.4		
EqCO2		52.0	39.2	40.7	40.5		
PETO2	[KPA]	16.28	15.32	15.42	15.72		
PETCO2	[KPA]						
FC	[L/MIN]	63	96	114	127	144	88
FC/VO2	[L/L]	53.0					
RFC (L)	[L/MIN]	81	48	30	17		
PoulsO2	[mL]	3.7	7.8	7.3	7.2	9.5	76
Psys	[mmHg]	140	150	160	160		
Pdia	[mmHg]	70	70	90	90		
pHa							
PO2 art.	[mmHg]						
PCO2 Art.	[mmHg]						
AB	[mmol/L]						
SpO2	[%]	97	91	88	87		
PaO2st	[mmHg]						
P[A-a]O2	[mmHg]						
PaETCO2	[mmHg]						
VDc/VT	[%]	23	25	27	25	19	133
VDc/VT	[%]	18	25	26	24	19	128
VD/VT réel	[%]	0	0		0	19	0
dO2/dW	[(mL/min)/W]	0.00	10.41	3.86	4.46		