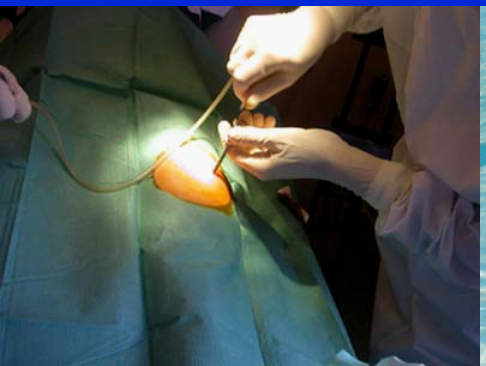
Altitude, entraînement, performance

Pr. Jean-Paul Richalet

INSERM U 1272

“Poumon et hypoxie”

Université Paris 13



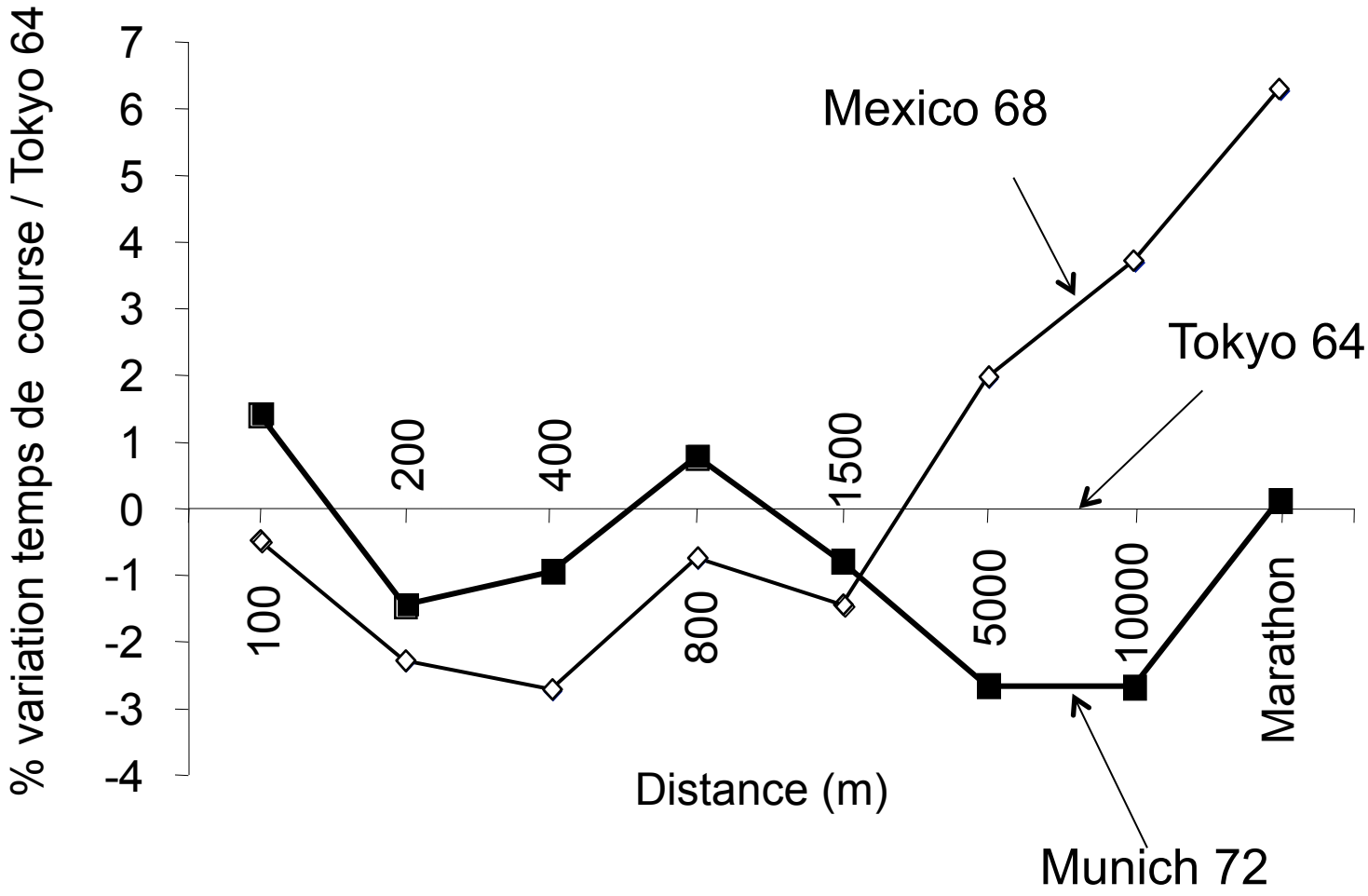
Tignes, 2019

Jeux olympiques et altitude: MEXICO, 1968

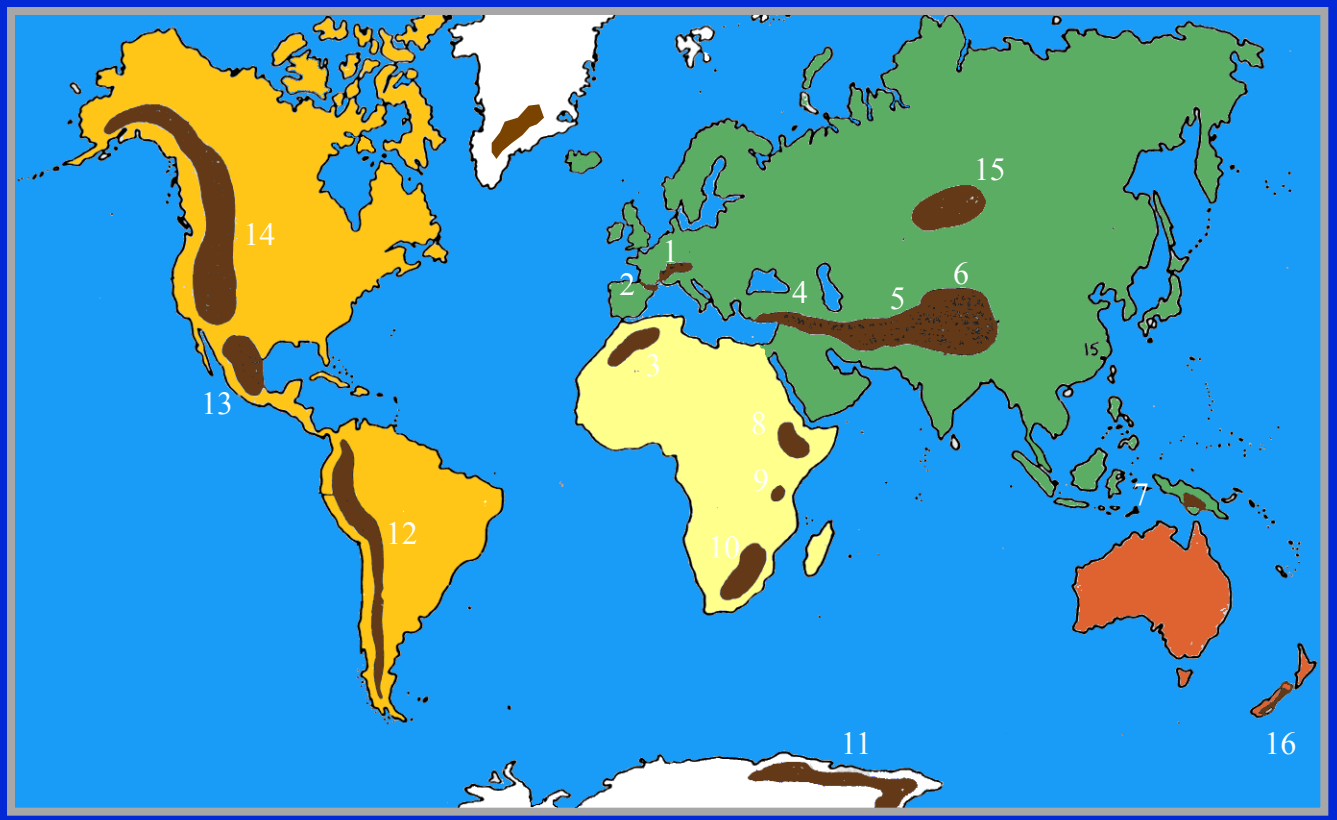
Bob Beamon, saut en longueur: 8.90 m, record du monde pendant 22 ans

Ron Clarke, 10000m: Épuisement à la fin de la course

Résultats en athlétisme aux Jeux Olympiques ‘64, ‘68 et ‘72



Les régions de haute altitude



En marron : régions où l ' altitude est supérieure à 3000 m

1. Alpes
2. Pyrénées
3. Atlas
4. Caucase, Iran, Afghanistan
5. Himalaya
6. Plateau tibétain
7. Nouvelle Guinée, Bornéo, Indonésie
8. Ethiopie
9. Kenya, Tanzanie
10. Drakensberg
11. Antarctique
12. Andes
13. Haut plateau mexicain
14. Montagnes rocheuses
15. Altaï
16. Nouvelle-Zélande
17. Groenland

Les coureurs d’Afrique de l’Est
Kénya - Ethiopie

Marathon en haute altitude: Cerro de Pasco - Pérou: 4300 m

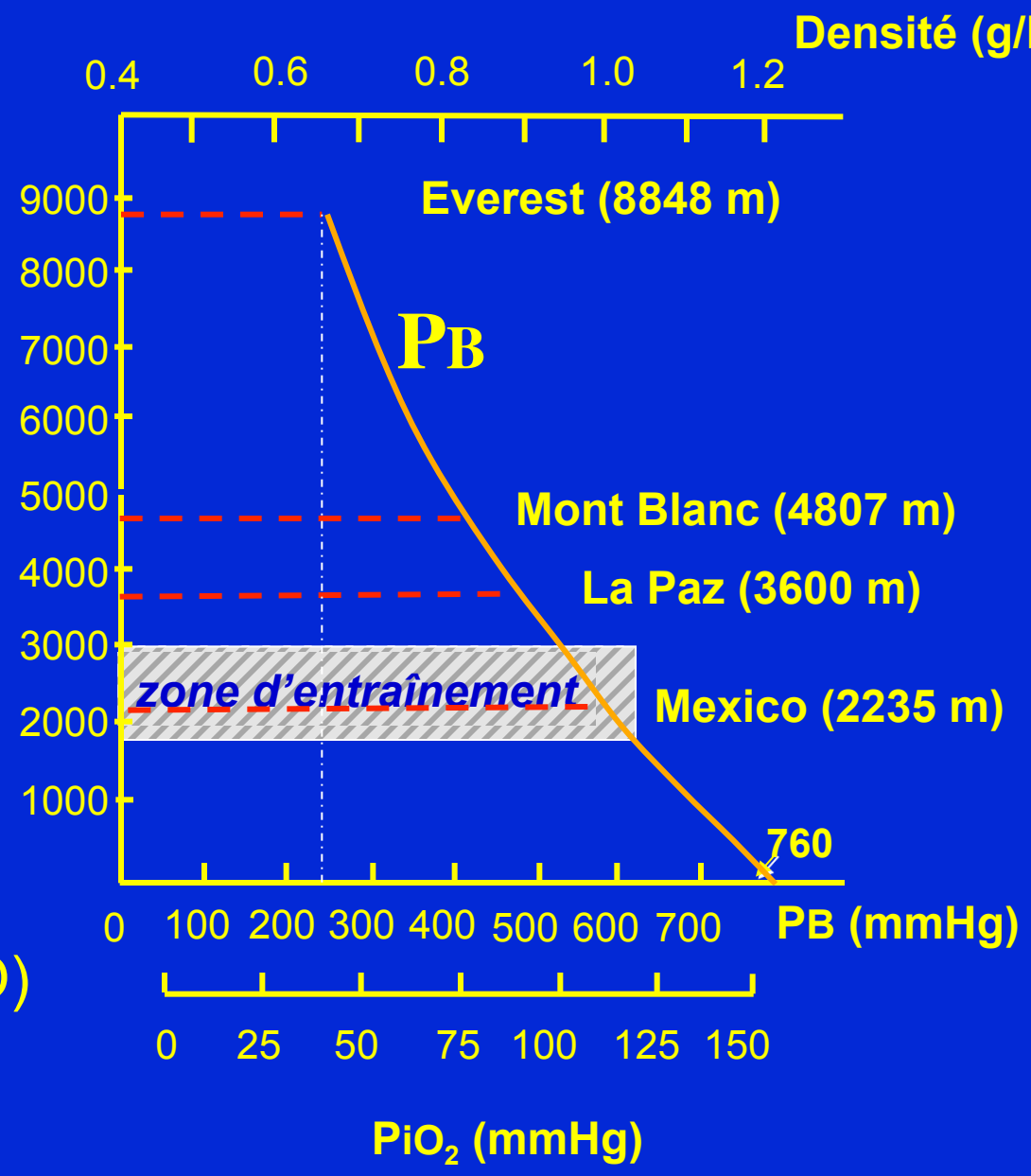
La Paz, Bolivie, 3400-4050 m

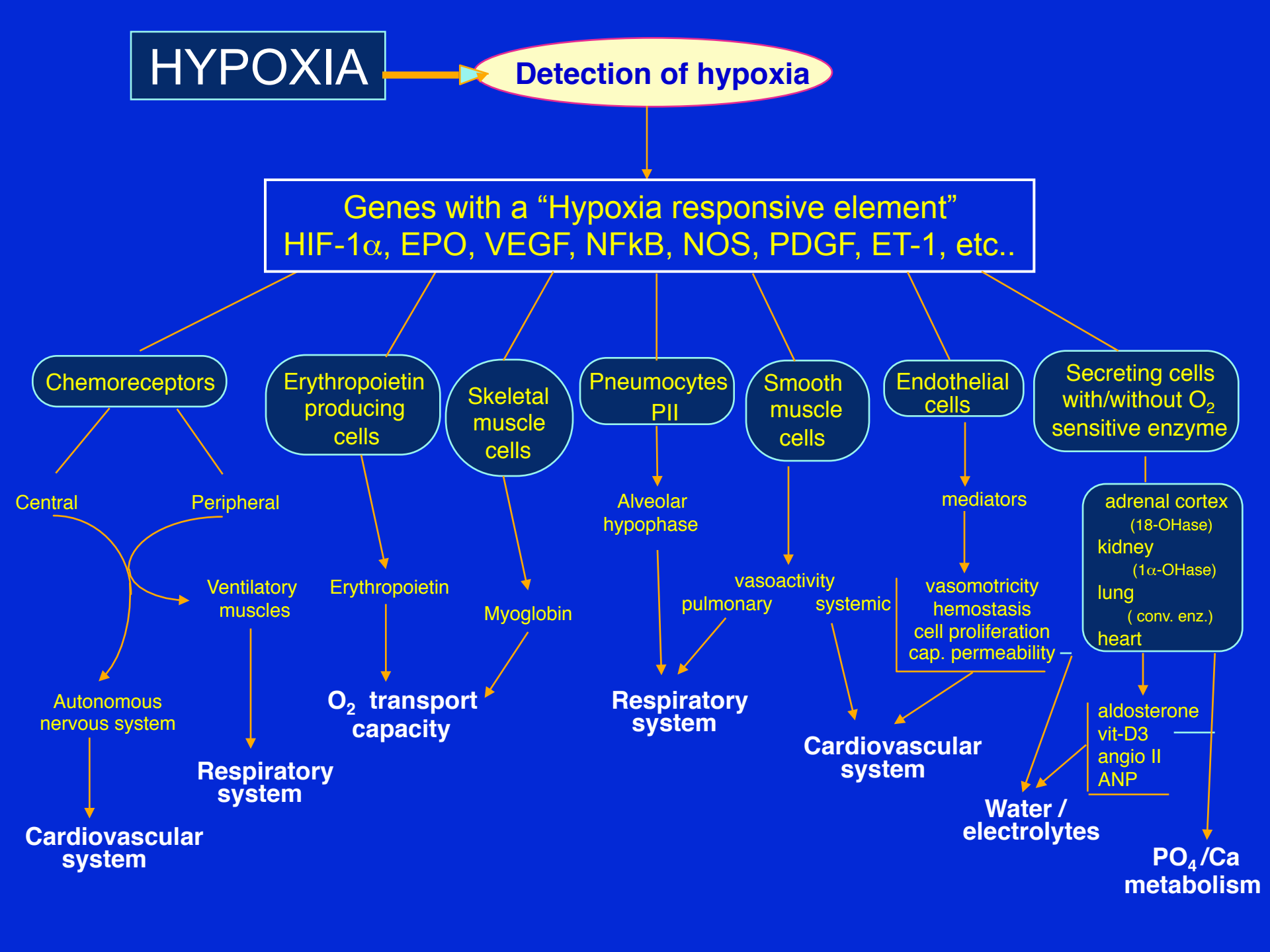
1er avril 2009…
Bolivie - Argentine : 6 - 1

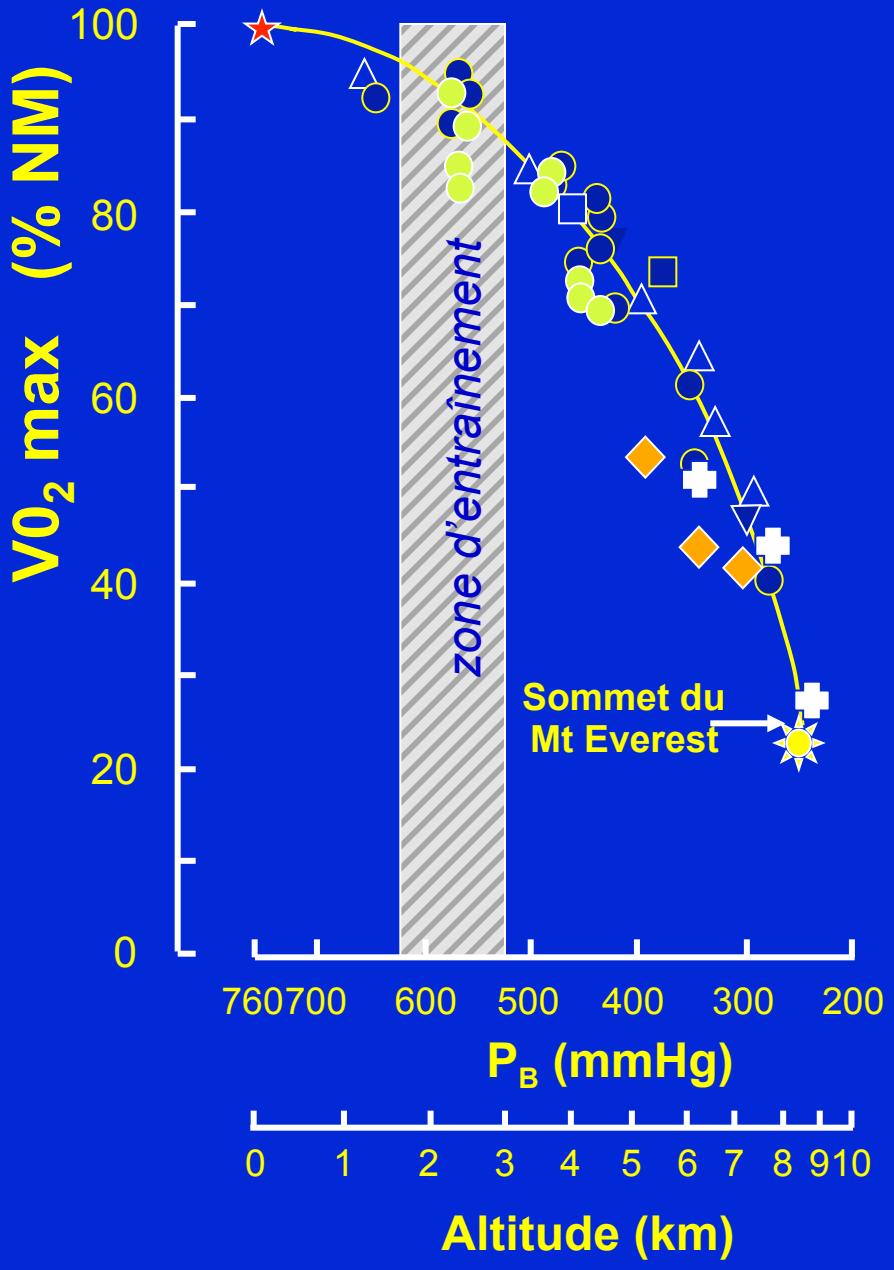
Diminution de la pression barométrique et de la densité de l'air avec l'altitude

HYPOXIE =
Manque d'oxygène

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




HYPOXIA
Detection of hypoxia
Genes with a "Hypoxia responsive element"
HIF-1α, 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 O_2 sensitive enzyme
Central
Peripheral
Ventilatory muscles
Autonomous nervous system
Cardiovascular system
Respiratory system
Erythropoietin
Myoglobin
O_2 transport capacity
Alveolar hypophase
Respiratory system
vasoactivity
pulmonary
systemic
Cardiovascular system
mediators
vasomotricity
hemostasis
cell proliferation
cap. permeability
adrenal cortex (18-OHase)
kidney (1α-OHase)
lung (conv. enz.)
heart
aldosterone
vit-D3
angio II
ANP
Water / electrolytes
PO_4 /Ca metabolism



La puissance aérobie maximale (VO_2max) diminue avec l'altitude

Il existe une grande variabilité individuelle

Pourquoi s'entraîner en hypoxie ?

HYPOXIE

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

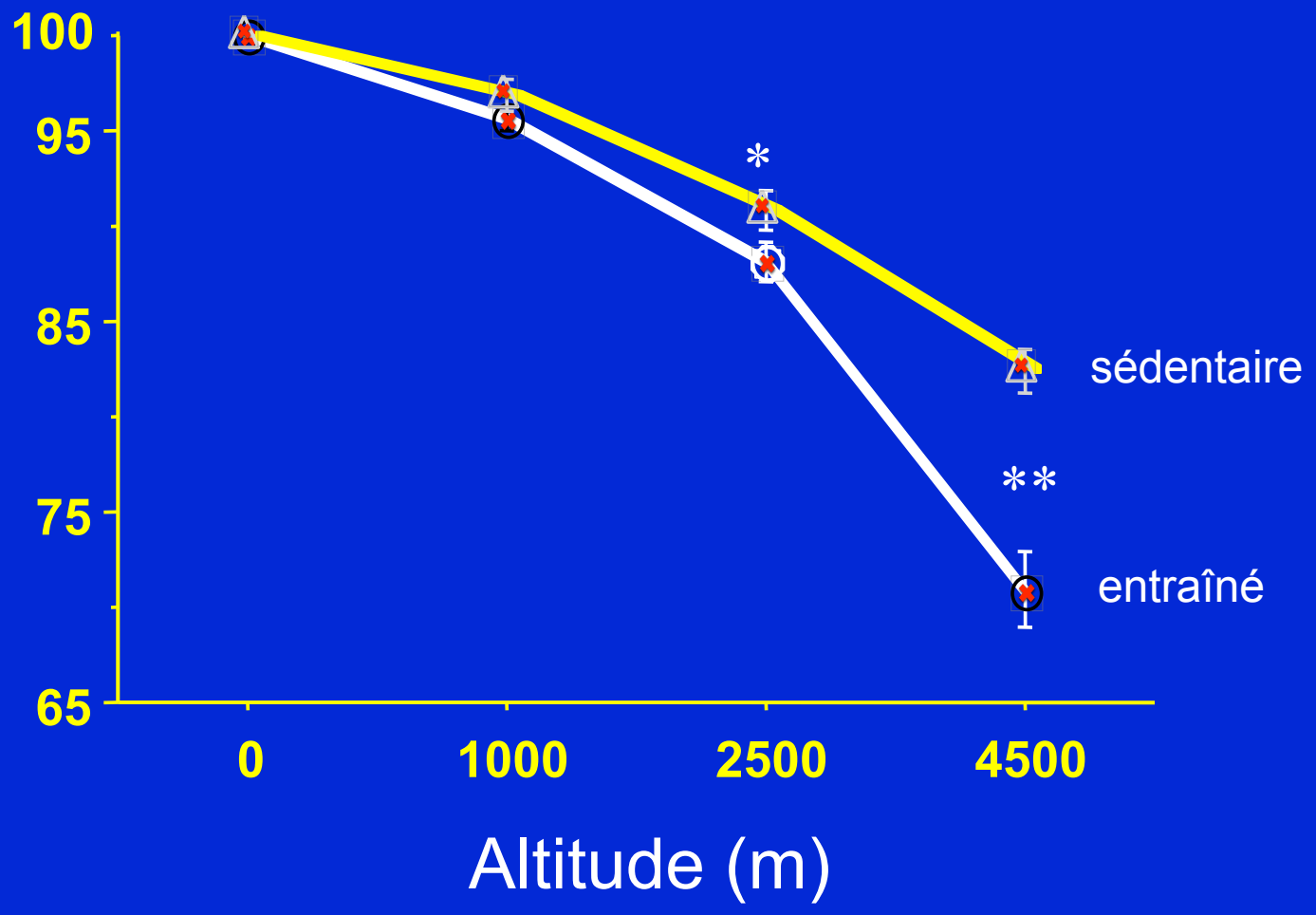
Modifie le métabolisme musculaire

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 !

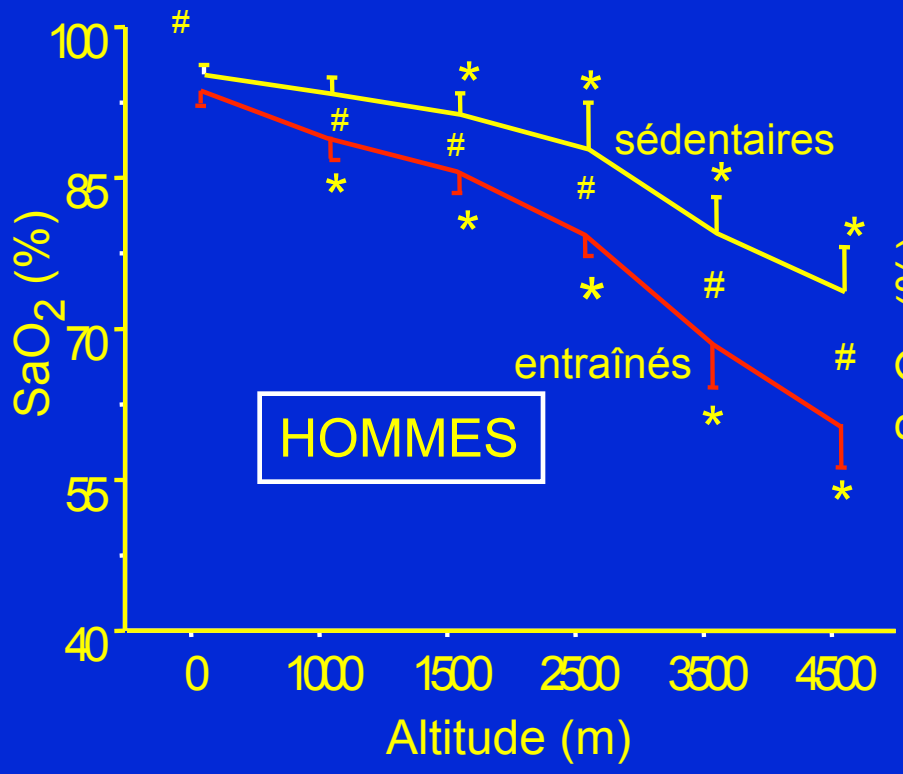
VO_2max (% du niveau de la mer)

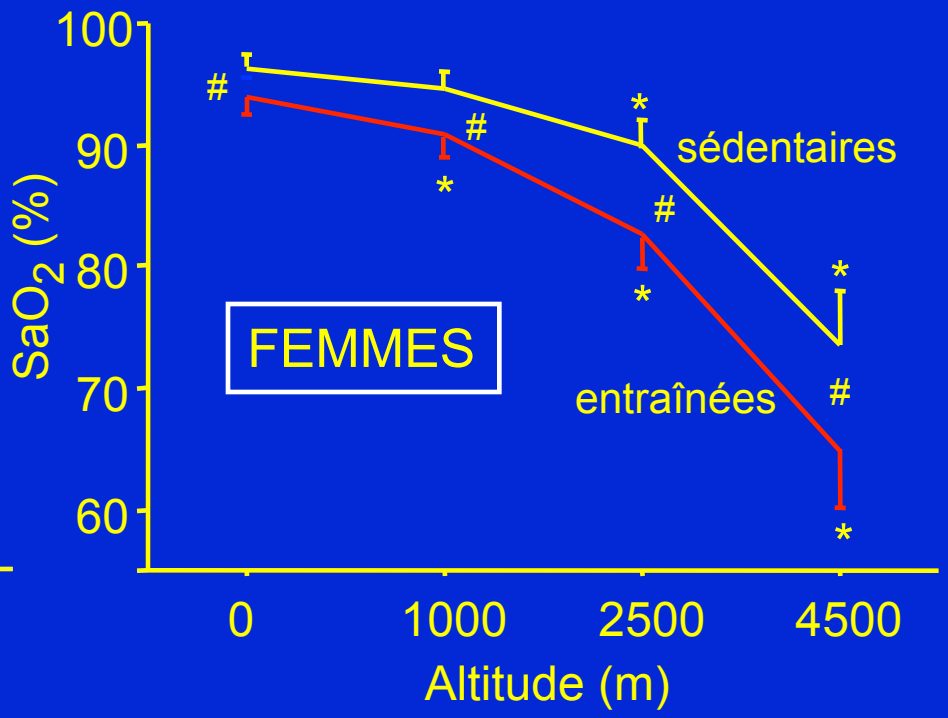


La diminution de VO_2max est plus forte chez les entraînés que chez les sédentaires

D'après Mollard et al., 2007

SaO_2 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

Mollard et al., 2006; 2007; Woorons et al., 2005

O_2 CO_2

Contrôle central

O_2 CO_2

Cœur droit

Cœur gauche

cellule

O_2 CO_2

Consommation d'oxygène

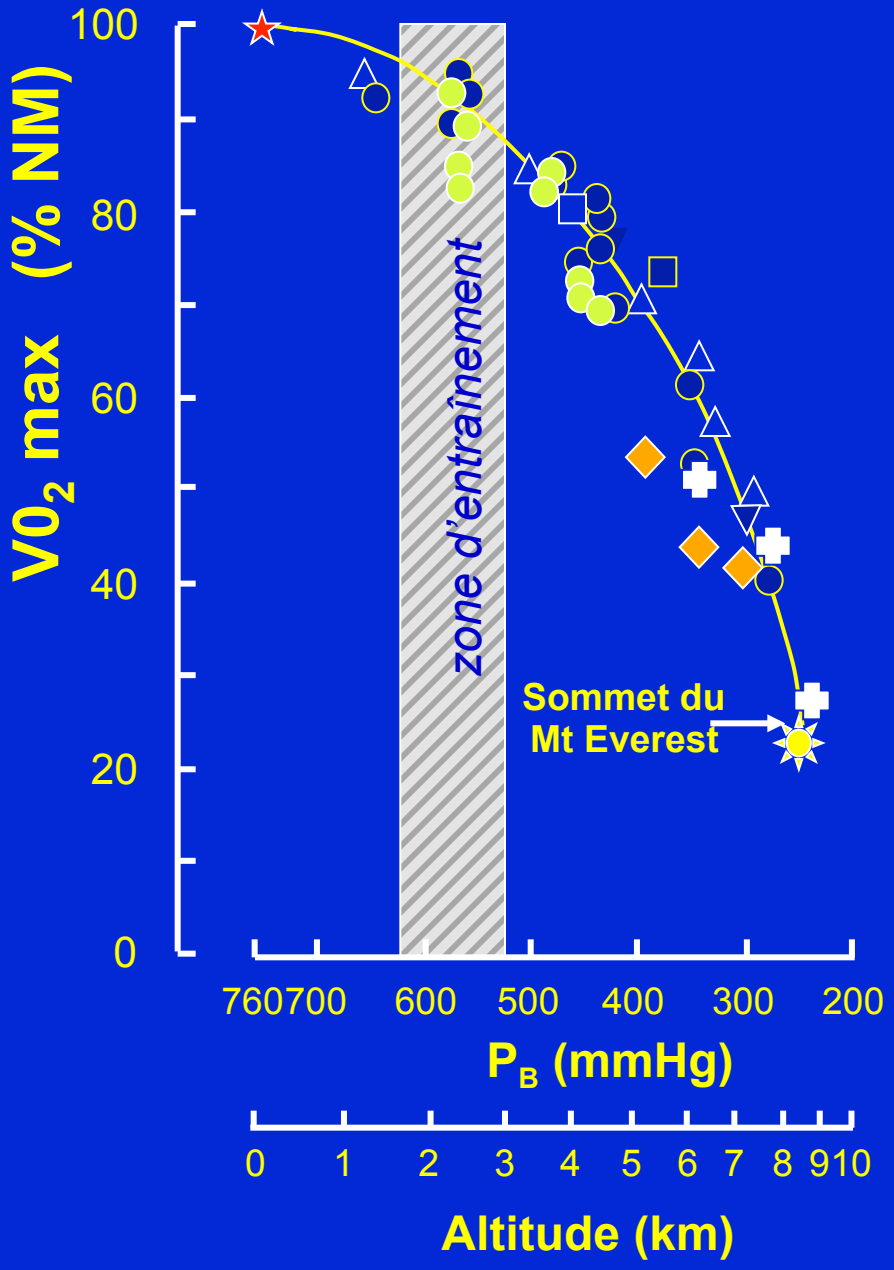
Ventilation pulmonaire : CONVECTION

Transfert alvéolo-capillaire en oxygène : DIFFUSION

Transport de l'oxygène par le sang : CONVECTION

Diffusion de l'oxygène vers les tissus : DIFFUSION

Production d'énergie aérobie

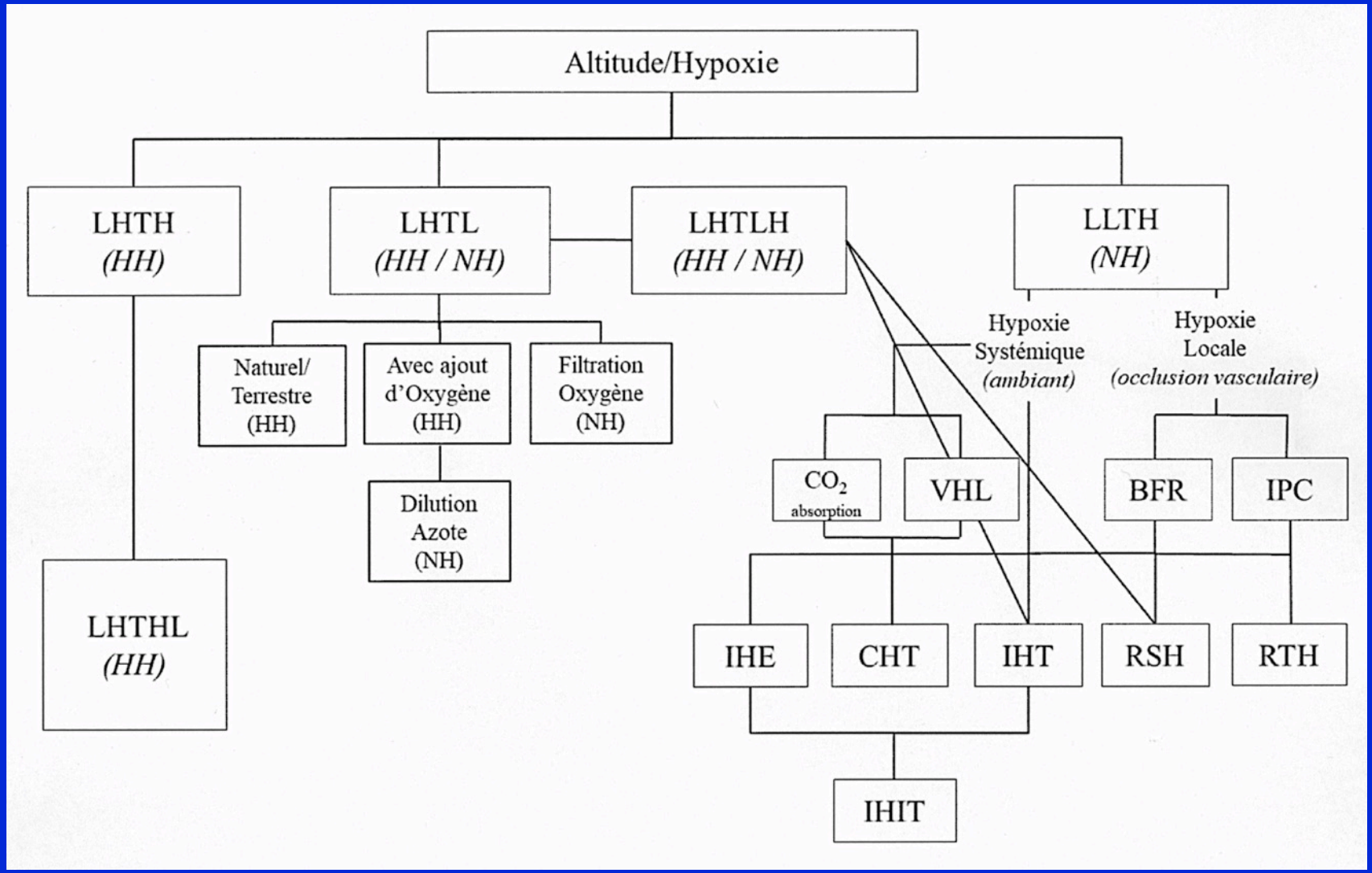


La puissance aérobie maximale ($\dot{V}O_2max$) diminue avec l'altitude

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

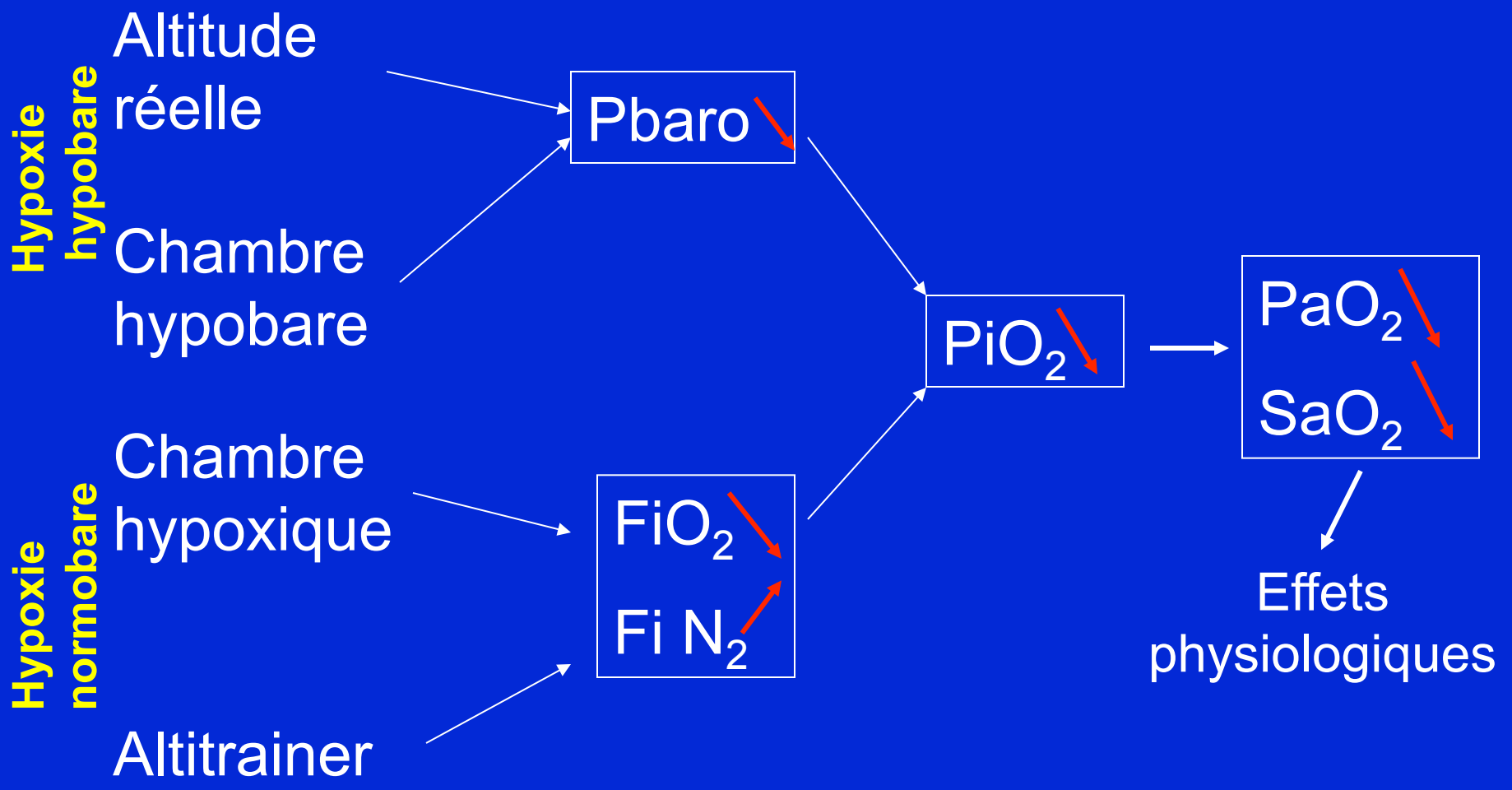
60% VO_2max au niveau de la mer = 80% VO_2max à 2500m

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



D'après Girard, 2017 et Millet, 2013

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.

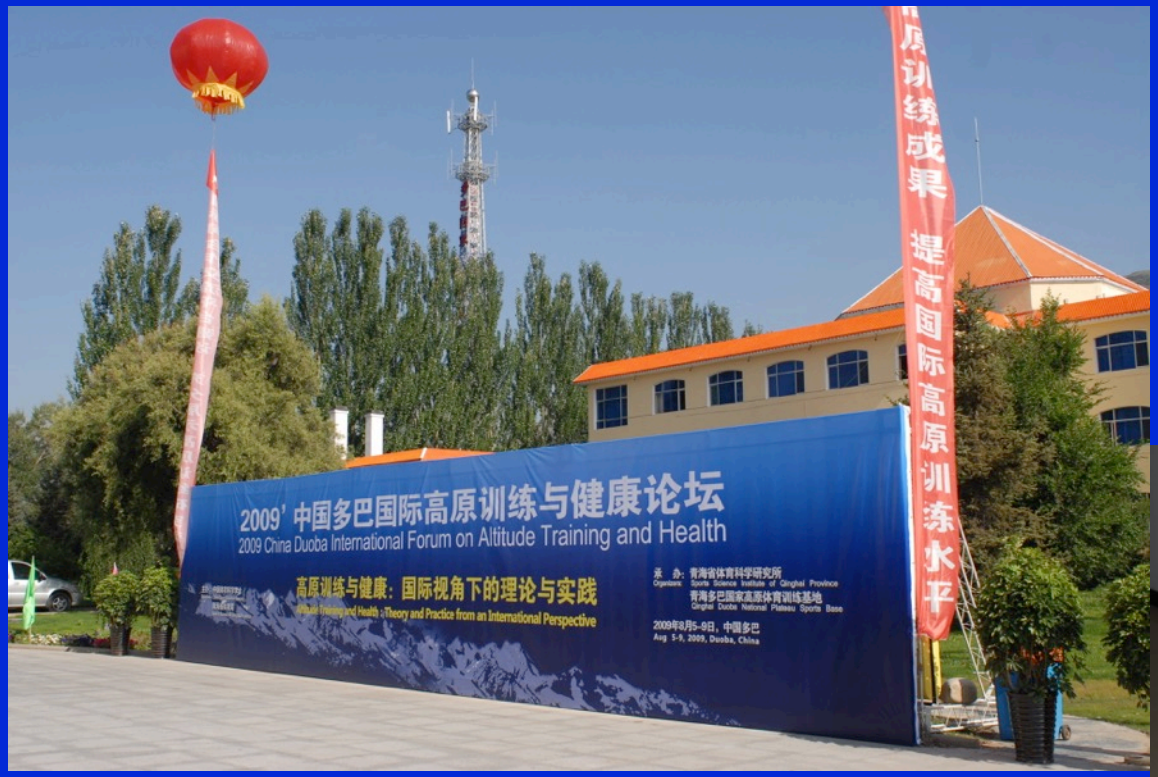
EUROPE :
- Sierra Nevada (Espagne) 2320 m.
- Font-Romeu (France) 1850 m.
- Tignes (France) 2000 m
- Saint-Moritz (Suisse) 1850 m.
- Davos (Suisse) 1560 m.
- Belmeken (Bulgarie) 2050 m.
- Erevan (Arménie) 1200 m.

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

ASIE :
- Nobeyama (Japon) 1400 m.

Sierra Nevada, 2320m

Centre d’entraînement de Duoba – Xining – 2300m



FONT-ROMEU (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 controlées:

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"

Procédures d'entraînement en hypoxie actuellement utilisées

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

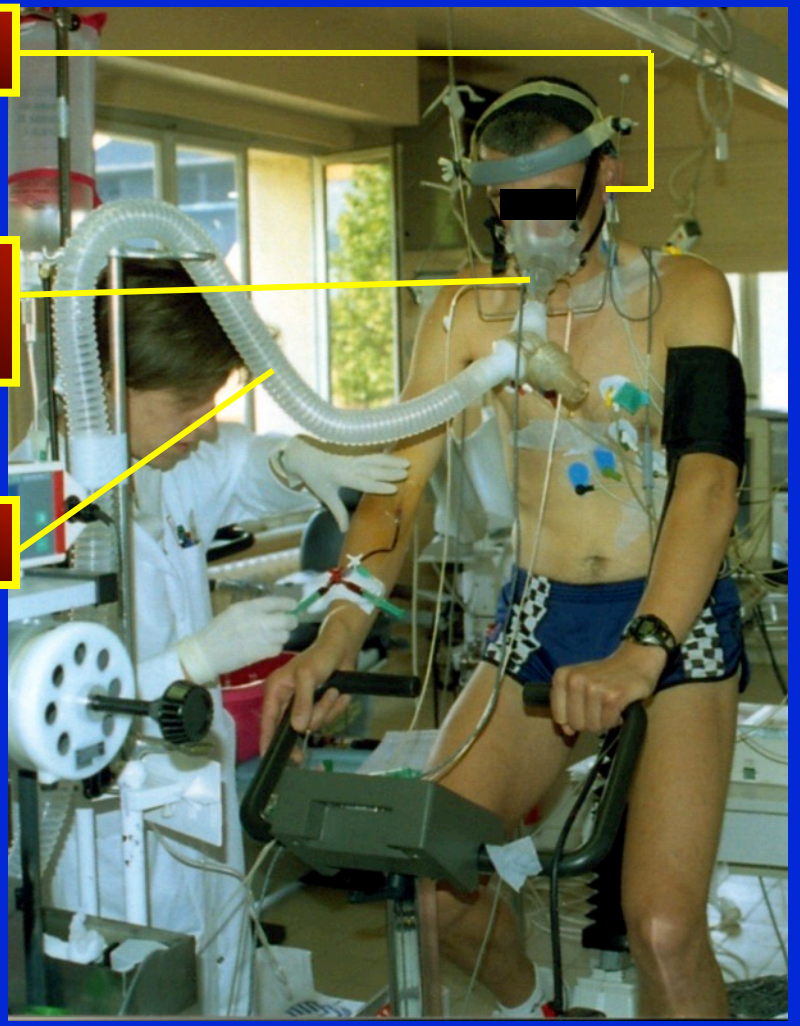
- altitude vraie : entraînement en station de ski sur glaciers, résidence en fond de vallée
- altitude simulée : systèmes mélangeurs de gaz (type Altitrainer®)

Strasbourg, Berne, Montpellier

saturation

Echanges gazeux

Altitrainer



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

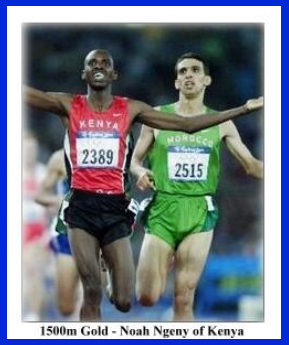
Chambre hypoxique

Contrôle de la saturation artérielle en O_2

Contrôle de O_2 et CO_2 dans l'air ambiant

Salle de contrôle

Prémanon, Jura, France



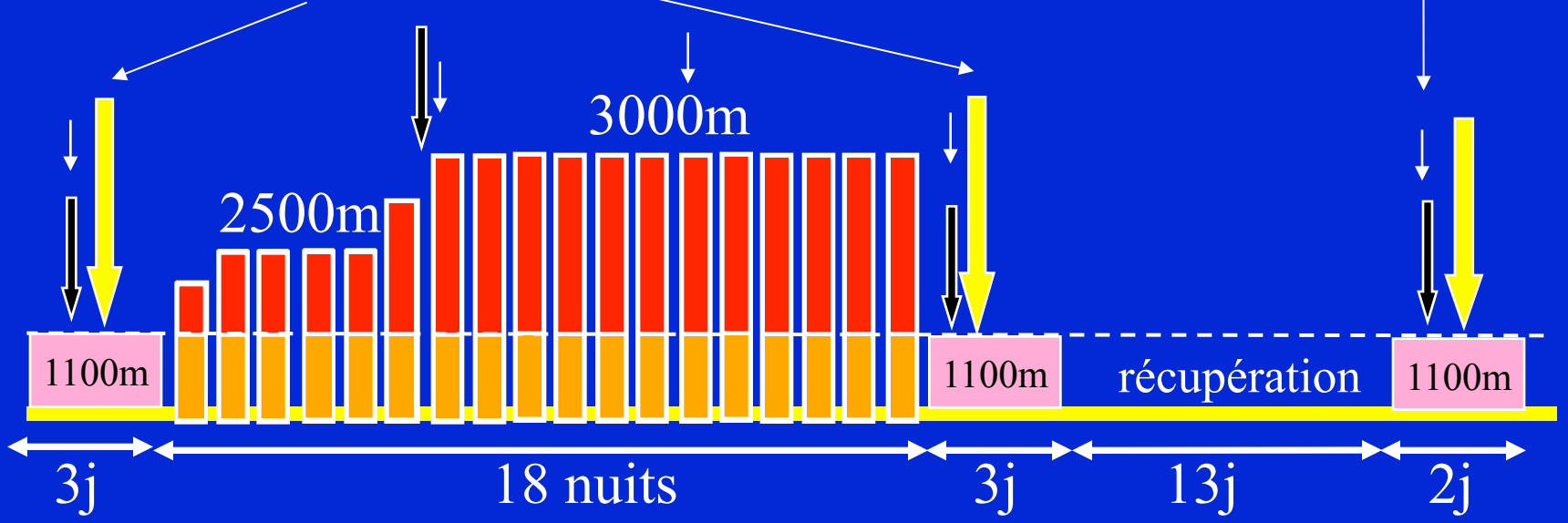
1500m Gold - Noah Ngeny of Kenya

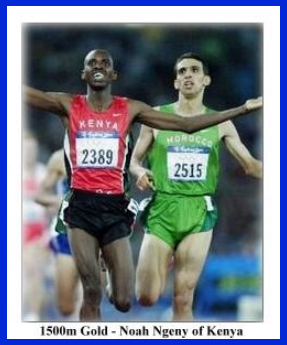
Athlétisme

Hypoxie
Témoin
Tests
analyse de sang, TDF

- VO_{2max} (tapis roulant)
- test piste 10 min à 90% de V.M.A.
- Analyse de sang, VP
- Test hypoxie
- TFM, TDF
- questionnaires

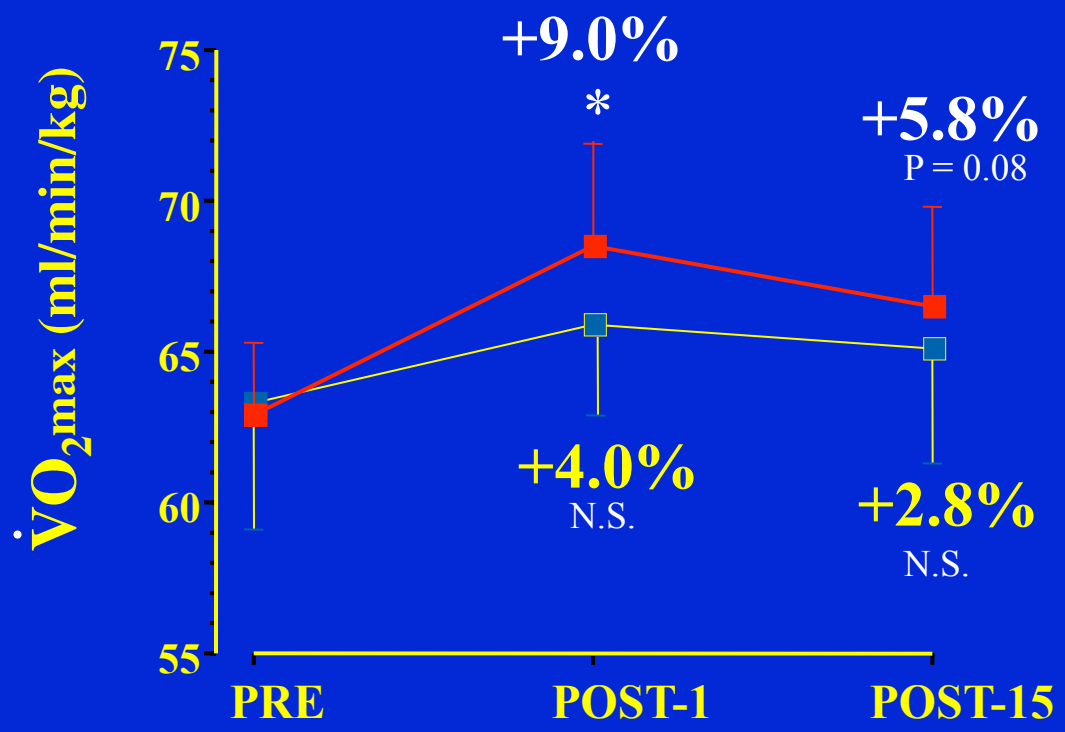
- vO2 max (tapis roulant)
- Test piste 10 mn à 90% VMA
- Analyse de sang, VP
- TFM, TDF
- questionnaires





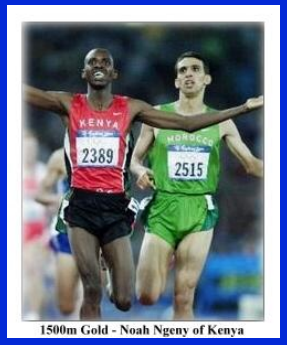
1500m Gold - Noah Ngeny of Kenya

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



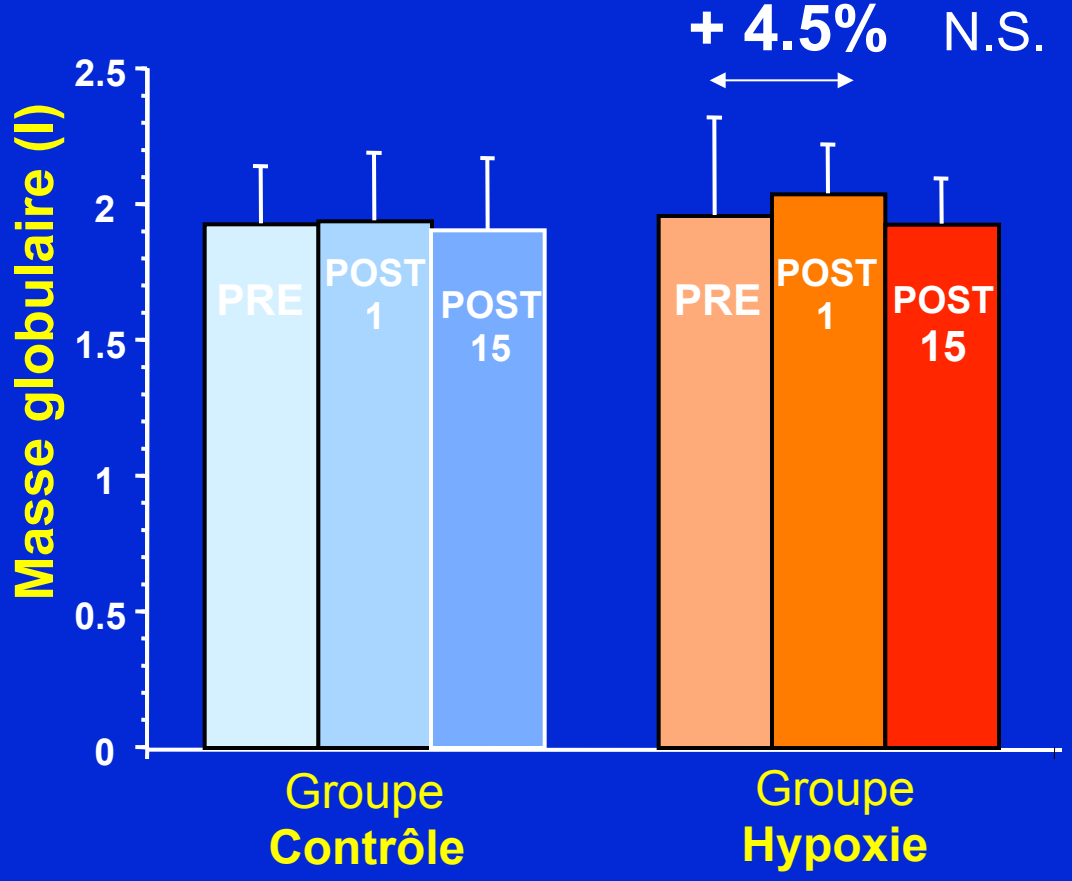
- Contrôle (n=6)
- Hypoxie (n=6)

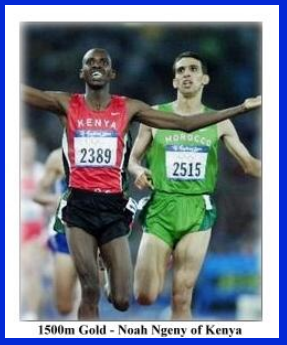
* P<0.05 vs PRE



1500m Gold - Noah Ngeny of Kenya

Masse globulaire totale



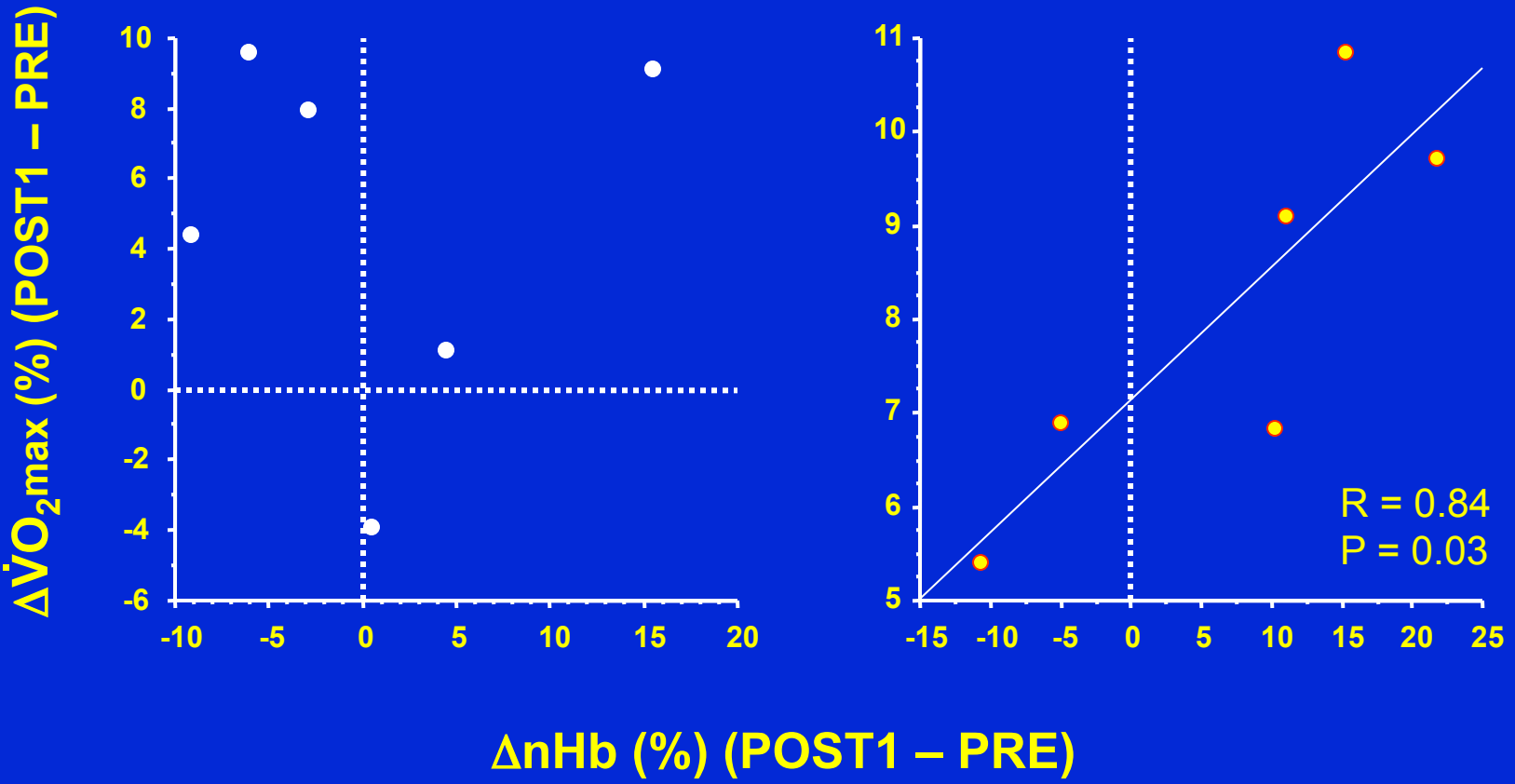


1500m Gold - Noah Ngeny of Kenya

Variations de performance vs hémoglobine totale

Groupe contrôle

Groupe hypoxique



Masse Hb et VO_2max au niveau de la mer

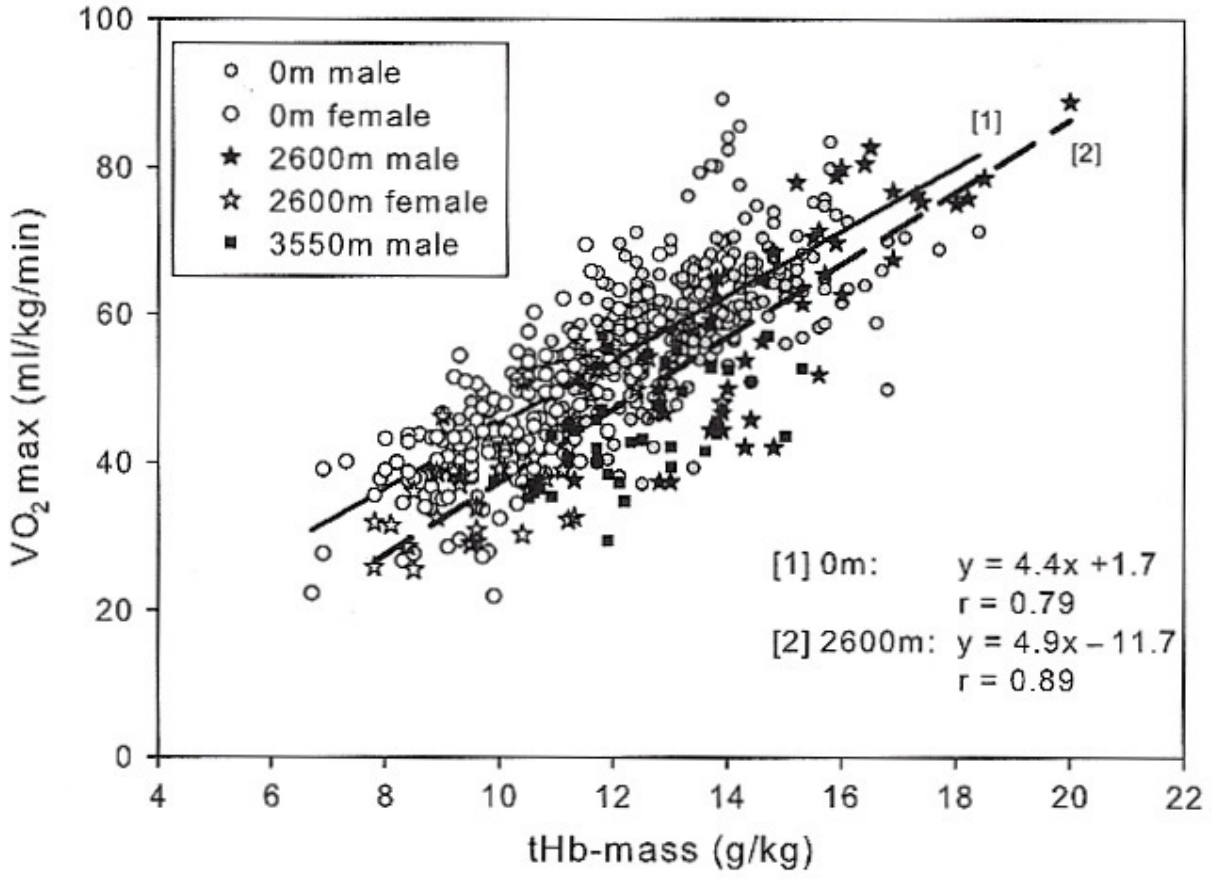


Fig. 2. Total hemoglobin mass (tHb-mass) vs VO_{2max}. Presented are relative values of 611 subjects native to lowland and to 2600 m, as well as natives and adapted subjects to 3550 m.

From: Schmidt and Prommer, *Scand J Med Sci Sports* 2008

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

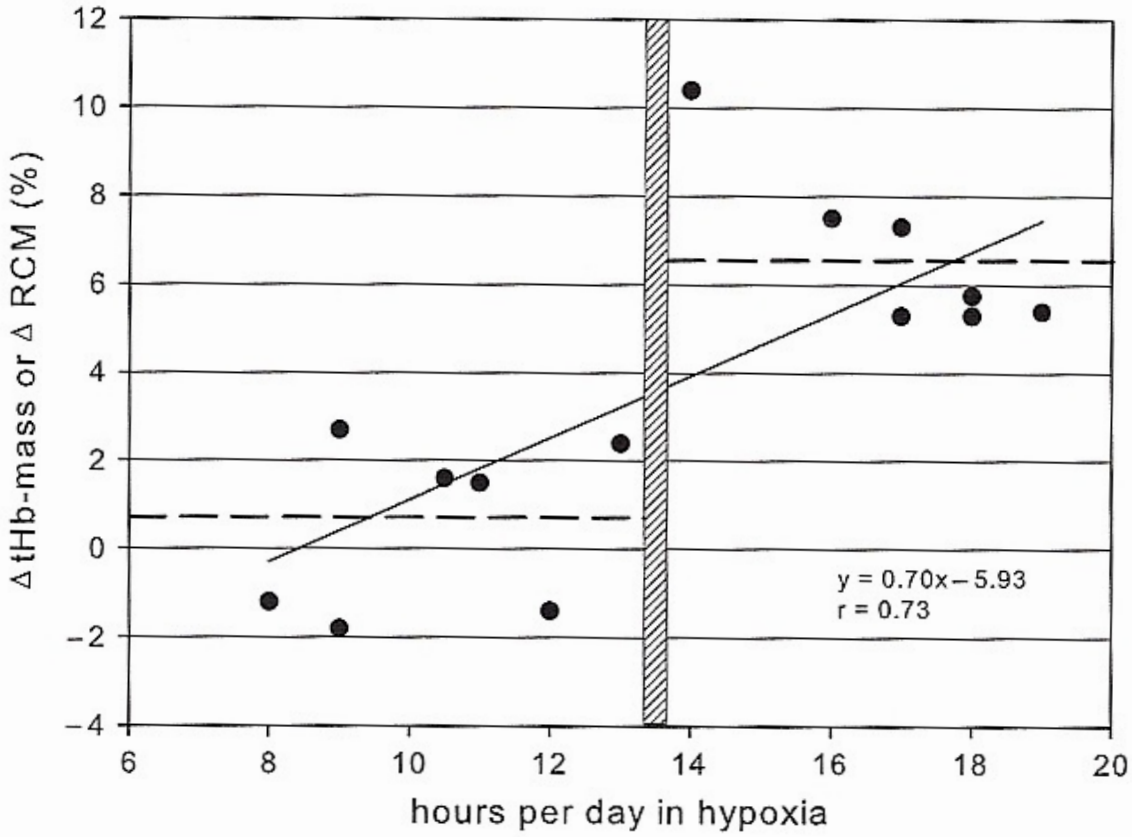


Fig. 4. Percentage changes in mean tHb-mass or red cell mass during LH–TL protocols in relation to the hours of daily exposure to hypoxia. For more information see Table 3. The horizontal lines indicate the mean change in tHb-mass for daily hypoxic exposures of less (left side) and of more (right side)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

From: Schmidt and Prommer, *Scand J Med Sci Sports* 2008

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

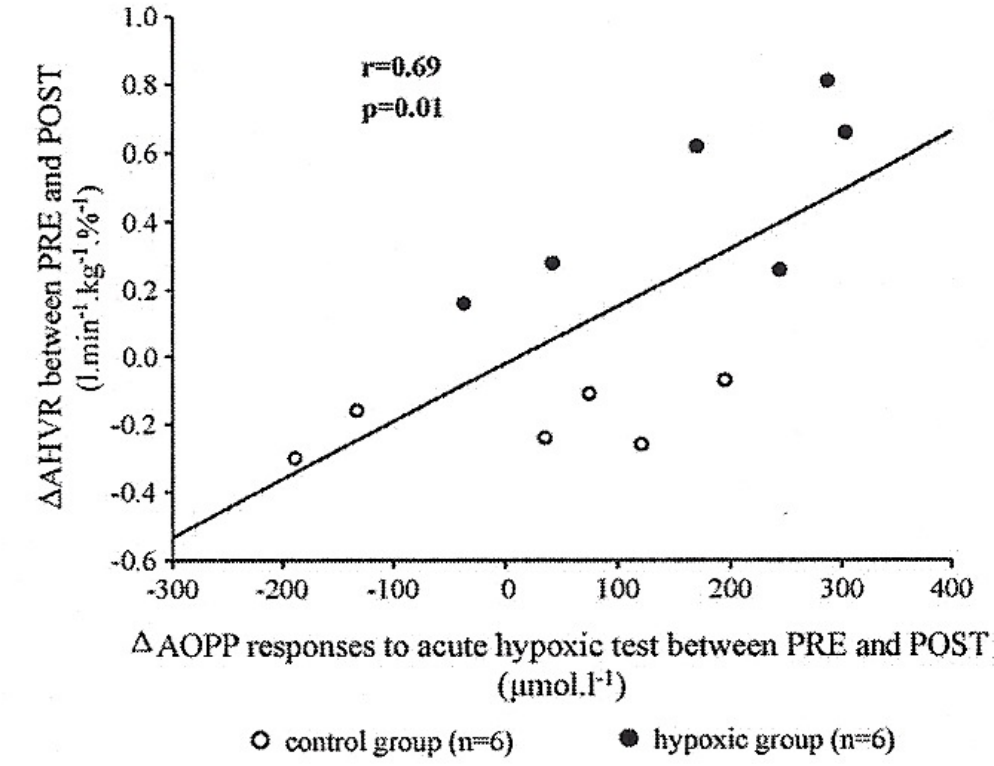


Fig. 2. Relationship between the changes in the acute hypoxic ventilatory response (ΔAHVR) during exercise and protein oxidation (ΔAOPP) during the acute hypoxic response test between before (PRE) and after (POST) 18 days of "living high–training low" ($n = 12$). The black circles represent subjects of the hypoxic group ($n = 6$) and the open circles represent subjects of the control group ($n = 6$).

From: Pialoux et al., *Respir Physiol Neurobiol*, 2009

Au total

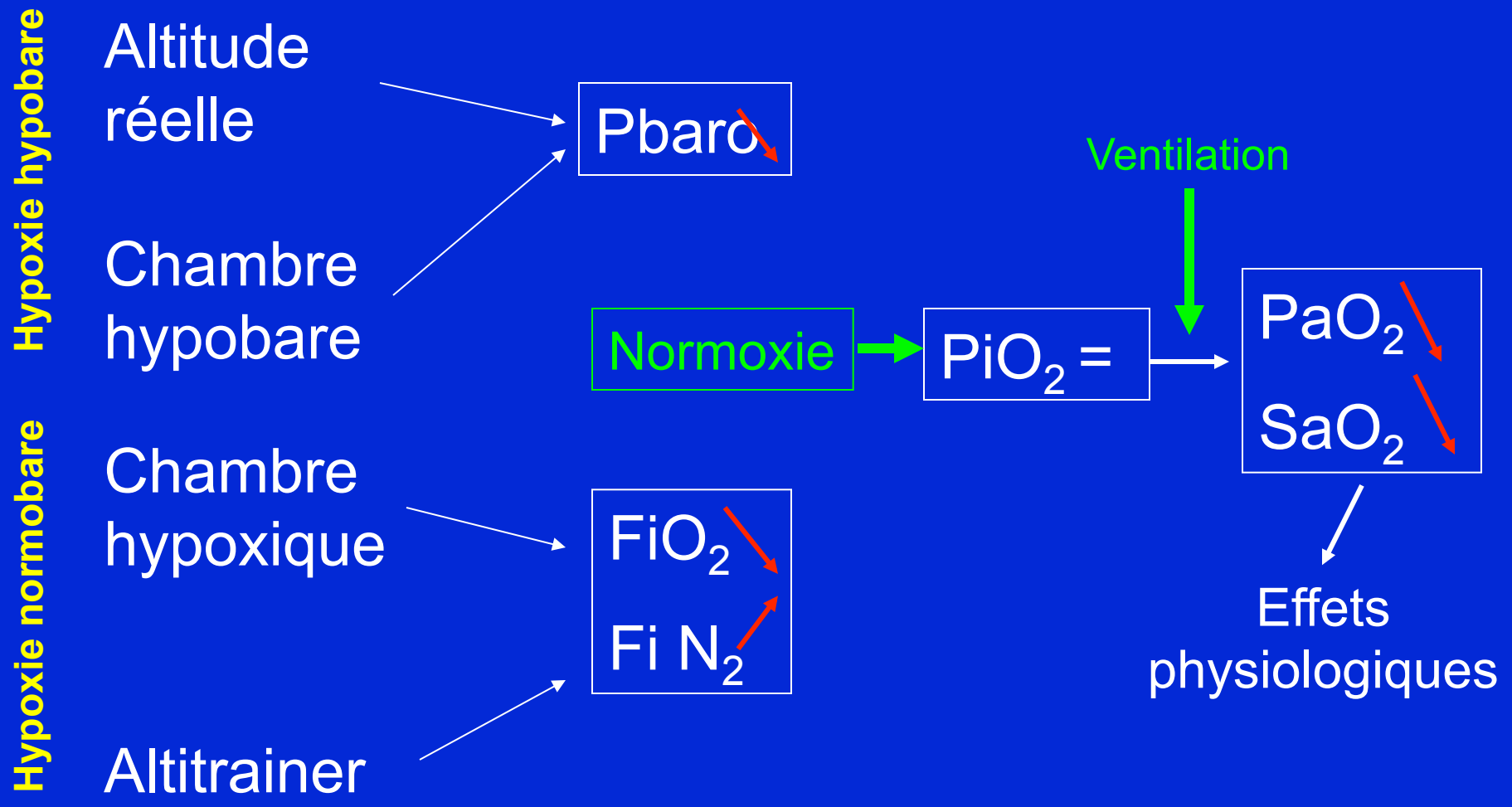
L'altitude optimale pour la méthode LH-TL est de **3000m** (atteinte progressivement en 4 jours), avec une durée de stage qui doit au moins égaler **18 jours** et une durée d'exposition journalière à l'hypoxie d'au moins **12h/ 24h**.

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

Méthodes d'entraînement en hypoxie



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

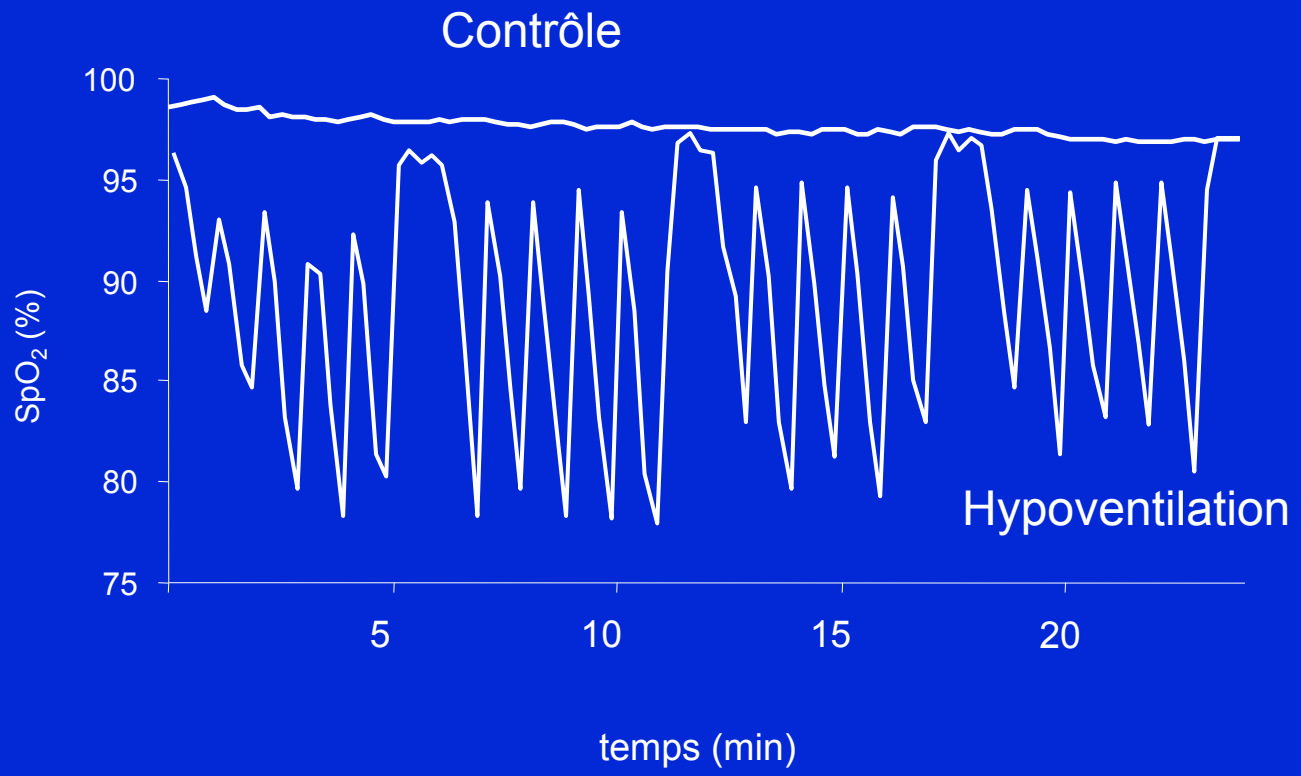
Hypoventilation relative volontaire pendant l'exercice: une technique « bon marché » pour simuler l'altitude ?

40% $\dot{V}O_{2max}$ 65% $\dot{V}O_{2max}$

Warm up (3')	S1 (5')	T1 (1')	S2	T2	S3	T3
2' NORM – 1' HYPOV	(15'' NORM – 45'' HYPOV) * 5	NORM	(15'' NORM – 45'' HYPOV) * 5	NORM	(15'' NORM – 45'' HYPOV) * 5	NORM

Woorons et al., 2009

SpO_2 moyenne pendant une session d'entraînement avec hypoventilation volontaire à l'exercice vs ventilation normale



From: Woorons et al., *Respir Physiol Neurobiol*, 2008

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 , RSH, etc··· est l'objet d'études nouvelles.
- L'hypoventilation volontaire pourrait être une alternative « bon marché ».