



Rendimiento físico y entrenamiento en altitud o hipoxia intermitente. *Hypoxic pre-conditioning*

Jean-Paul Richalet

EA2363 Université Paris 13

Laboratoire "Réponses cellulaires et fonctionnelles à l'hypoxie"

Madrid, Nov 2019

Juegos olímpicos en altura media : MEXICO, 1968

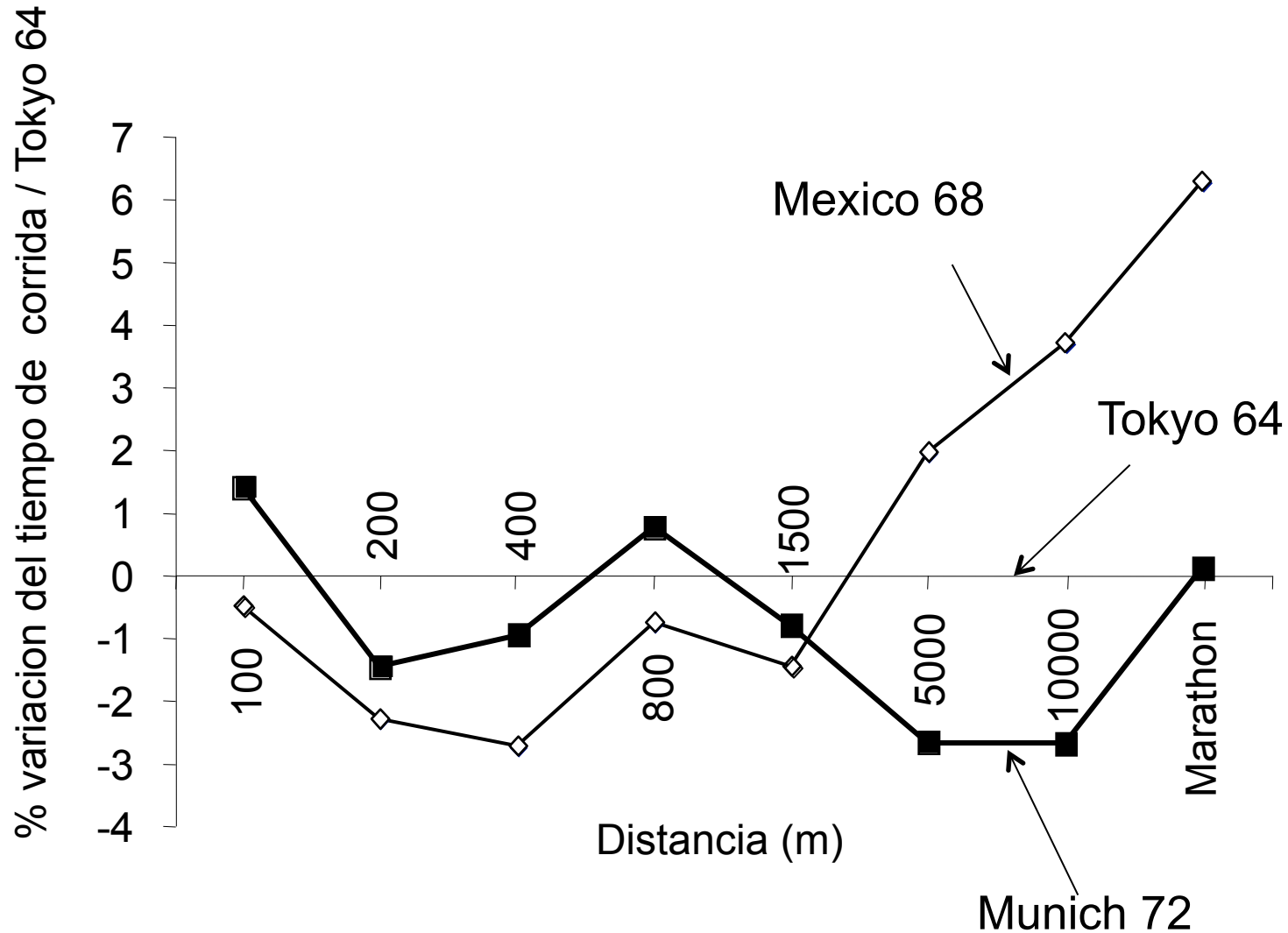


Bob Beamon, long jump: 8.90 m,
world record for 22 years



Ron Clarke, 10000m:
exhaustion at the end
of the race

Resultados en atletismo a los Juegos olímpicos '64, '68 et '72



La Paz, Bolivia, 3400-4050 m

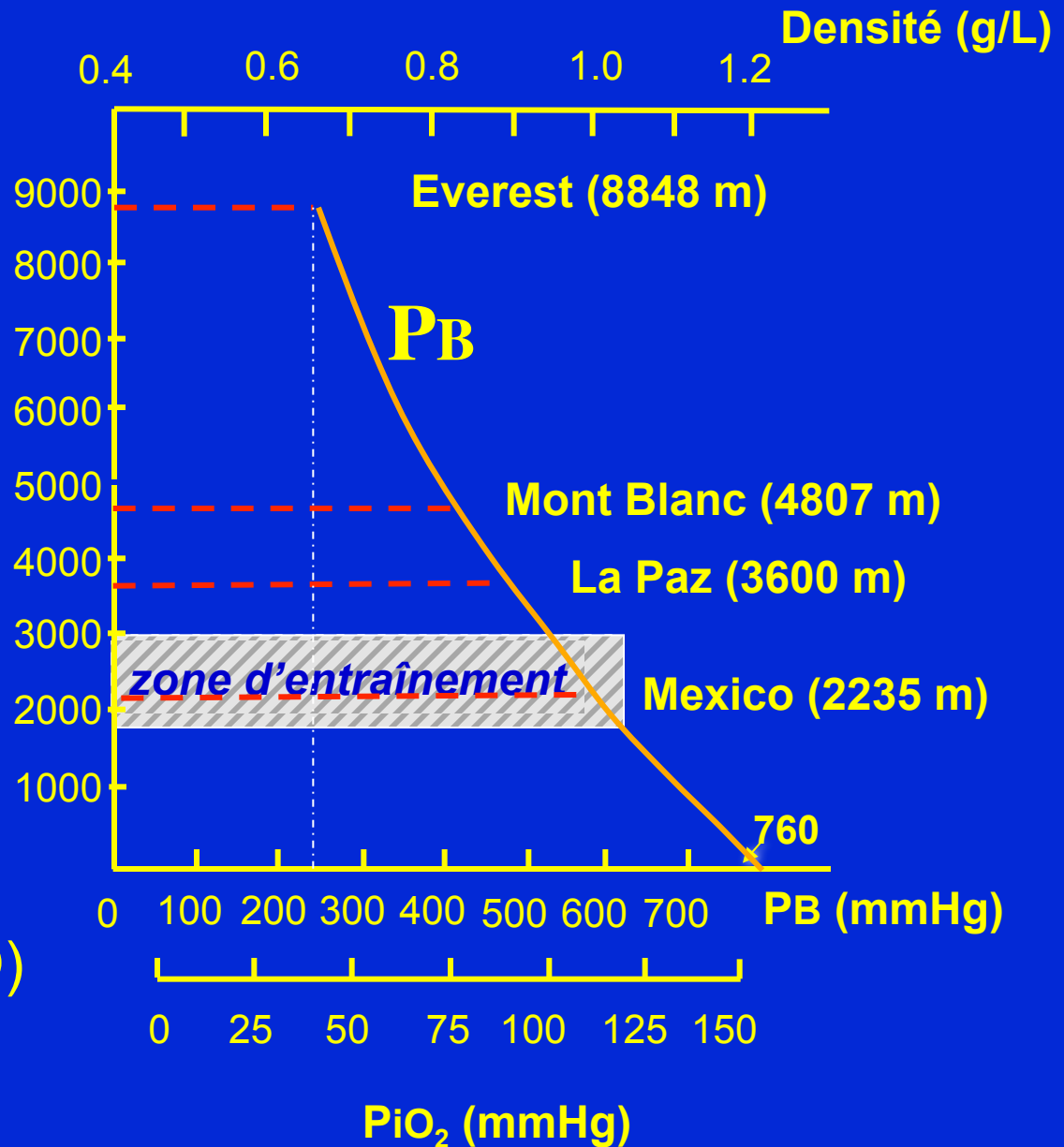


1 abril 2009...
Bolivia - Argentina : 6 - 1

Diminution de
la pression
barométrique
et de la densité
de l'air avec
l'altitude

HYPOXIE =
Manque d'oxygène

$$PiO_2 = FiO_2 \times (PB - PH_2O)$$



HYPOXIA

Detection of hypoxia

Genes with a "Hypoxia responsive element"
HIF-1 α , EPO, VEGF, NFkB, NOS, PDGF, ET-1, etc..

Chemoreceptors

Erythropoietin
producing
cells

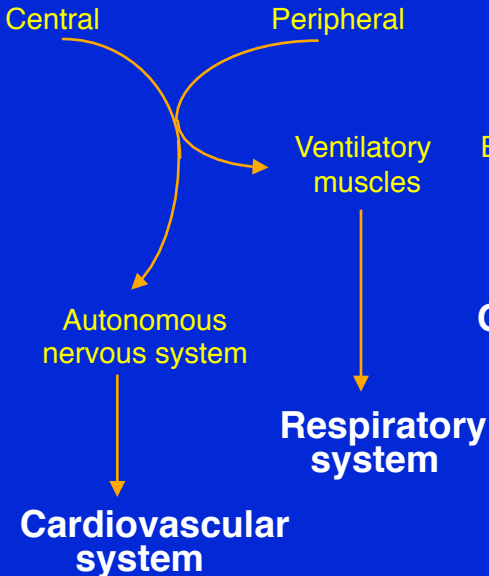
Skeletal
muscle
cells

Pneumocytes
PII

Smooth
muscle
cells

Endothelial
cells

Secreting cells
with/without O₂
sensitive enzyme



Erythropoietin

O₂ transport
capacity

Myoglobin

Alveolar
hypophase

Respiratory
system

vasoactivity
pulmonary

Cardiovascular
system

mediators

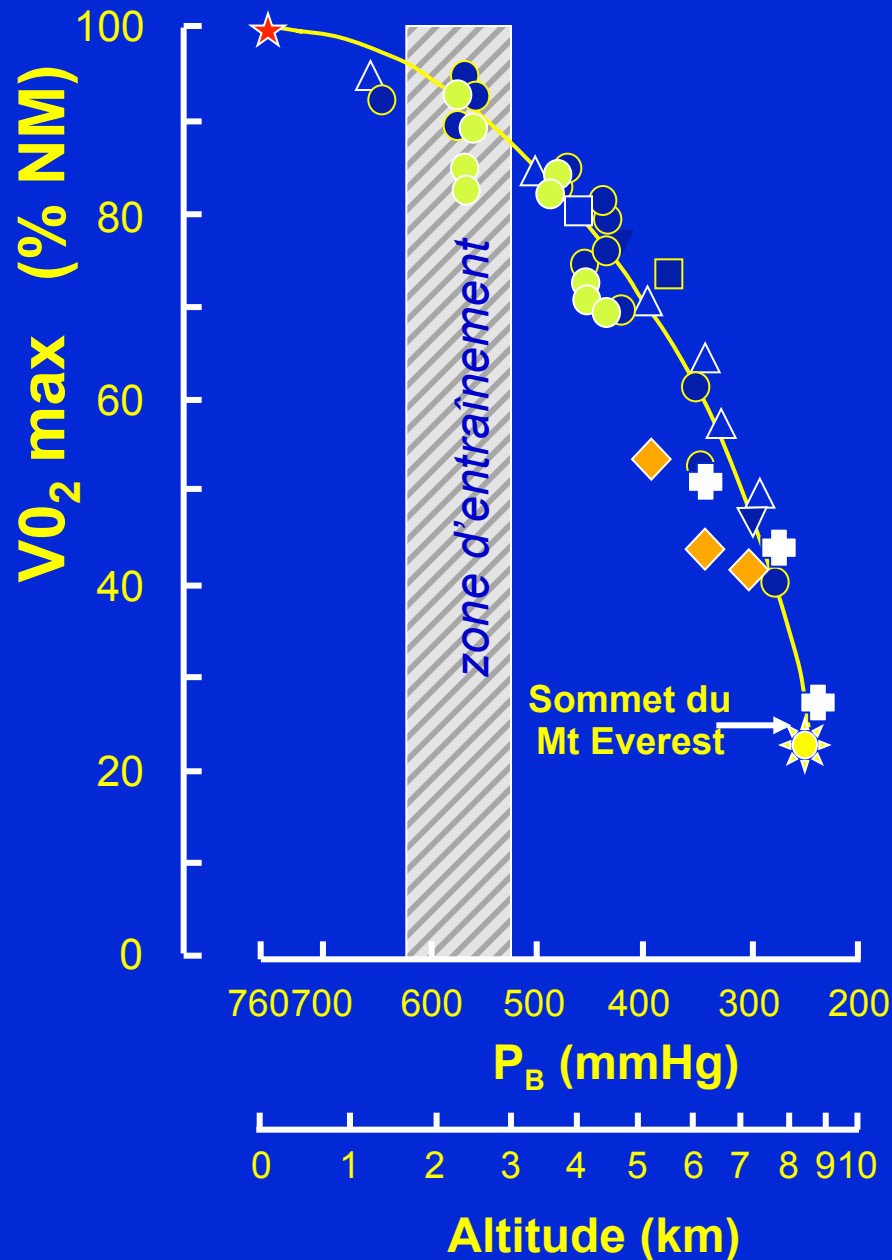
vasomotricity
hemostasis
cell proliferation
cap. permeability

Water /
electrolytes

adrenal cortex
(18-OHase)
kidney
(1 α -OHase)
lung
(conv. enz.)
heart

aldosterone
vit-D3
angio II
ANP

PO₄/Ca
metabolism



La puissance aérobie maximale ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) diminue avec l'altitude

Il existe une grande variabilité individuelle

Pourquoi s'entraîner en hypoxie ?

HYPOXIE

```
graph TD; A[HYPOXIE] --> B[Stimule l'érythropoïèse et augmente la capacité de transport de l'oxygène dans le sang]; A --> C[Active le système nerveux autonome, induit une vasculogénèse]; A --> D[Stimule les centres respiratoires et augmente la ventilation pulmonaire]; A --> E[Modifie le métabolisme musculaire];
```

Stimule l'érythropoïèse et augmente la capacité de transport de l'oxygène dans le sang

Active le système nerveux autonome, induit une vasculogénèse

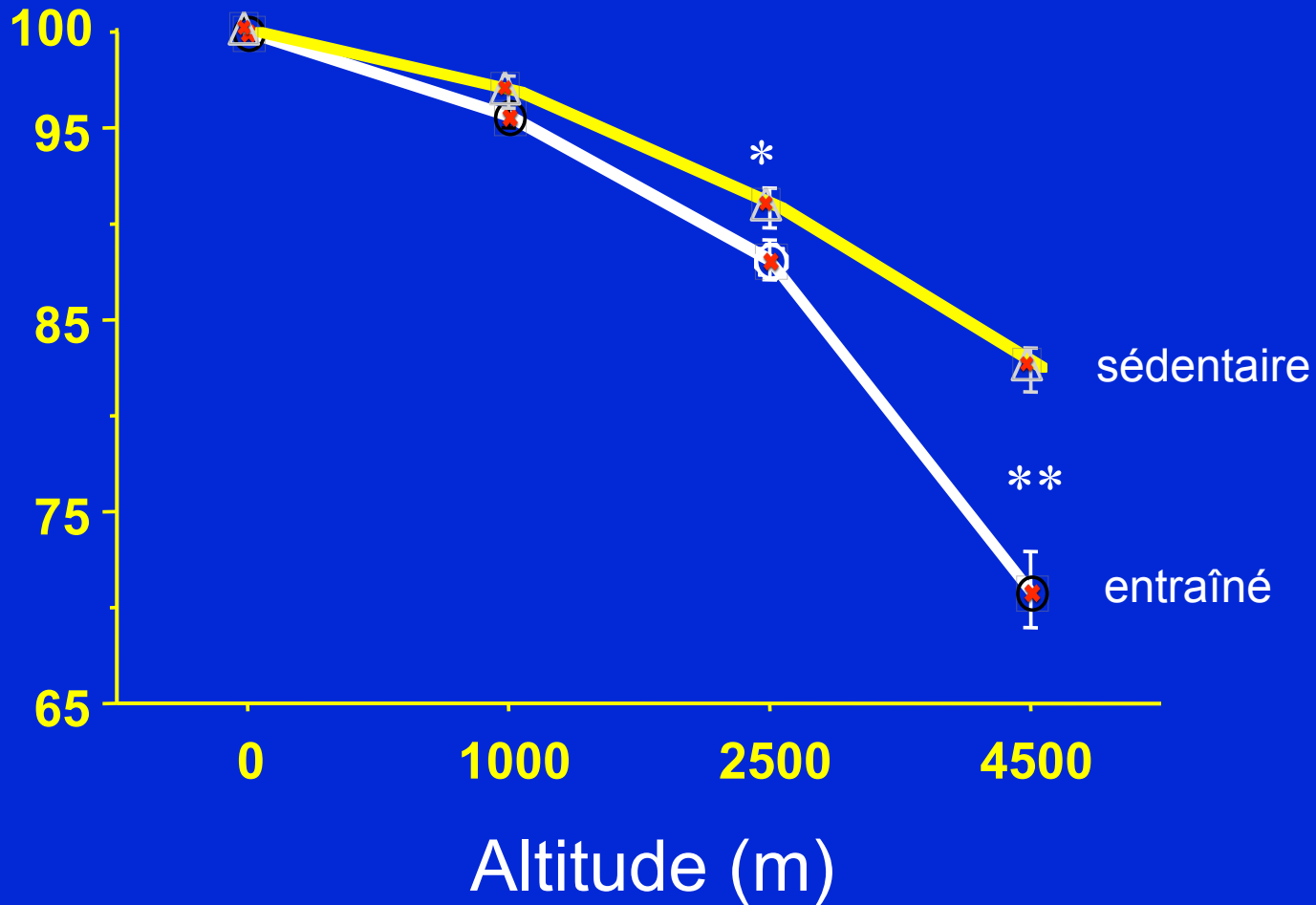
Stimule les centres respiratoires et augmente la ventilation pulmonaire

Modifie le métabolisme musculaire

Mais...

- L' environnement hypoxique nécessite une période d' adaptation (acclimatation)
- L' hypoxie induit une baisse des performances maximales aérobies:
 - 5% à 2000m
 - 15% à 3000m
 - 80% à 8848m !

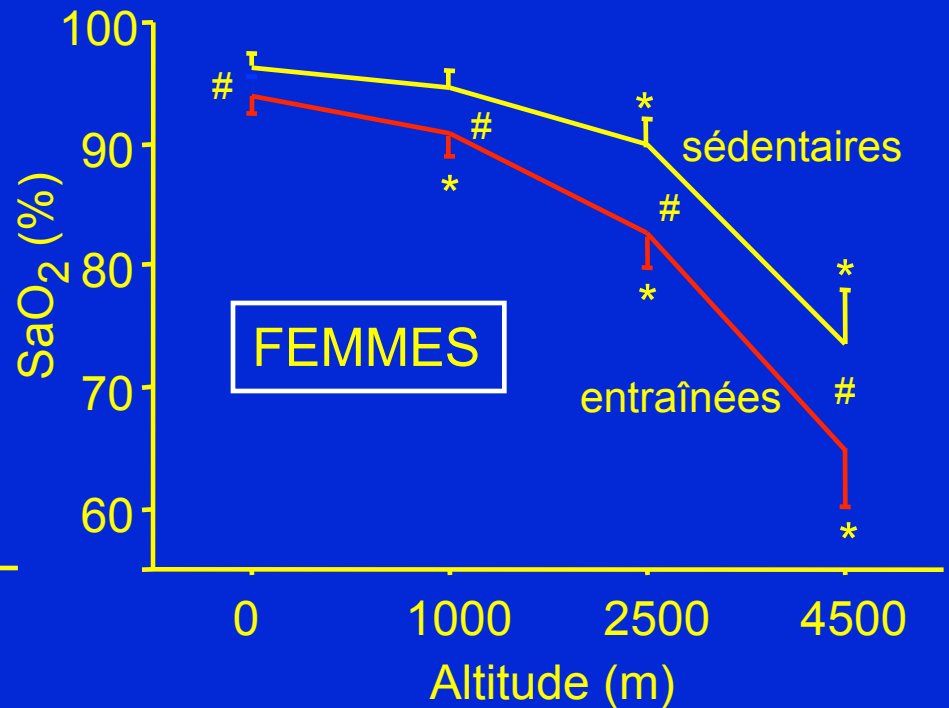
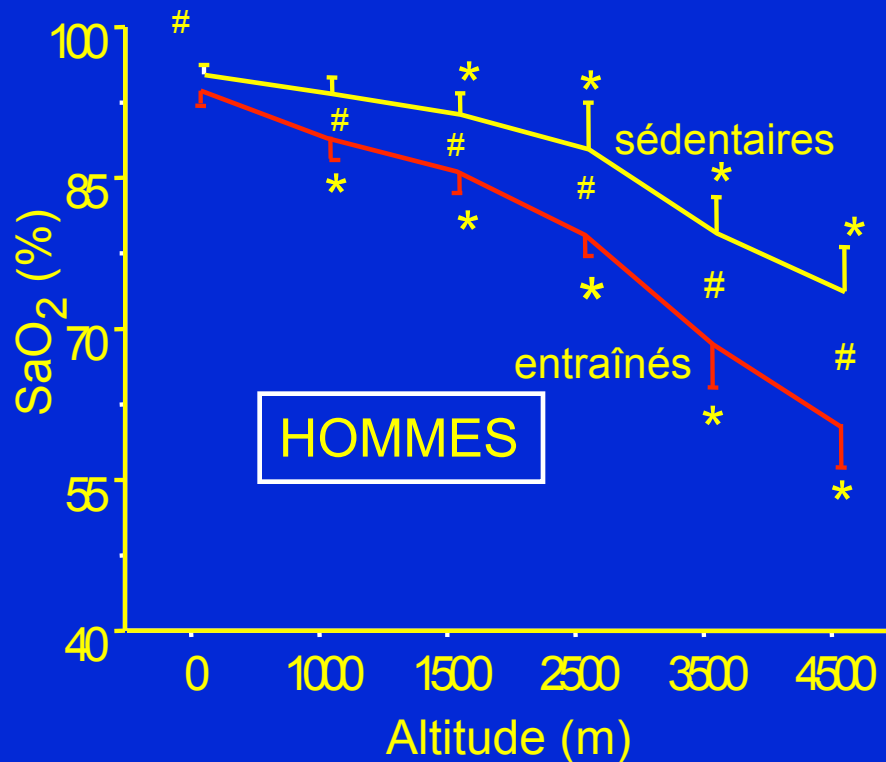
VO₂max (% du niveau de la mer)



La diminution de VO₂max est plus forte chez les entraînés que chez les sédentaires

D'après Mollard et al., 2007

SaO₂ à l'exercice maximal



* hypoxie vs normoxie # entraînés vs sédentaires

Les sujets entraînés présentent une désaturation à l'exercice plus forte que les sédentaires à l'exercice en hypoxie aiguë



O_2 $\downarrow \uparrow$ CO_2

Ventilation pulmonaire :
CONVECTION

Contrôle central

O_2 $\downarrow$

CO_2 $\uparrow$

**Transfert alvéolo-capillaire
en oxygène : DIFFUSION**

**Cœur
droit**

**Cœur
gauche**

**Transport de l'oxygène par
le sang : CONVECTION**

**Diffusion de l'oxygène
vers les tissus :
DIFFUSION**

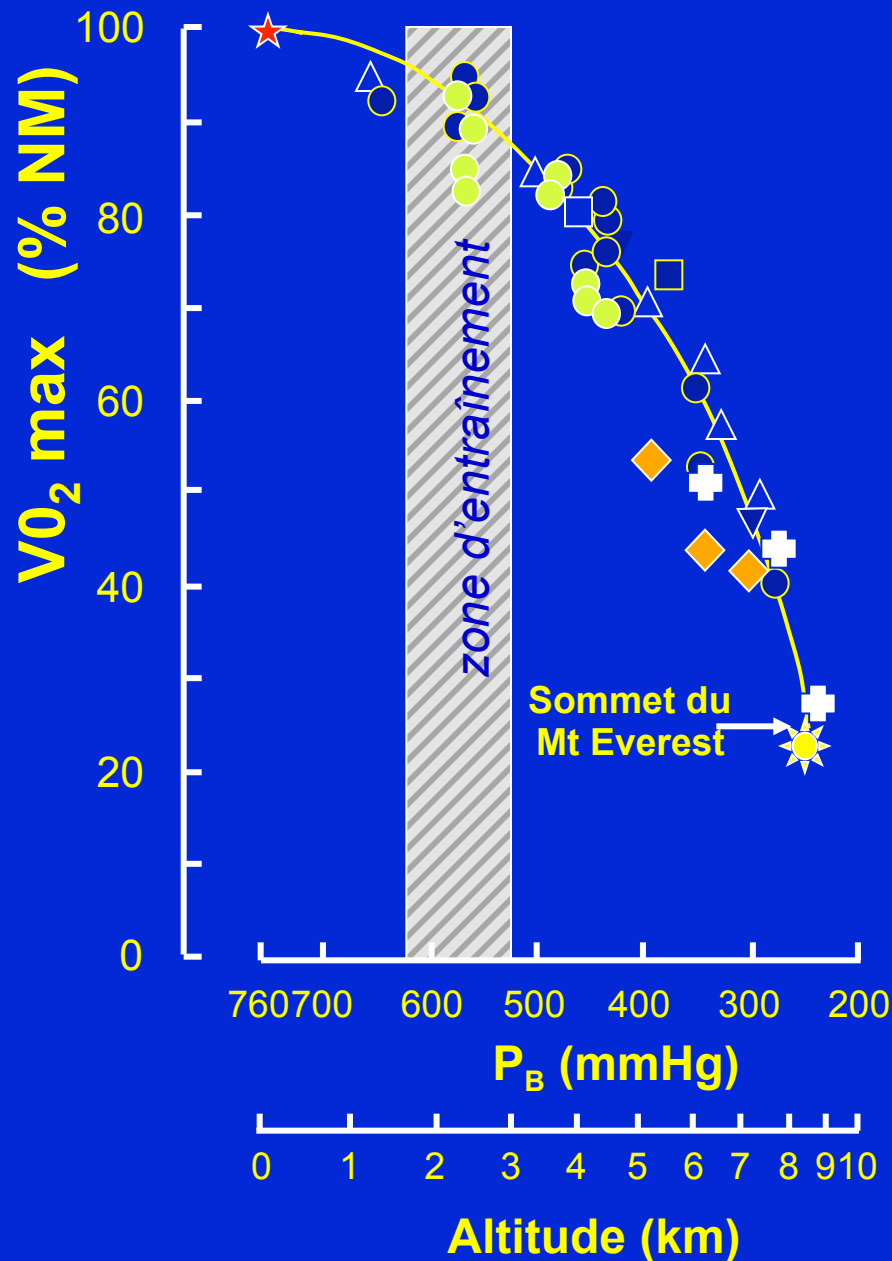
cellule

O_2 $\downarrow$

CO_2 $\uparrow$

**Consommation
d'oxygène**

Production d'énergie aérobie

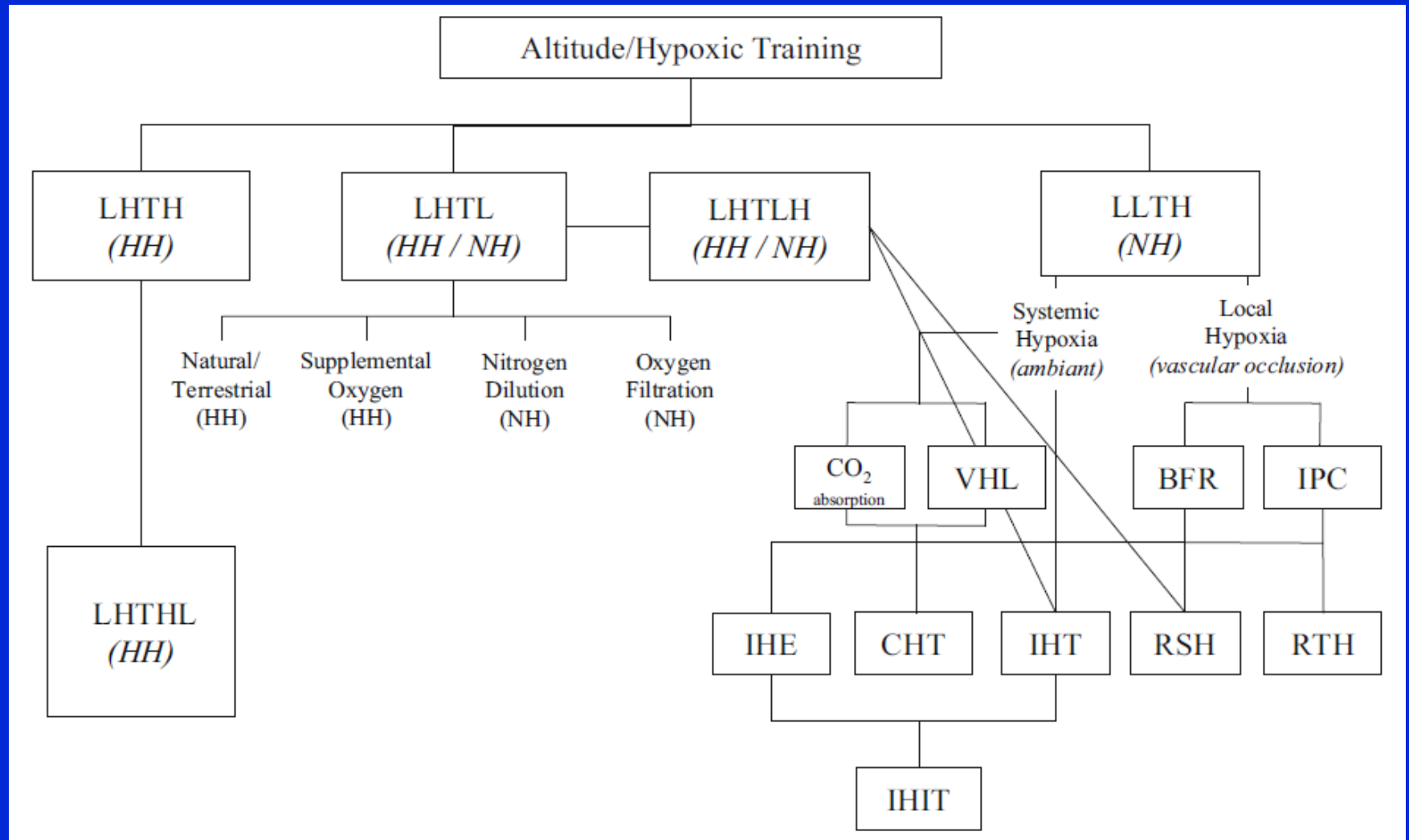


La puissance aérobie maximale ($\dot{V}O_2\text{max}$) diminue avec l'altitude

La charge d'entraînement doit être plus faible lors d'un entraînement en altitude:

***60% $\dot{V}O_2\text{max}$ au niveau de la mer
= 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ à 2500m***

Différentes méthodes d'entraînement utilisant l'altitude/ l'hypoxie



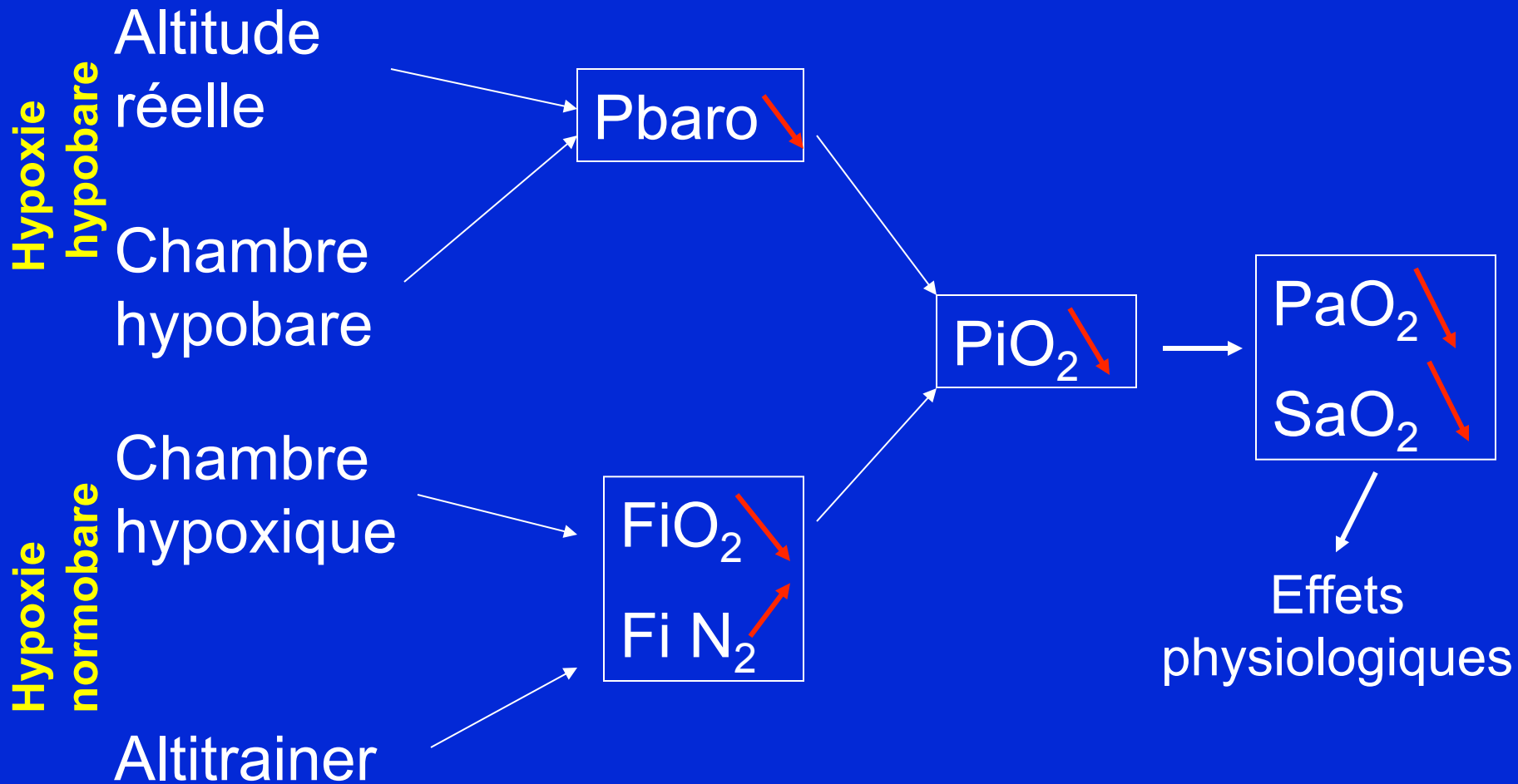
RSH repeated-sprint training in hypoxia

RTH resistance training in hypoxia

VHL voluntary hypoventilation at low lung volume.

D'après Wilber, 2007; Millet, 2009; Girard, 2017

Procédures pour l'entraînement en altitude / hypoxie



$$PiO_2 = FiO_2 \times (Pbaro - PH_2O)$$

Procédures d'entraînement en altitude actuellement utilisées

I. Entraînement et vie en moyenne altitude (1800-2500m) : LH-TH

Sites d'entraînement en altitude

AMÉRIQUE DU NORD :

- Colorado Springs (E-U.) 1850 m.
- Boulder (E-U.) 1600 m.
- Flagstaff (E-U.) 2134 m.
- Albuquerque (E-U.) 1600-2200 m
- Mexico (Mexique) 2200 m.

EUROPE :

- Sierra Nevada (Espagne) 2320 m.
- Font-Romeu (France) 1850 m.
- Tignes (France) 2000 m
- Saint-Moritz (Suisse) 1850 m.
- Davos (Suisse) 1560 m.
- Belmeken (Bulgarie) 2050 m.
- Erevan (Arménie) 1200 m.

AFRIQUE :

- Ifrane (Maroc) 1650 m.
- Nyahururu (Kenya) 2348 m.
- Eldoret (Kenya) 2000 m.
- Potchefstroom (Afrique du Sud) 1500 m.

-ASIE :

- Nobeyama (Japon) 1400 m.

AMÉRIQUE DU SUD :

- ????

Sierra Nevada, 2320m



Centre d'entraînement de Duoba – Xining – 2300m



FONT-ROMEUE (1850m)

Centre National d'Entraînement en Altitude



S'entraîner et dormir en haut (méthode classique)

Peu d'études contrôlées:

Effets bénéfiques trouvés dans seulement 2 études, chez des sujets entraînés, mais non-élite.

(Mellerowicz et al., 1970; Levine and Stray-Gundersen, 1997)

Dans toutes les études sur des athlètes élite, aucune différence significative n'a été trouvée, permettant de relier l'amélioration de la performance au facteur « altitude ».

Etudes non contrôlées:

Parfois effets « bénéfiques », mais une grande variabilité individuelle !

Procédures d'entraînement en hypoxie actuellement utilisées

II. Entraînement en faible altitude (<1200m) et récupération (sommeil) en haute altitude (2500-3500m): LH-TL

- altitude vraie : refuge de haute montagne, station haute de téléphérique, centre en région montagneuse (Colorado)
- altitude simulée : chambres hypoxiques type Prémanon (France), Pays Scandinaves, Chine, Australie, tentes hypoxiques individuelles (Internet)



Centre National de Ski Nordique Prémanon

Pékin, Beijing Sports University



Qatar, “Aspire”



Australian Institute of Sport, Canberra, Australie



“Altitude House”



Entraînement en hypoxie chez le sportif de haut niveau en endurance.

Evaluation des effets sur la performance.
Recherche de facteurs de réponse individuelle.
Evaluation des risques potentiels pour la santé.

Recherche multicentrique réalisée
sous l'égide du

Comité International Olympique
et du
Ministère des Sports



COMITE INTERNATIONAL OLYMPIQUE

Coordination :

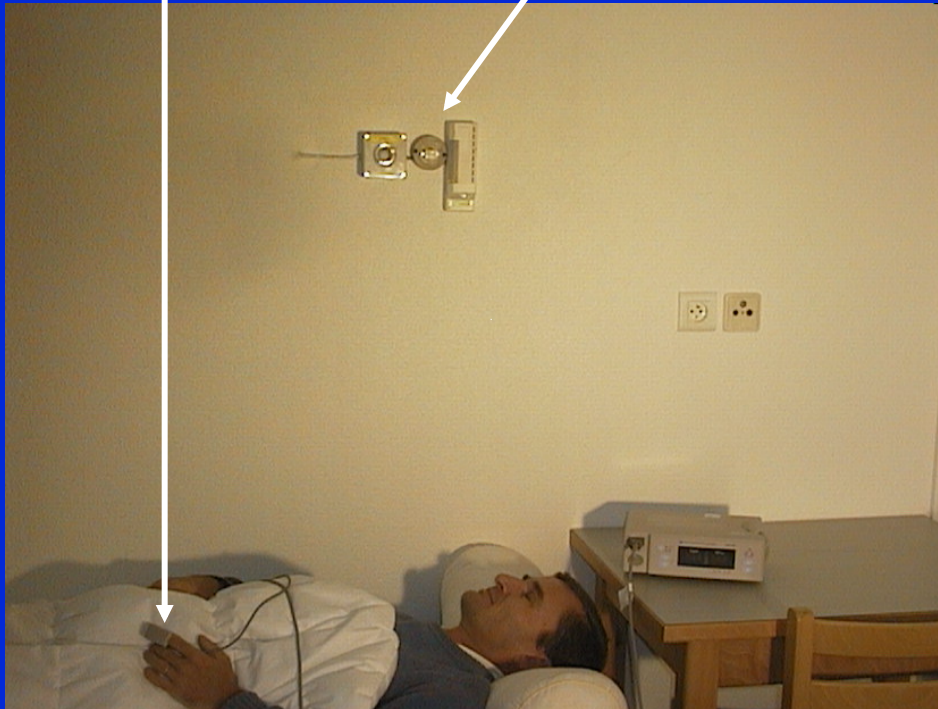
Jean-Paul Richalet, coordonnateur du projet scientifique
Laurent Schmitt, coordonnateur du mouvement sportif



Chambre hypoxique

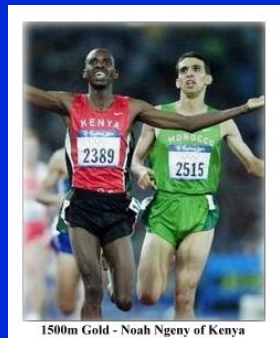
Contrôle de la saturation artérielle en O₂

Contrôle de O₂ et CO₂ dans l'air ambiant



Salle de contrôle

Prémanon, Jura, France

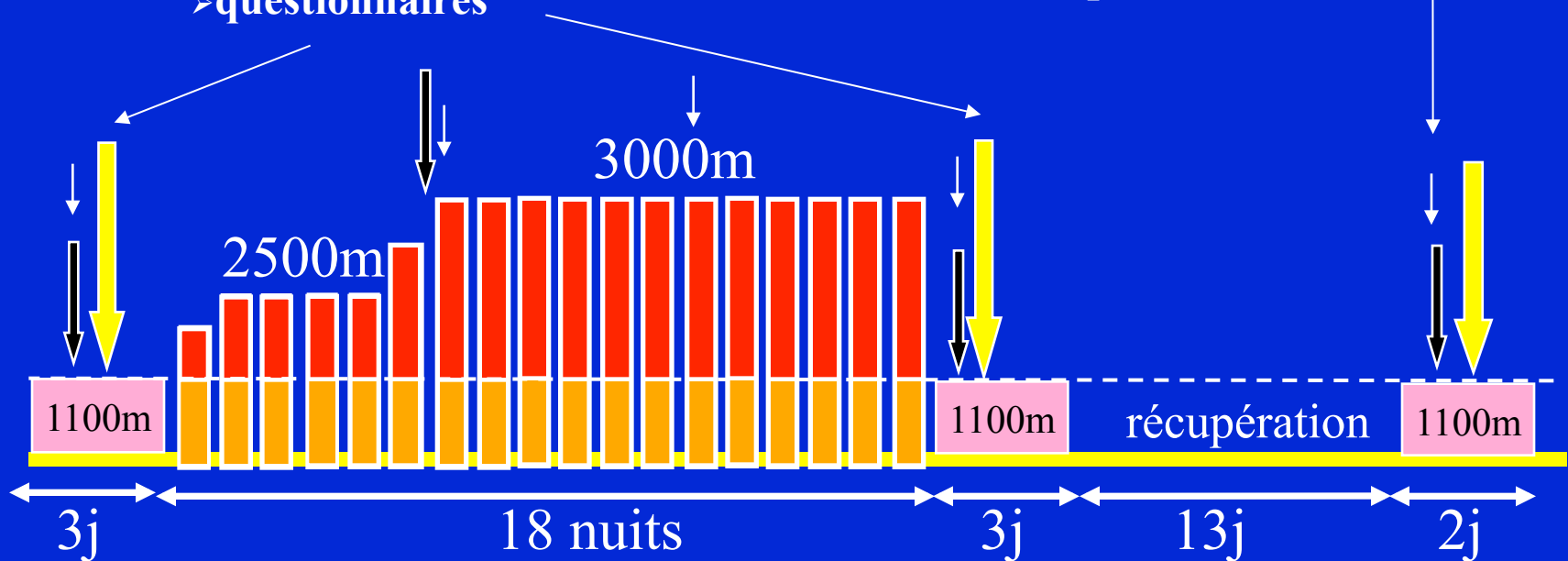


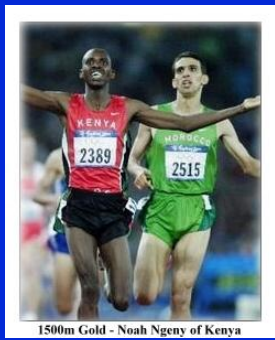
Athlétisme



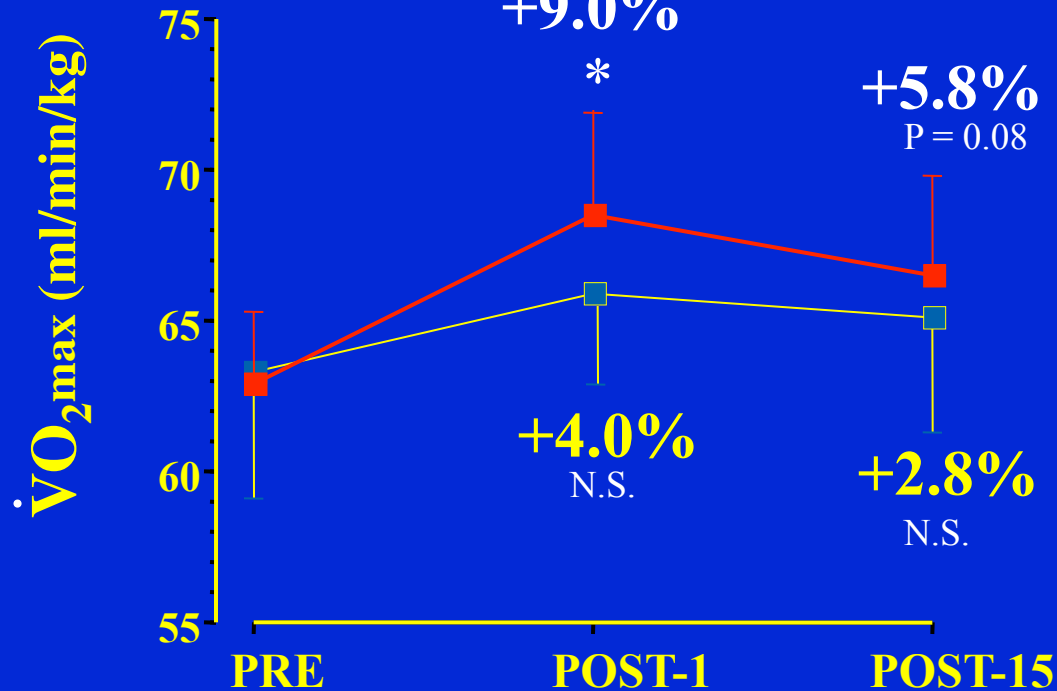
- VO_2 max (tapis roulant)
- test piste 10 min à 90% de V.M.A.
- Analyse de sang, VP
- Test hypoxie
- TFM, TDF
- questionnaires

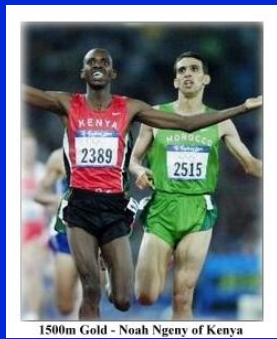
- vO_2 max (tapis roulant)
- Test piste 10 mn à 90% VMA
- Analyse de sang, VP
- TFM, TDF
- questionnaires



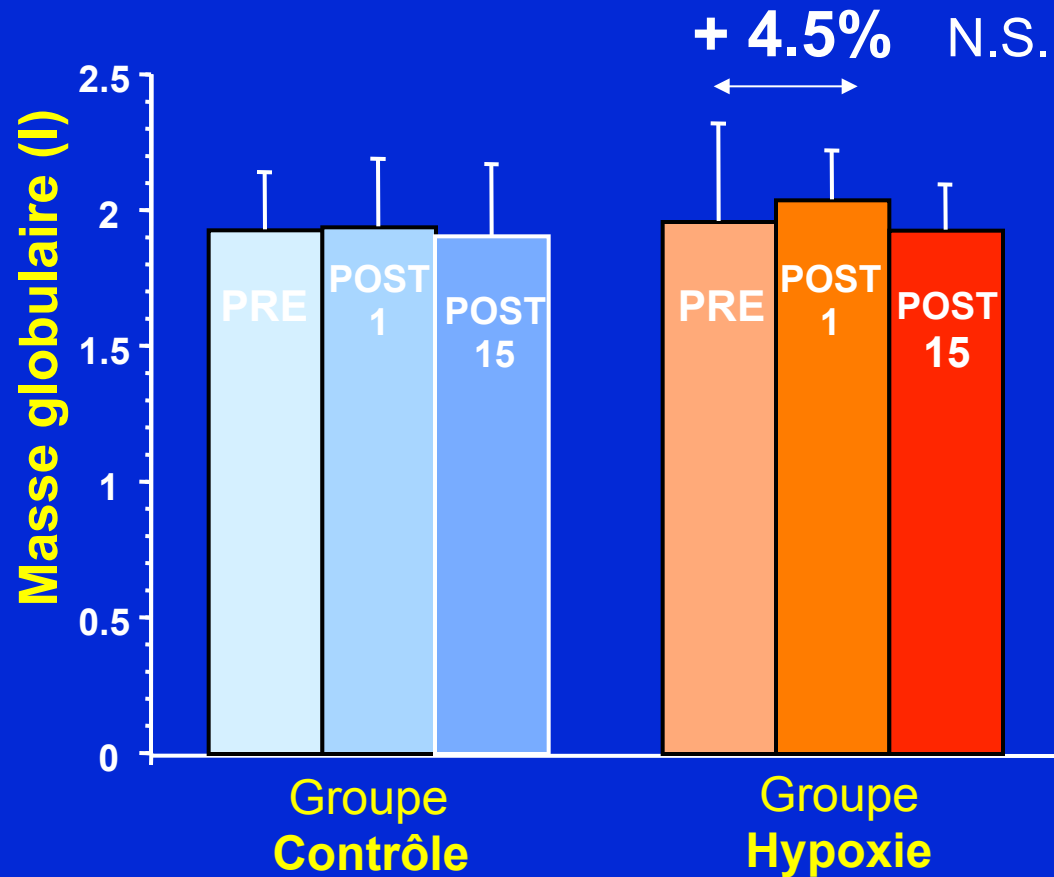


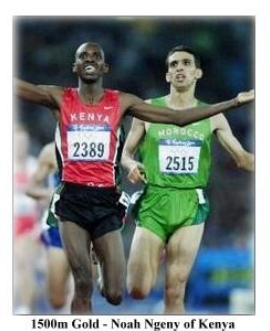
Performance ($\dot{V}O_{2\max}$)





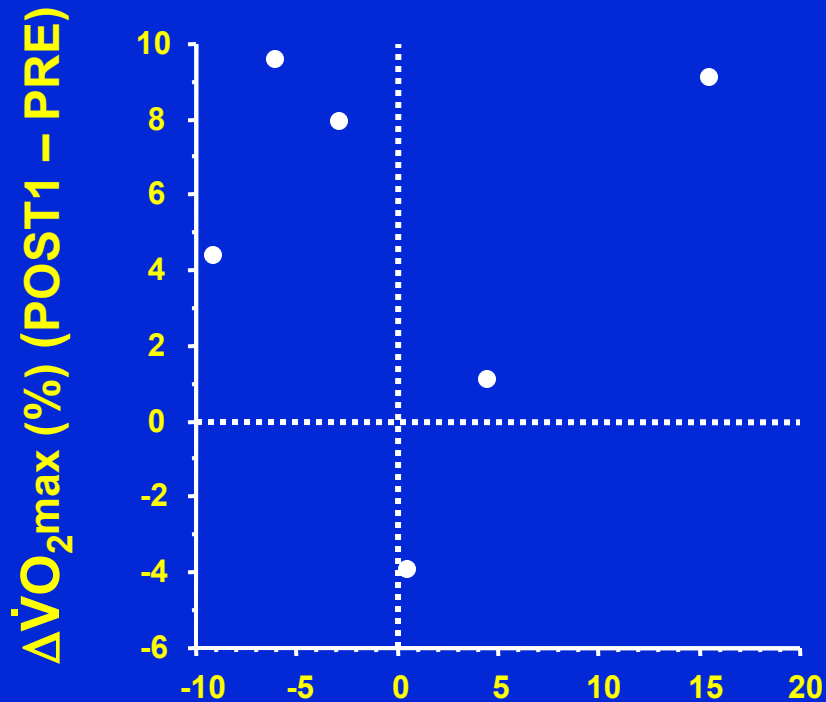
Masse globulaire totale



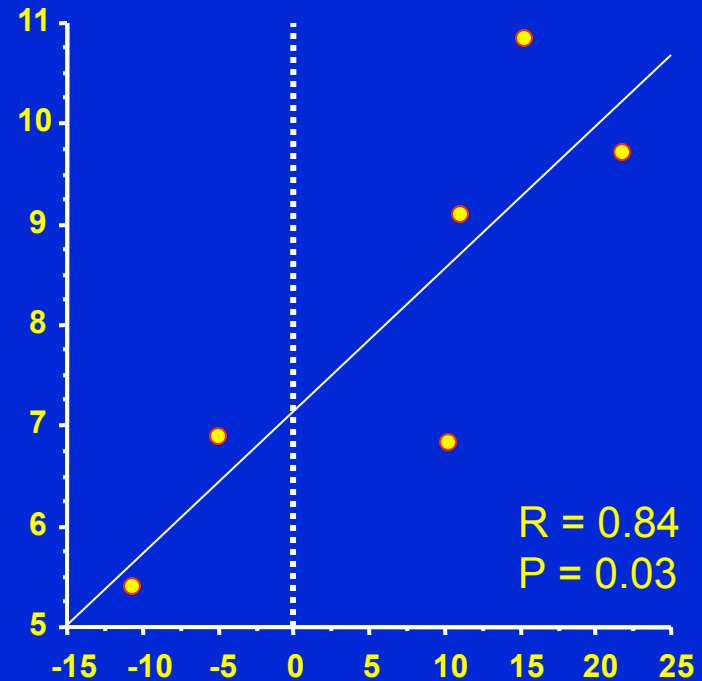


Variations de performance vs hémoglobine totale

Groupe contrôle



Groupe hypoxique



$\Delta nHb (\%) (POST1 - PRE)$

Masse Hb et VO_2max au niveau de la mer

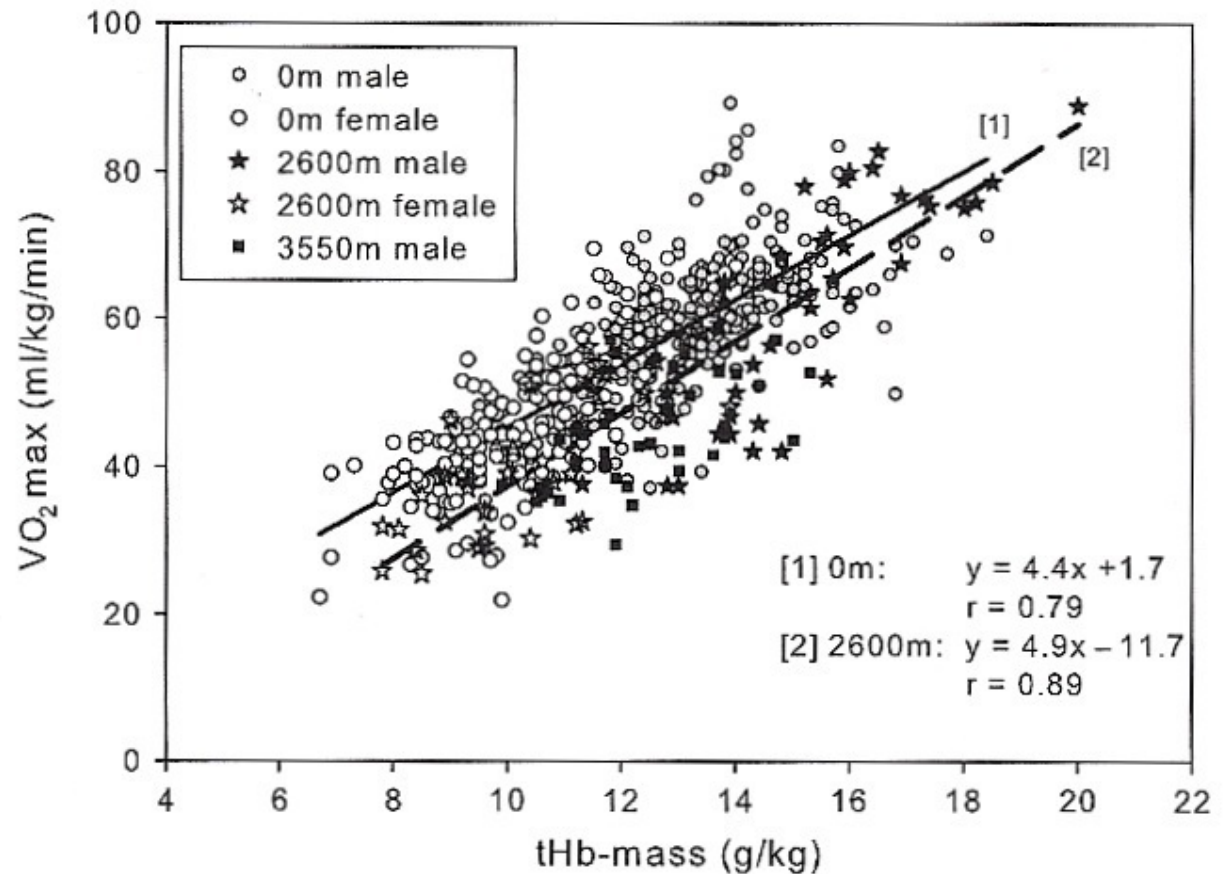


Fig. 2. Total hemoglobin mass (tHb-mass) vs $\text{VO}_{2\text{max}}$. Presented are relative values of 611 subjects native to lowland and to 2600 m, as well as natives and adapted subjects to 3550 m.

Augmentation
de la masse
de Hb en
fonction de la
durée de
l'exposition à
l'altitude.

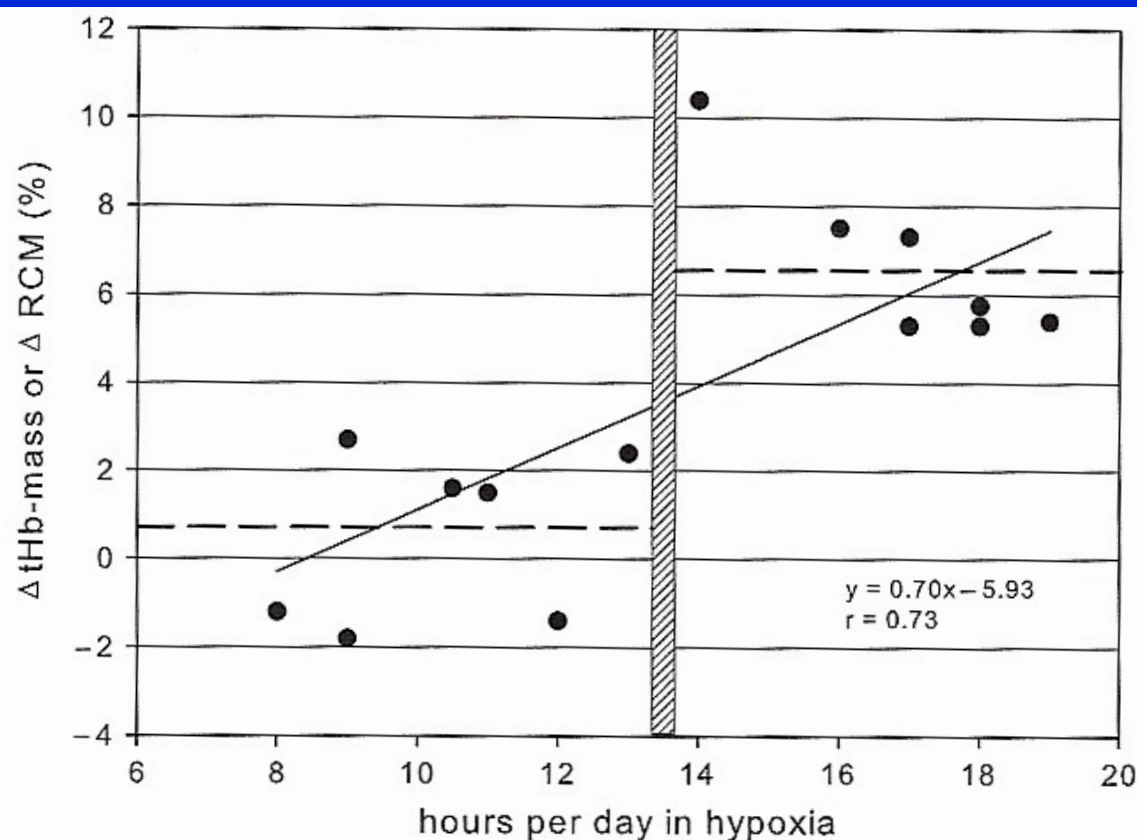
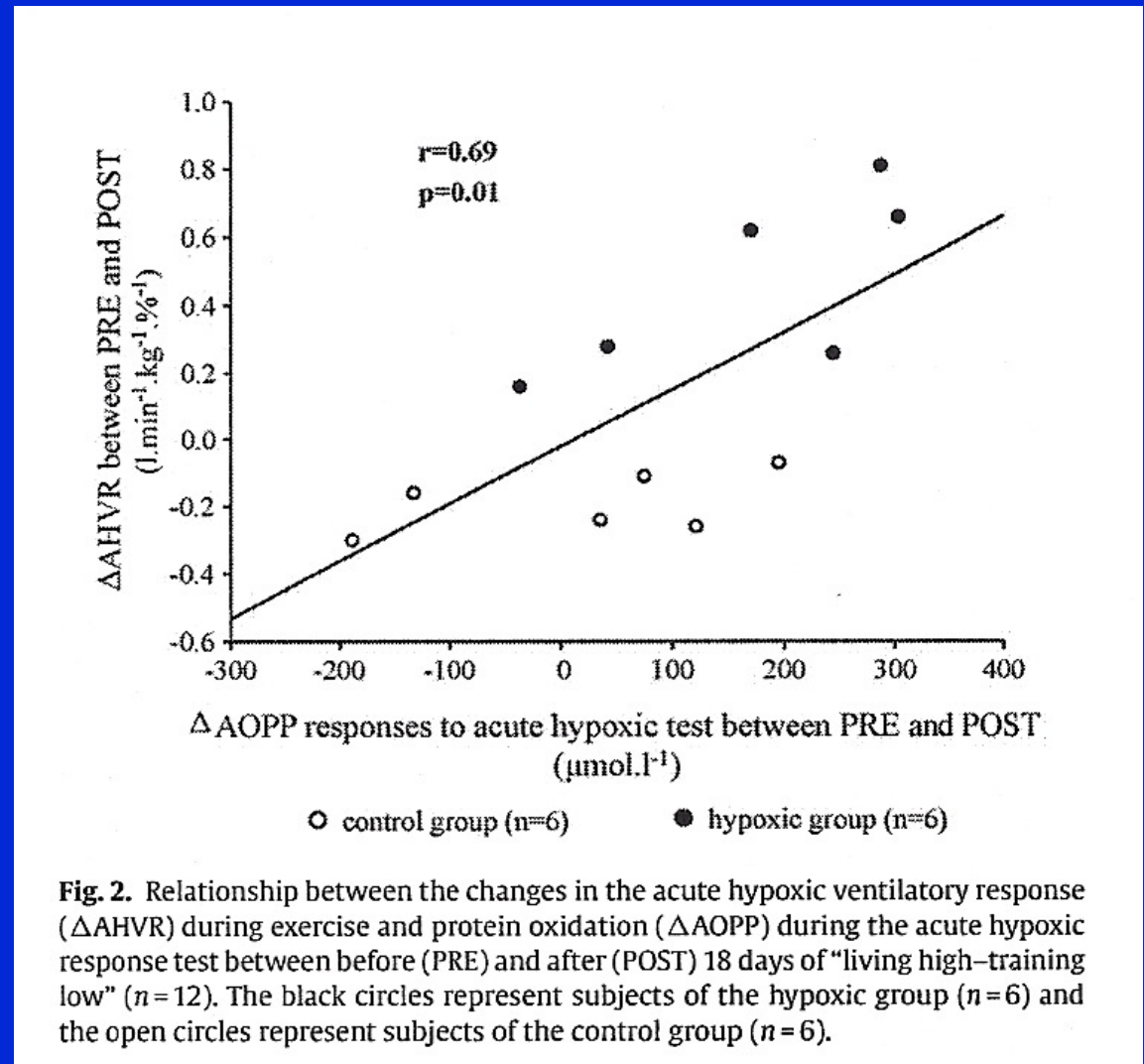
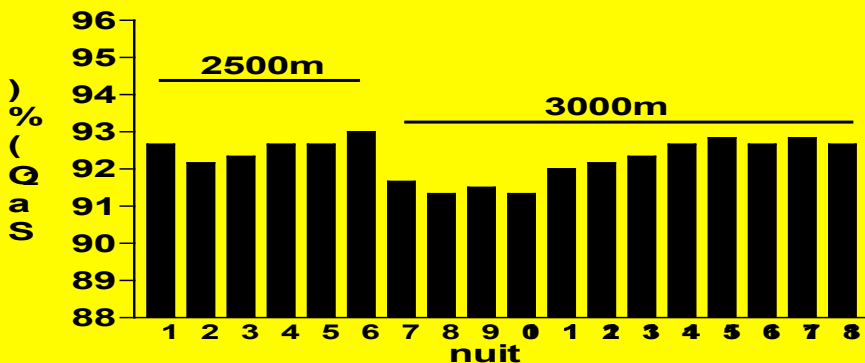
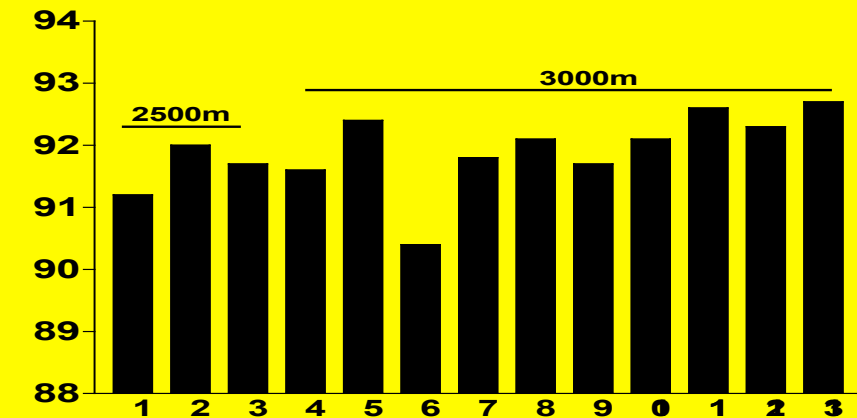
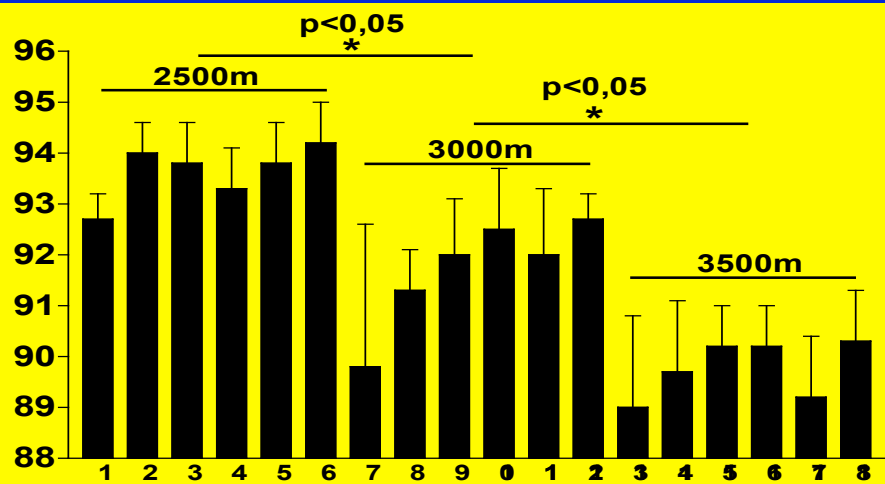


Fig. 4. Percentage changes in mean tHb-mass or red cell mass during LH-TL protocols in relation to the hours of daily exposure to hypoxia. For more information see Table 3. The horizontal lines indicate the mean change in tHb-mass for daily hypoxic exposures of less (left side) and of more (right side) than 14 h/day. tHb-mass, total hemoglobin mass; LH-TL, live high-train low.

Relation entre la réponse ventilatoire à l'hypoxie et le stress oxydatif pendant une session LH-TL



Saturation nocturne en oxygène (SaO₂)



Le sommeil en hypoxie s'accompagne d'épisodes de **désaturation**, sans conséquences sur la santé de l'athlète

Au total

L'altitude optimale pour la méthode LH-TL est de **3000m** (atteinte progressivement en 4 jours), avec une durée de stage qui doit au moins égal **18 jours** et une durée d'exposition journalière à l'hypoxie d'au moins **12h/24h**.

Les modifications physiologiques engendrées **s'estompent progressivement** à l'arrêt du stage, mais certains effets physiologiques peuvent persister au moins jusqu'à **15 jours après le stage**.

Elles peuvent jouer un rôle important dans le bénéfice acquis lors de **l'entraînement post-stage**.

Référence: Numéro spécial du « Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports » Vol 18, Août 2008

Procédures d'entraînement en hypoxie actuellement utilisées

III. Entraînement en haute altitude et vie en basse altitude : LL - TH

- altitude vraie : entraînement en station de ski sur glaciers, résidence en fond de vallée
- altitude simulée : systèmes mélangeurs de gaz (type Altitrainer®)

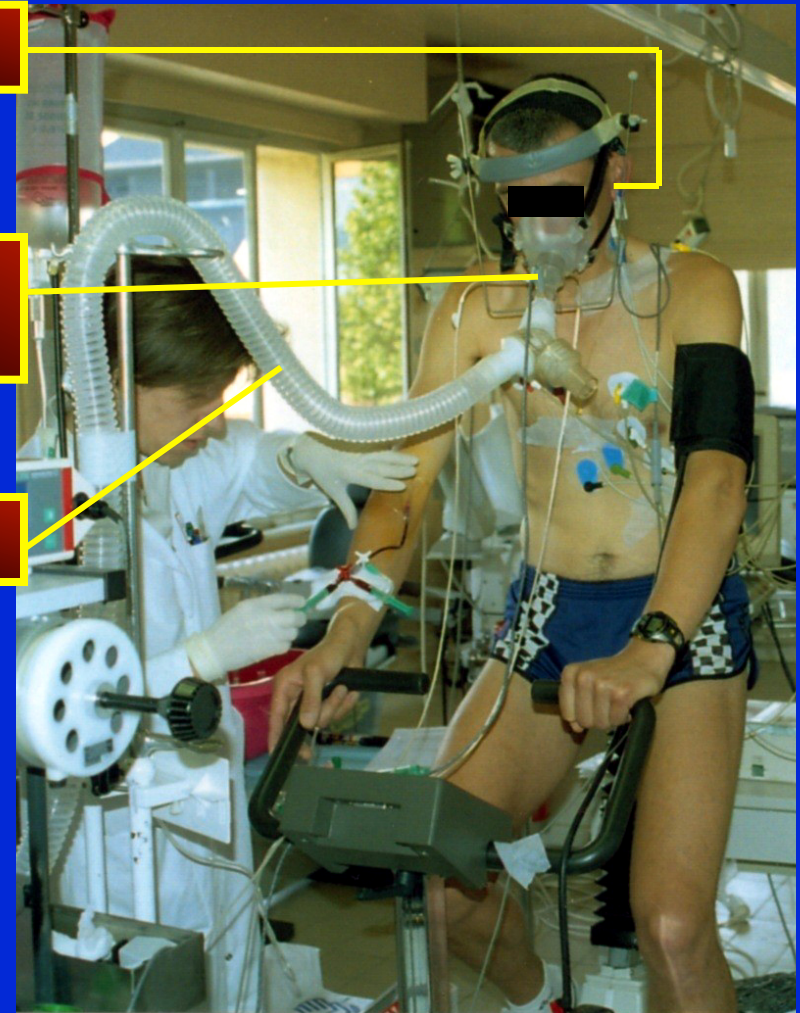
Strasbourg, Berne, Montpellier



saturation

Echanges gazeux

Altitrainer



Conclusion générale

- La méthode classique **LH-TH** n' a pas encore pleinement montré son efficacité.
- La méthode **LH-TL** a montré de nombreux effets bénéfiques sur la performance en endurance.
D' autres sports pourraient en bénéficier.
- La **combinaison** des techniques LH-TL + LL-TH est l' objet d' études nouvelles.
- La question « **éthique** » n' a pas encore été tranchée

Hypoxia/Exercise as a tool for prevention of diseases ("hypoxic conditioning")

- **Hypoxic pre-conditioning:**
Exposure to the hypoxic stimulus before the pathological event, to prevent it or mitigate its adverse effects
- **Hypoxic post-conditioning:**
Exposure to the hypoxic stimulus after the pathological event, to stimulate healing processes or prevent recurrences

Conditions that may benefit from hypoxic conditioning

- Obesity and metabolic troubles
 - Decrease in body weight, fat mass, plasma triglycerides and insulin (Haufe et al., 2008; Netzer et al., 2008), decrease in hunger via decrease in ghrelin (Bailey et al., 2015)
- Cardiovascular diseases
 - Coronary disease, post-infarct rehabilitation, hypertension, cardiac failure (del Pilar Valle et al., 2006; Vona et al., 2006; Saeed et al., 2012)

Hypoxia and cardiac failure

- Clinical study at Montefiore Medical Center (Bronx, USA)
- 12 patients with chronic heart failure
 - $EF_{LV} < 35\%$, mean age 52.5 yrs
- 3-4 hours/day, 3 days/week, 3 semweeksaines
- From 1500 m to 2700m

VO_2 max increased and stayed higher after 4 weeks

Amelioration of the 6min walk test

Amelioration of muscle strength

Amelioration of quality of life score

Tendency for increasing EF_{LV}

No adverse effects



Saeed et al. J Card Fail, 2012

Conditions that may benefit from hypoxic conditioning (continued...)

- Neurological and cerebrovascular diseases
 - After a cerebro-vascular accident, hypoxic post-conditioning may improve recovery of cognitive performance, by increasing neurogenesis and favoring neuroplasticity (Schega et al., 2013)
- Respiratory diseases
 - Obstructive sleep apneas (Mateika et al., 2017)
 - COPD (Haider et al., 2009)

Unexpected survival advantage in elderly people with moderate sleep apnoea.

Lavie P, Lavie L. J Sleep Res 2009;18:397–403

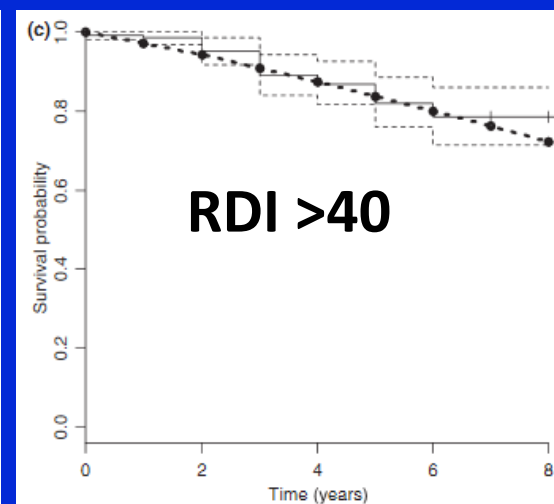
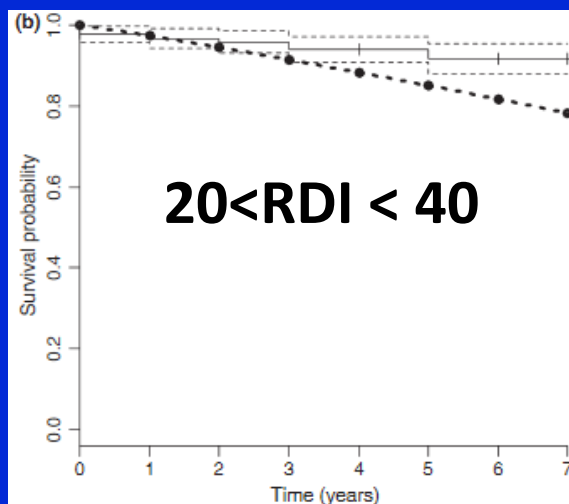
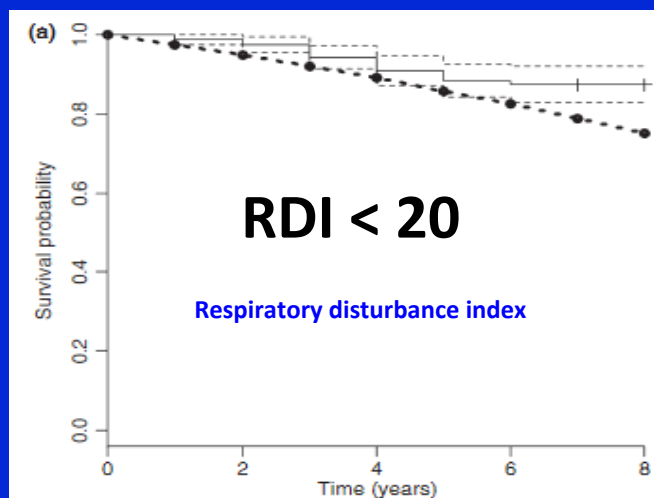


Table 1 Expected and observed number of deaths and standardized mortality rates for the entire cohorts and subgroups divided by sleep apnoea severity

	<i>Expected number of deaths</i>	<i>Observed number of deaths</i>	<i>Standardized mortality rate</i>	χ^2	<i>P</i>
Entire cohort <i>n</i> = 602	108.64	73	0.67	11.69	0.0006
RDI < 20, <i>n</i> = 242	39.38	28	0.71 ± 0.19	3.28	0.07
40 ≥ RDI ≥ 20, <i>n</i> = 214	40.44	17	0.42 ± 0.24	13.59	0.0002
RDI > 40, <i>n</i> = 146	28.81	28	0.97 ± 0.19	0.023	NS

RDI, respiratory disturbance index; NS, not significant.

Perspectives

- Many pathological conditions may benefit from hypoxia associated (or not) with exercise
- A **precise dose** of hypoxia/exercise **adapted** to each pathology and each patient is necessary to optimize the training protocol, because the boundary between deleterious and beneficial effects can be hard to determine.
- Exploration of the **cellular mechanisms involved** is necessary (HIF, VEGF, EPO, etc... ??)