

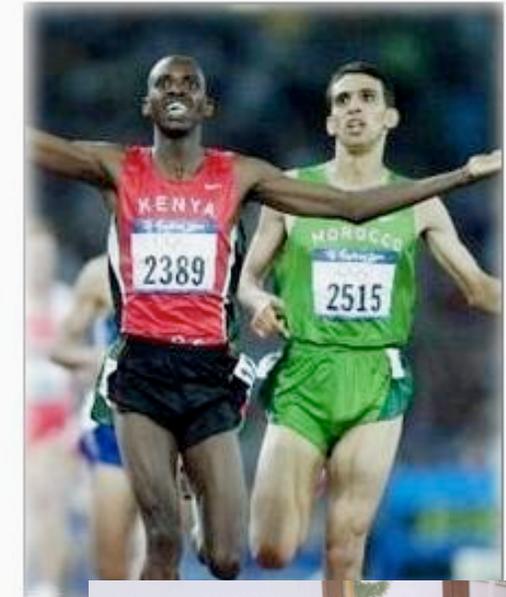
Altitude, entraînement, performance

Jean-Paul Richalet

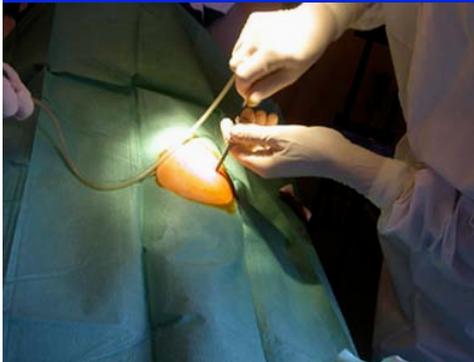
EA2363

Laboratoire "Réponses cellulaires et fonctionnelles à l'hypoxie"

Université Paris 13



15



DUMM



Jeux olympiques et altitude: MEXICO, 1968

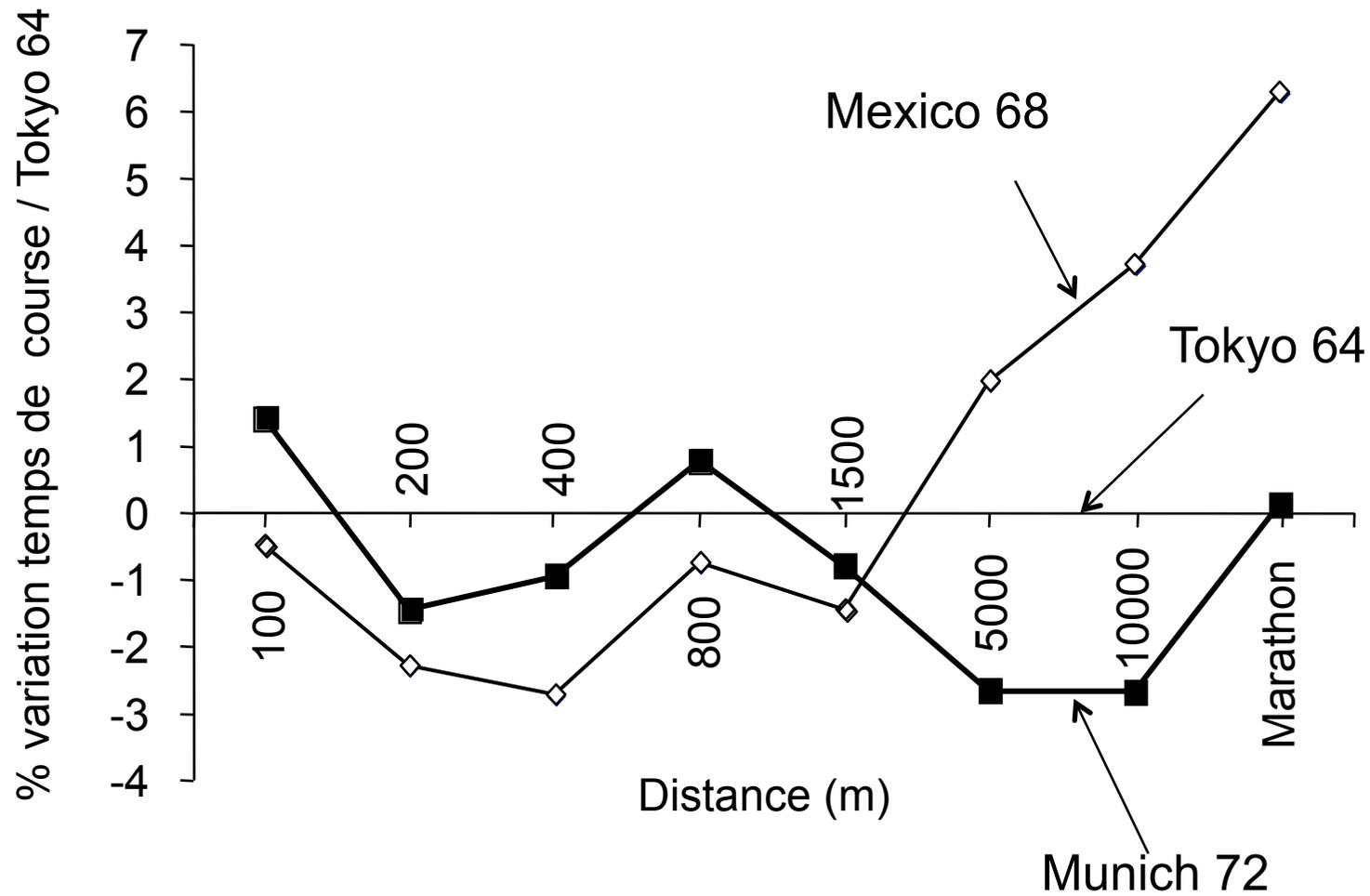


Bob Beamon, saut en longueur:
8.90 m, record du monde pendant
22 ans

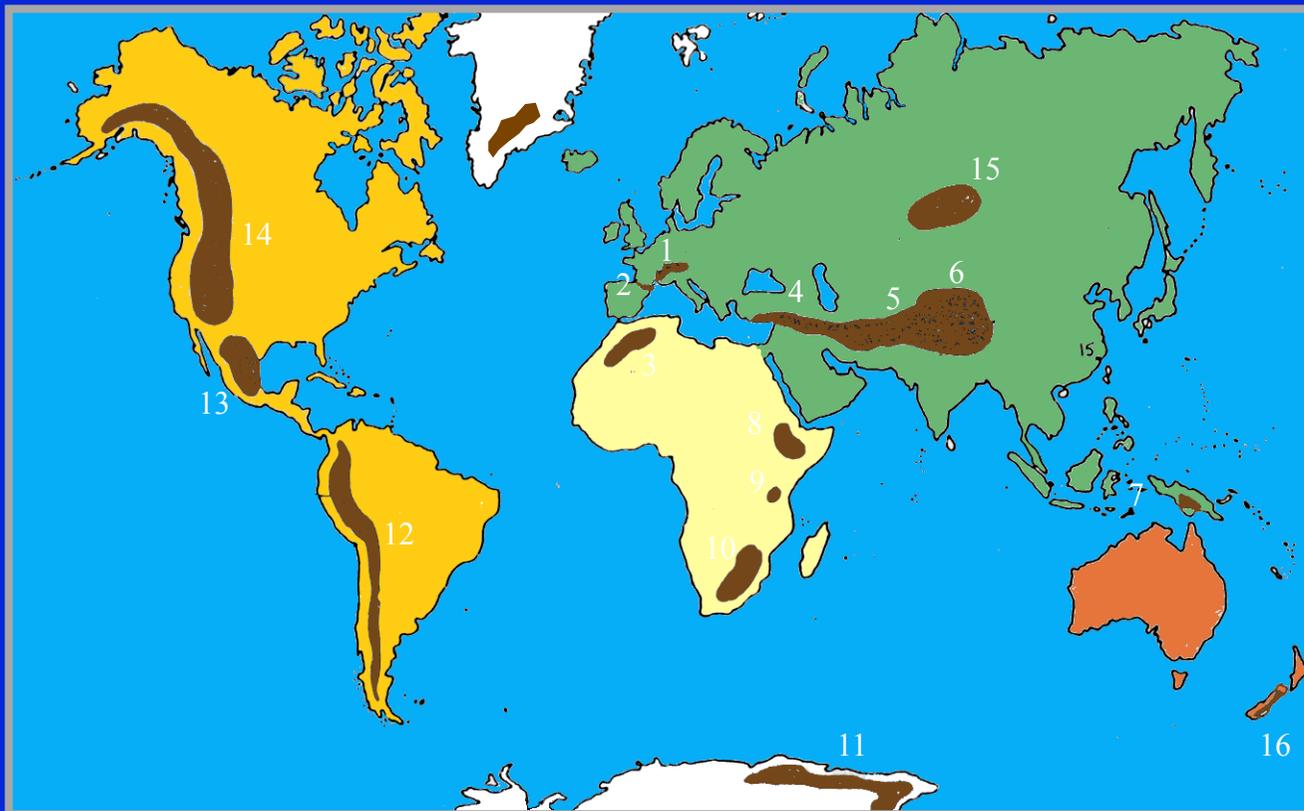
Ron Clarke, 10000m:
Épuisement à la fin
de la course



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



Les régions de haute altitude



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

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

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

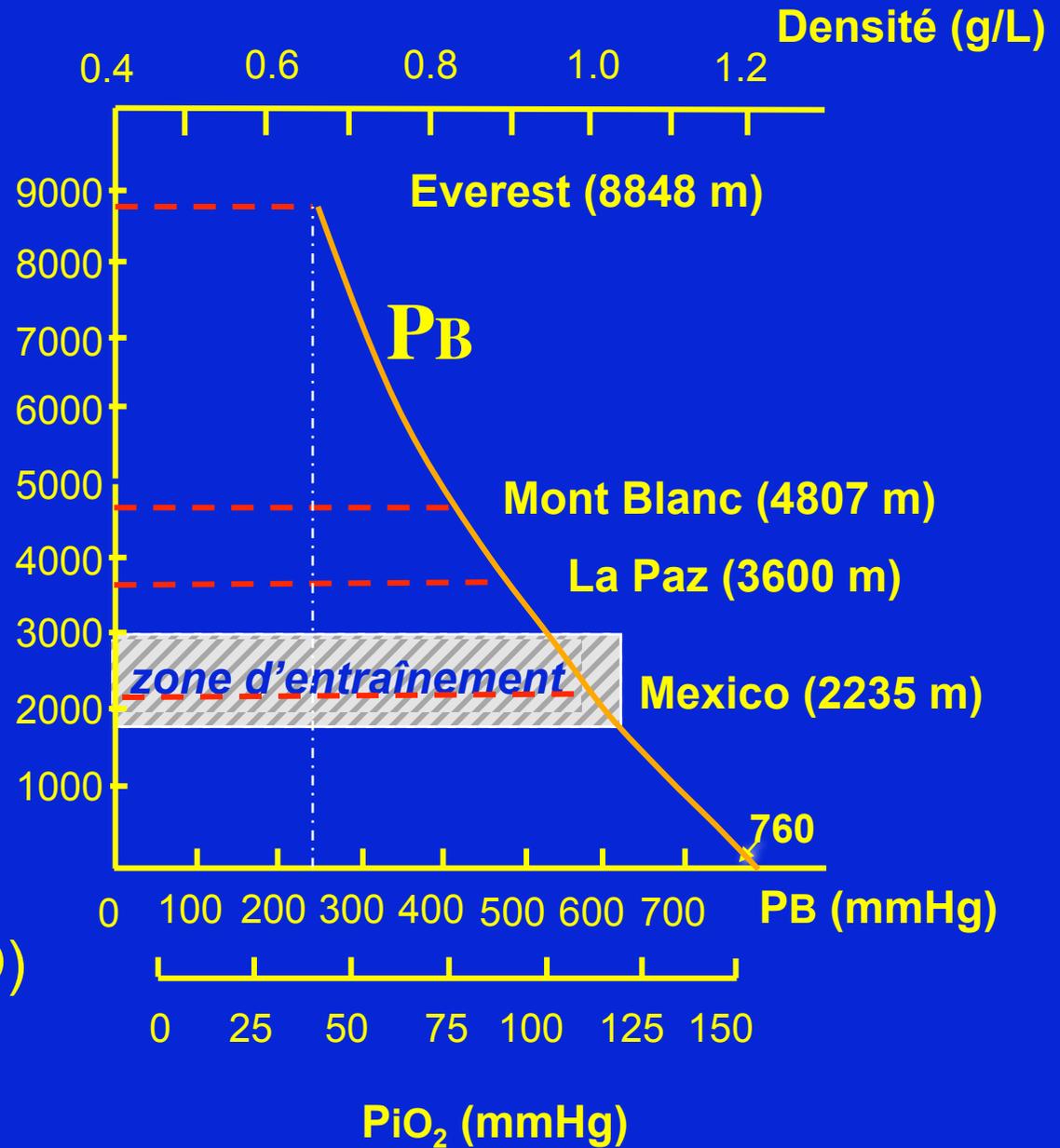


1er avril 2009...
Bolivie - Argentine : 6 - 1

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

HYPOXIE =
Manque d'oxygène

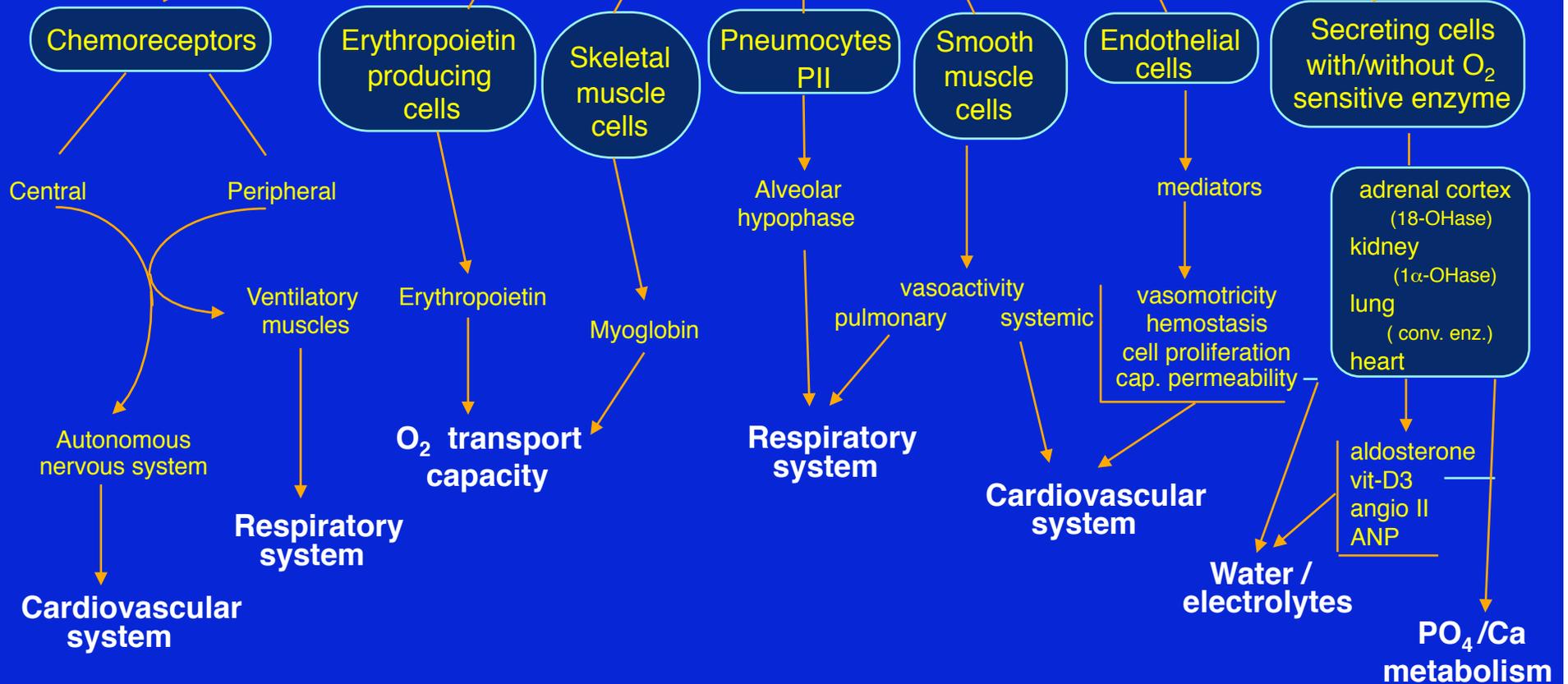
$$P_{iO_2} = F_{iO_2} \times (P_B - P_{H_2O})$$

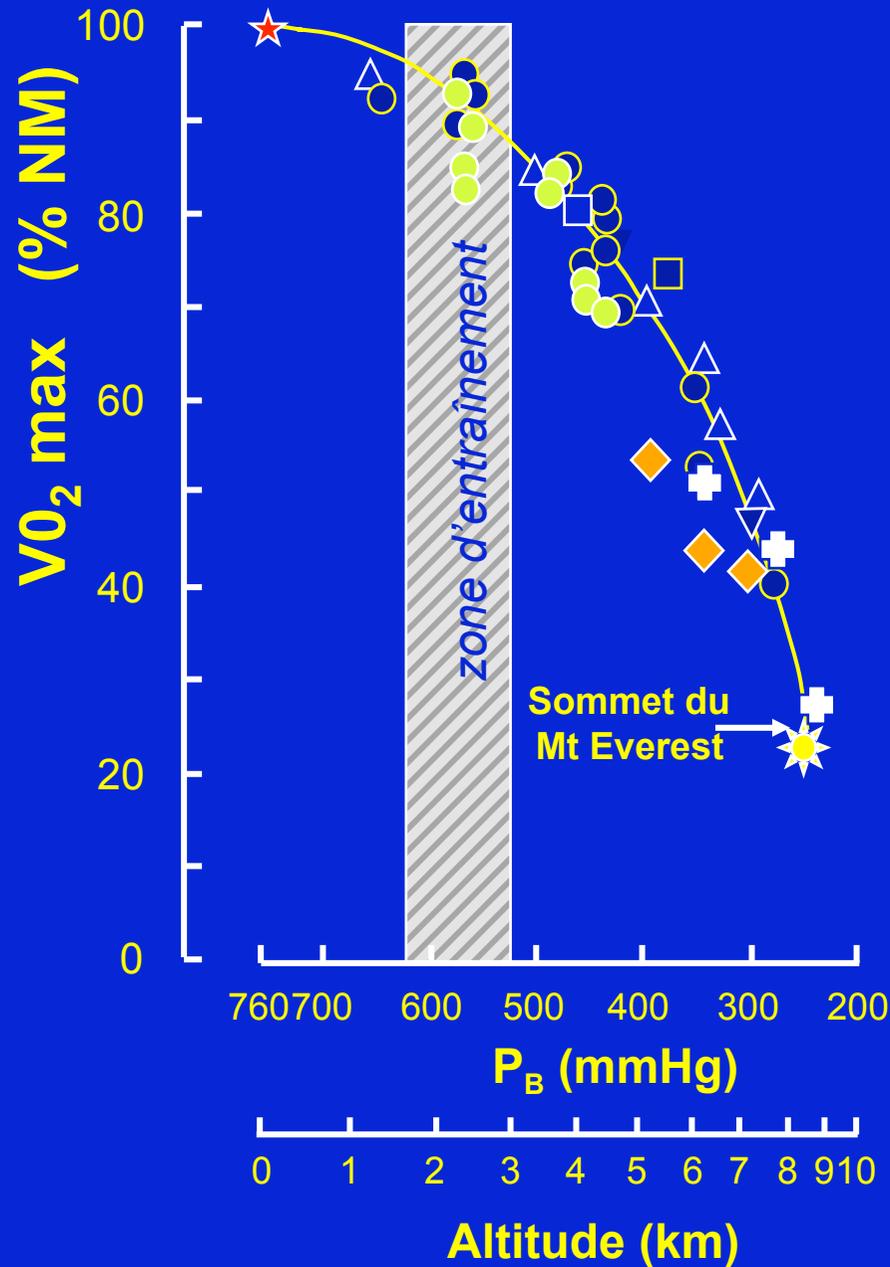


HYPOXIA

Detection of hypoxia

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





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

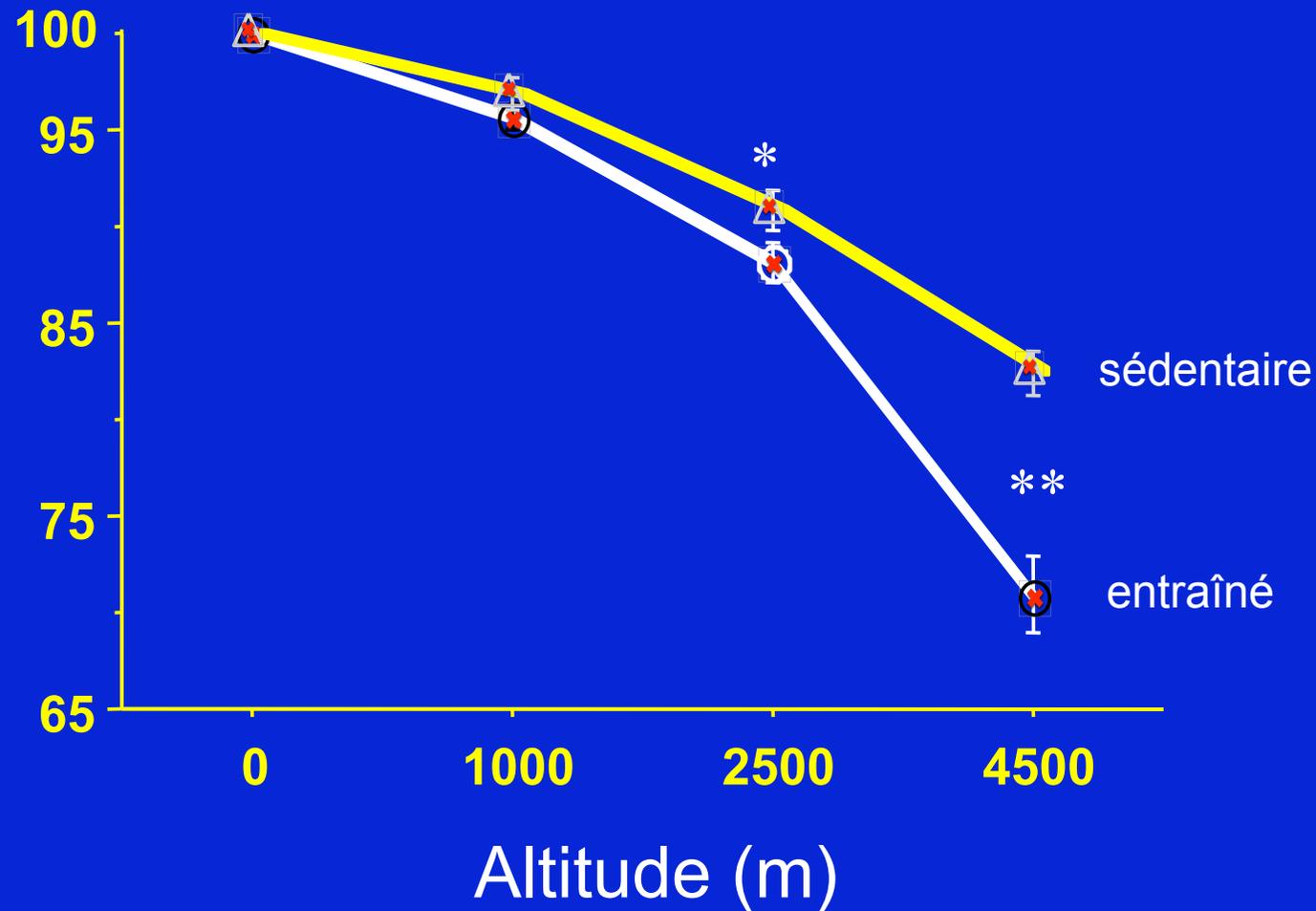
Stimule les centres respiratoires et augmente la ventilation pulmonaire

Modifie le métabolisme musculaire

Mais...

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

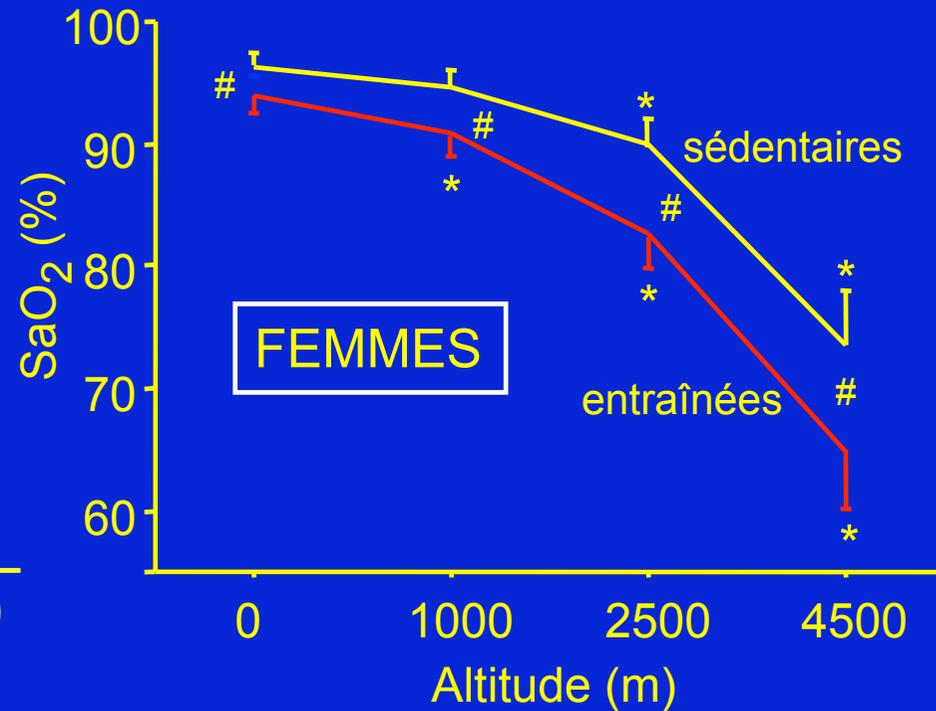
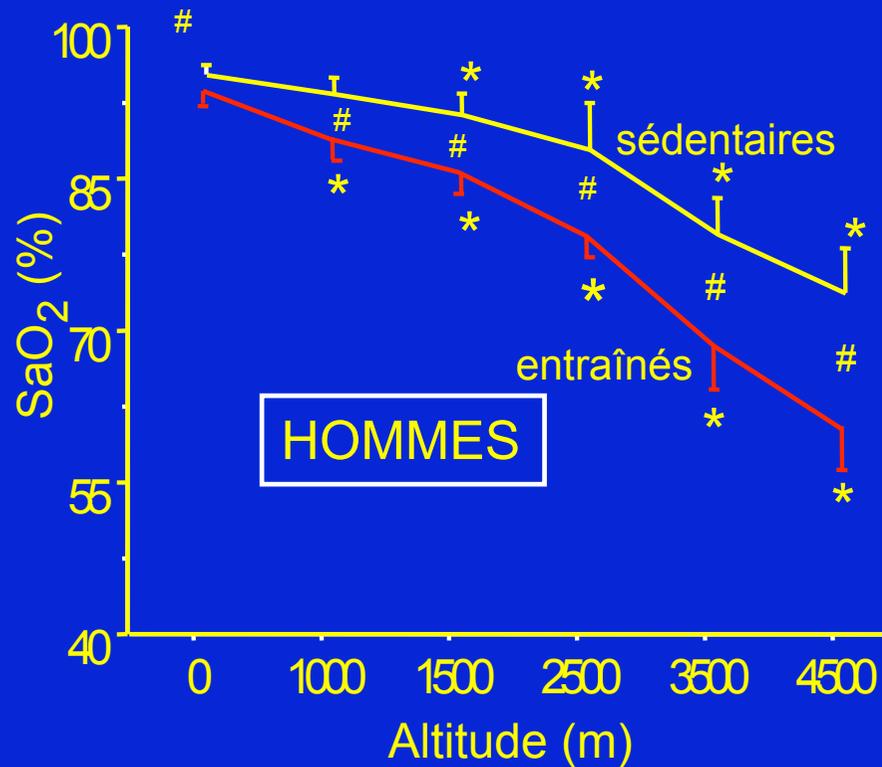
VO₂max (% du niveau de la mer)



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

D'après Mollard et al., 2007

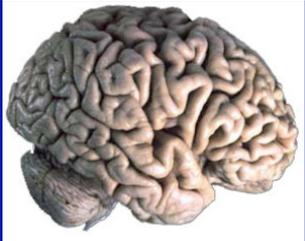
SaO₂ à l'exercice maximal



* 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

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



O_2 ↓ ↑ CO_2

Ventilation pulmonaire :
CONVECTION

Contrôle central

O_2 ↓ ↑ CO_2

Transfert alvéolo-capillaire
en oxygène : DIFFUSION

Cœur
droit

Cœur
gauche

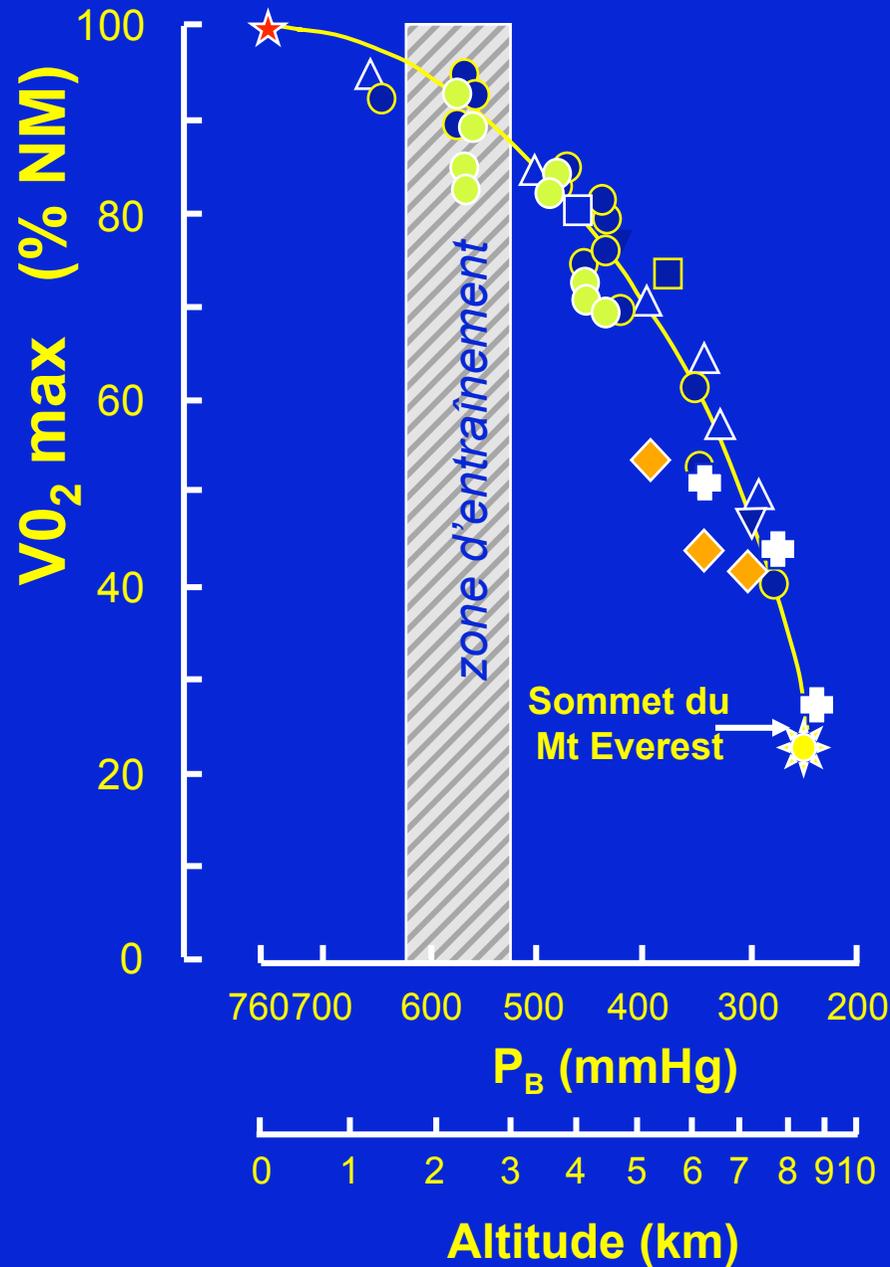
Transport de l'oxygène par
le sang : CONVECTION

Diffusion de l'oxygène
vers les tissus :
DIFFUSION

cellule

O_2 ↓ ↑ CO_2
Consommation
d'oxygène

Production d'énergie aérobie

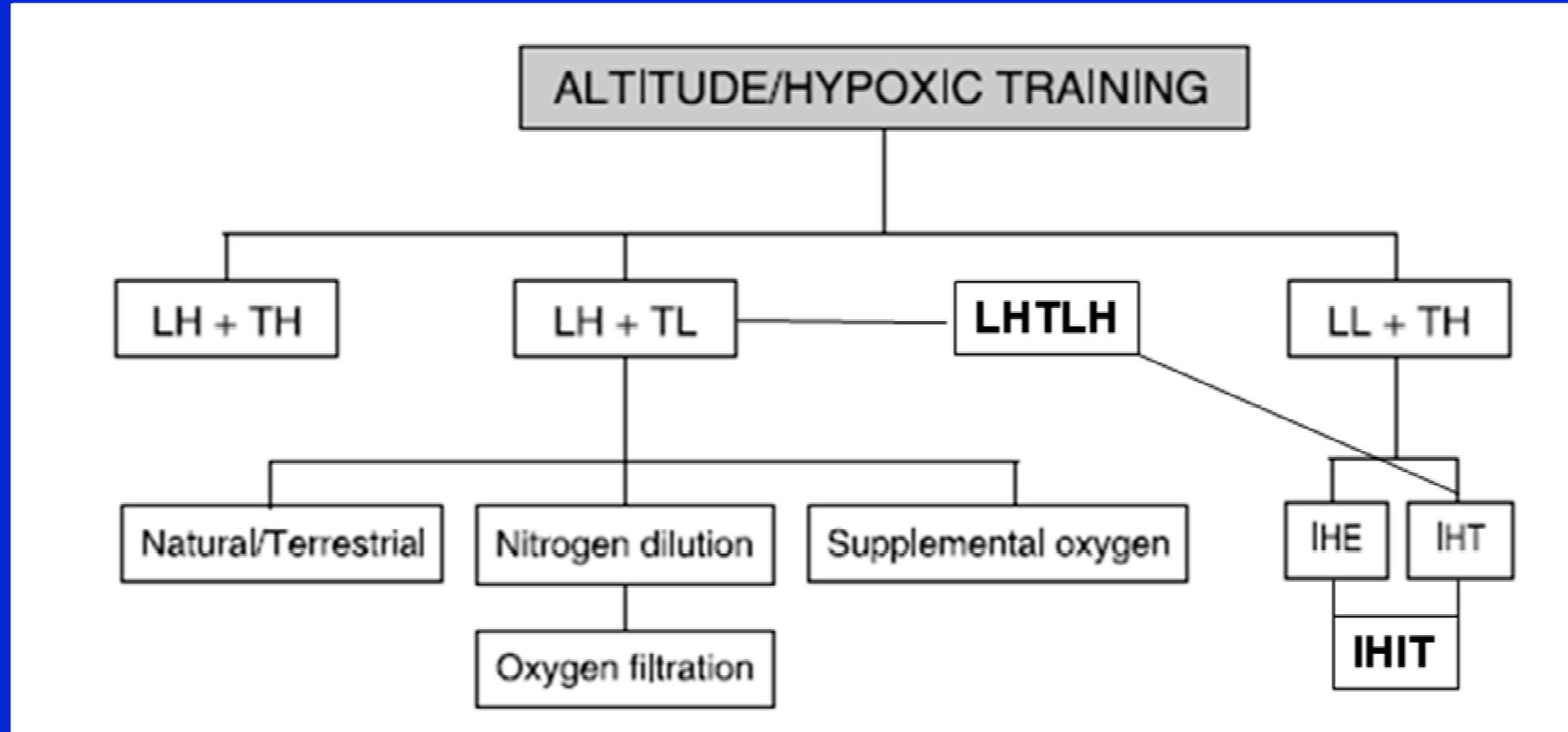


La puissance aérobie maximale ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) diminue avec l'altitude

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

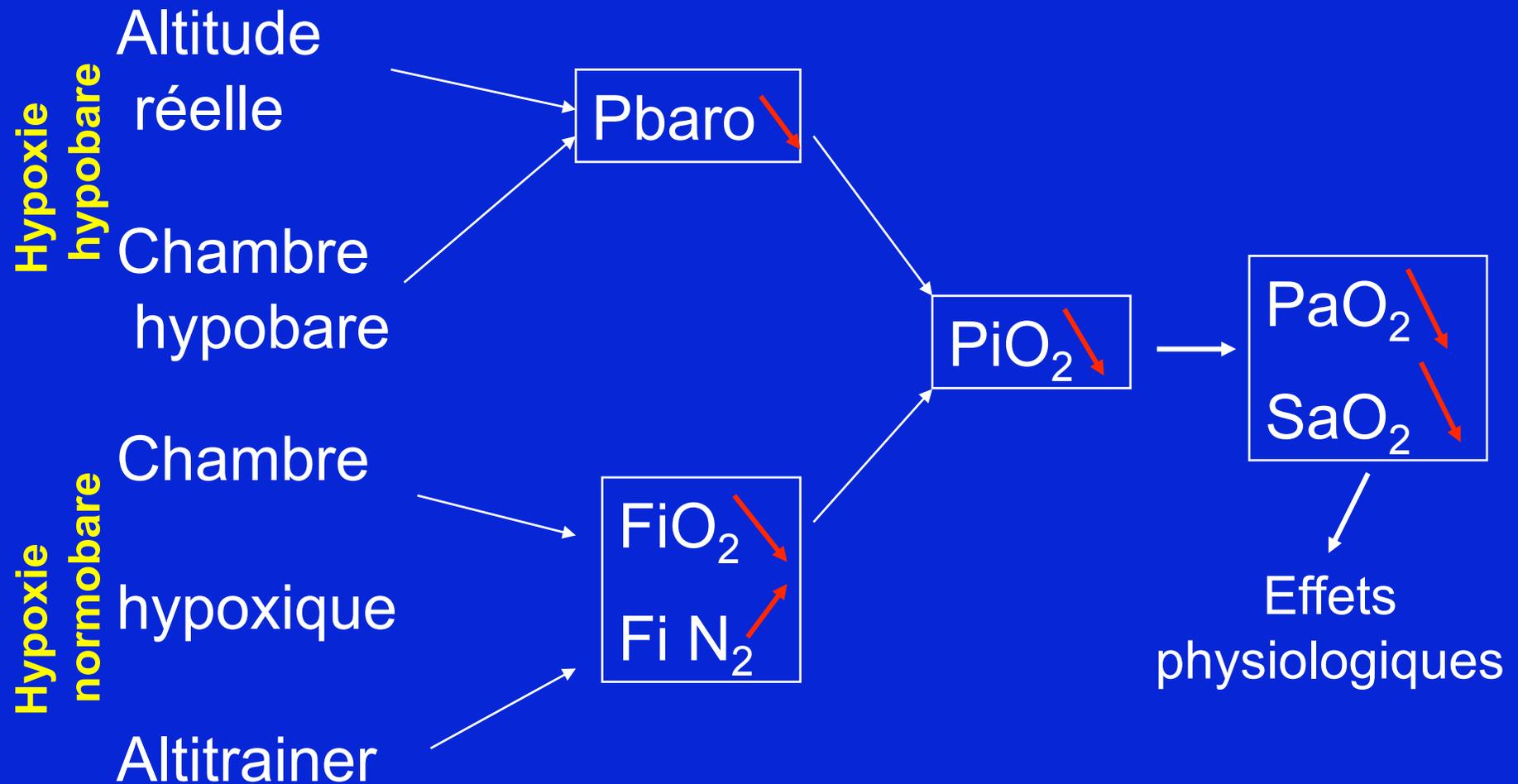
60% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ au niveau de la mer = 80% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ à 2500m

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



D'après Wilber, 2007 et Millet, 2009

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-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”



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[®])

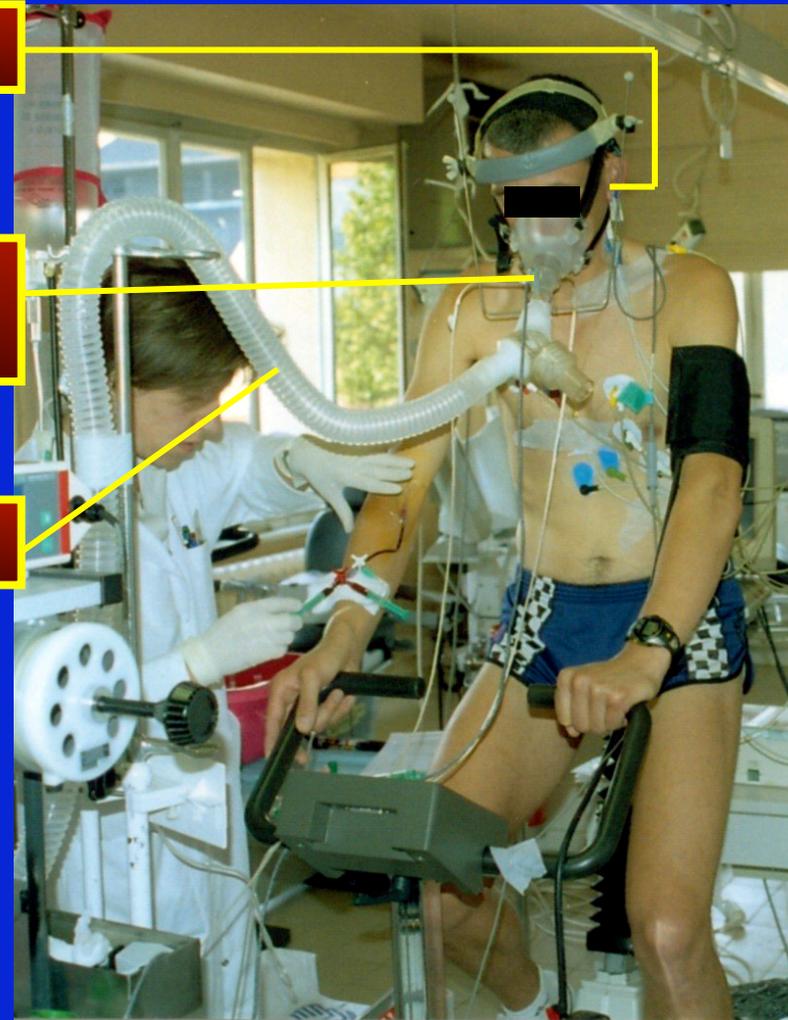
Strasbourg, Berne, Montpellier



saturation

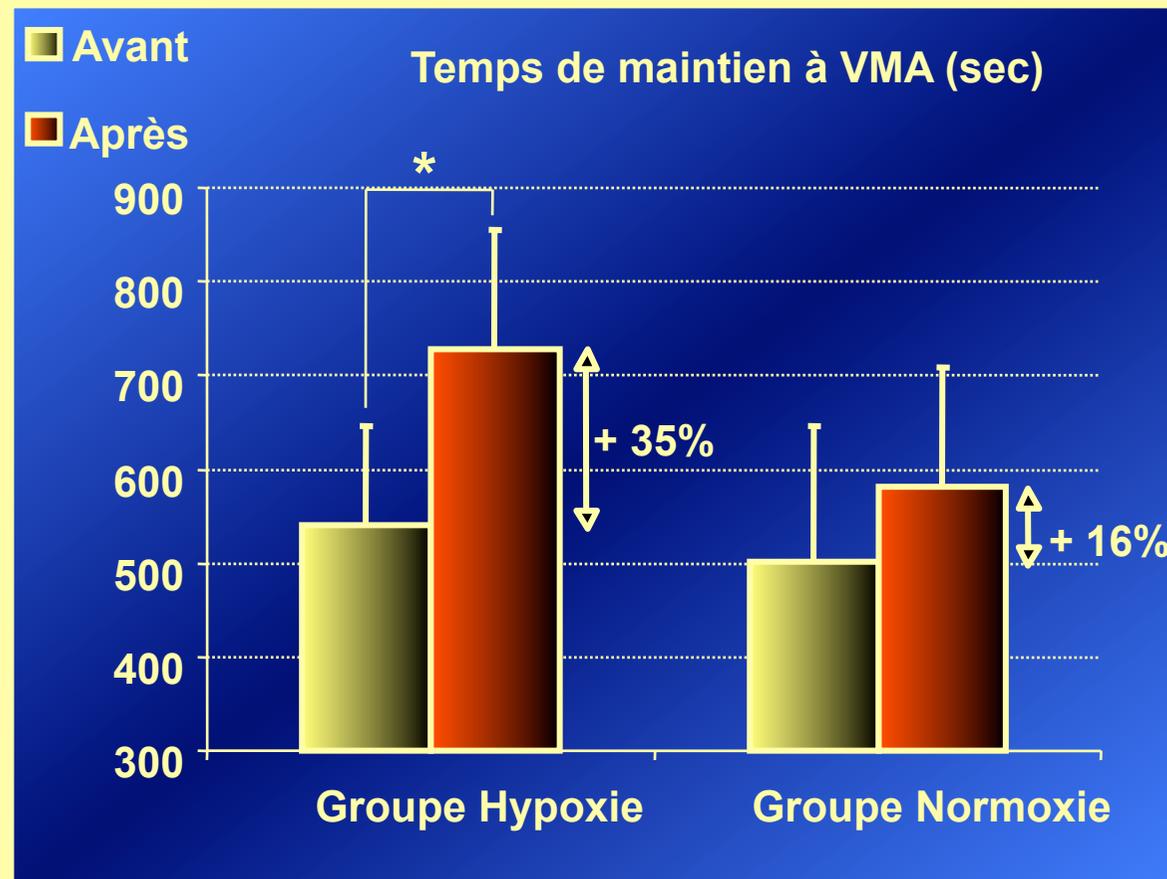
Echanges gazeux

Altitrainer



Strasbourg, Berne, Montpellier, Canberra, etc...

Effets de l'entraînement en hypoxie de type LL-TH sur la performance au niveau de la mer



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



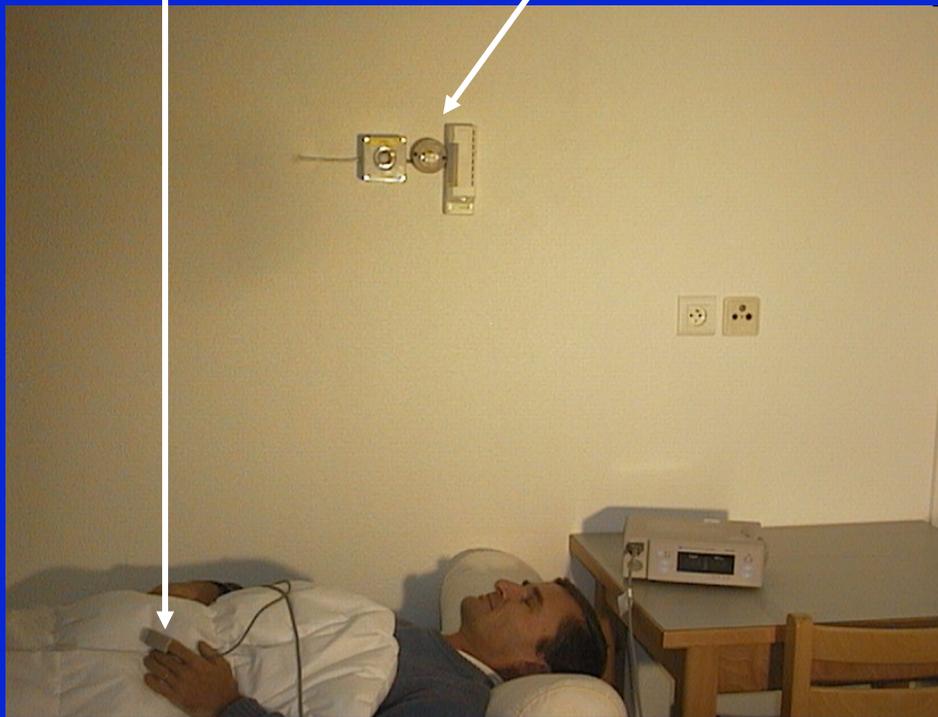
14 équipes scientifiques ont participé à l'étude

- ARPE, Laboratoire « Réponses cellulaires et fonctionnelles à l'hypoxie », EA 2363,
- UFR de Médecine, Université Paris 13, **Bobigny**
- Centre National de Ski Nordique , **Prémanon**
- Ecole Nationale de Ski et d'Alpinisme, **Chamonix**
- Service de Physiologie Appliquée, Explorations Fonctionnelles Respiratoires,
- Hôpital de Strasbourg, **Strasbourg**
- Laboratoire de Biologie des Activités Physiques et Sportives, Faculté de Médecine,
- **Clermont-Ferrand**
- EA 3759 – Laboratoire « Approche Bio-Psycho-Sociale du Dopage »,
- Faculté des Sciences du Sport, **Montpellier**
- Service Central de Physiologie Clinique, CHU de **Montpellier**
- Groupe Rhône-Alpes d'analyse du système nerveux autonome,
- **St Etienne, Lyon, Grenoble**
- Institut d' Anatomie, Université de Berne, **Suisse**.
- UFR STAPS, Université de Reims, **Reims**
- Laboratoire National de Dépistage du Dopage, **Chatenay-Malabry**
- Laboratoire de Biochimie, Hôpital Henri Mondor, **Créteil**
- Laboratoire de Neurophysiologie Aérospatiale, IMASSA, **Bretigny s/ Orge**
- Université Blaise Pascal, **Clermont-Ferrand**
- Laboratoire de Biochimie, H.I.A. Bégin, **Paris**

Chambre hypoxique

Contrôle de la saturation artérielle en O_2

Contrôle de O_2 et CO_2 dans l'air ambiant

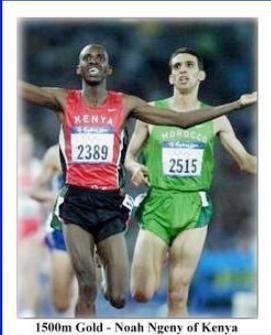


Salle de contrôle

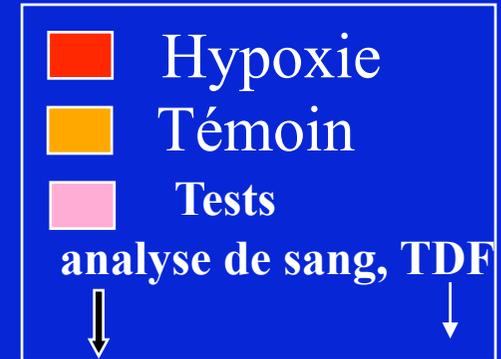
Prémanon, Jura, France

Dispositif d'extraction de l'oxygène



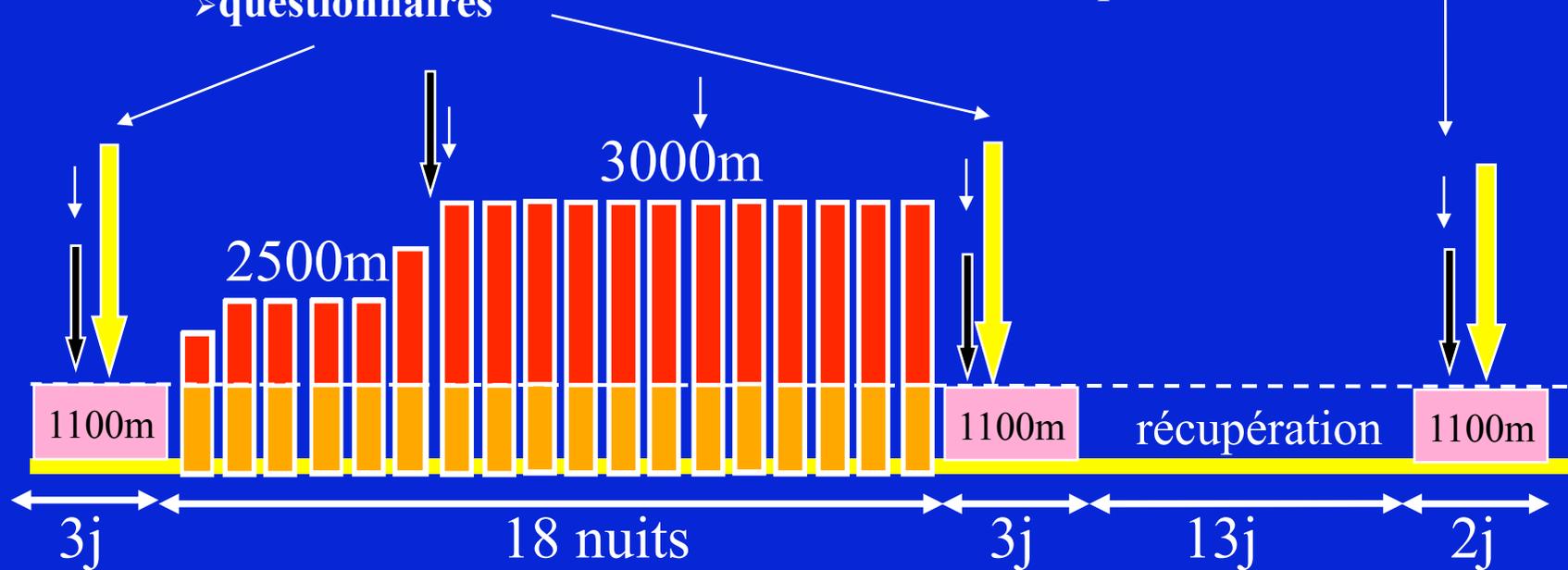


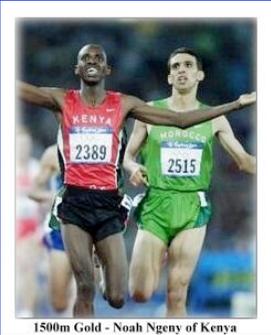
Athlétisme



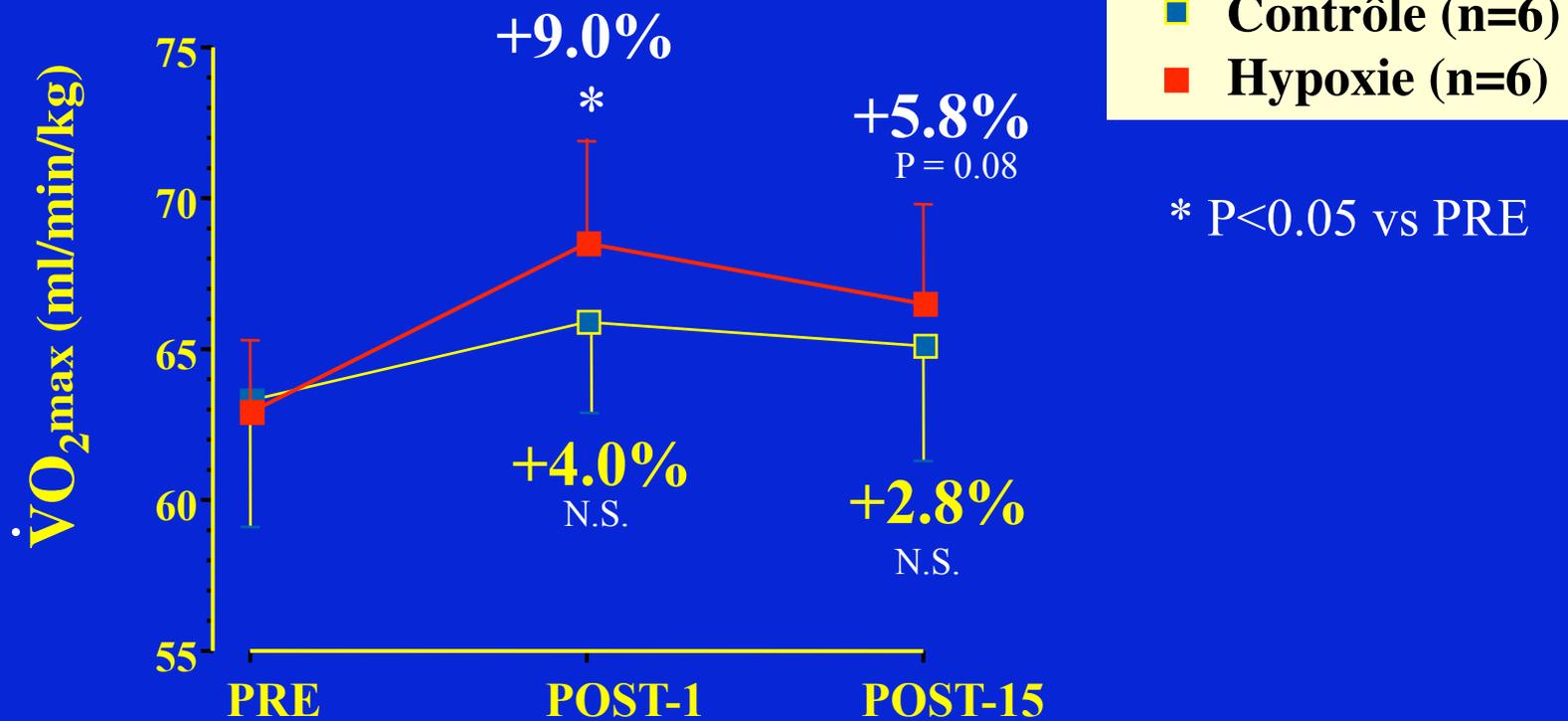
- VO_{2max} (tapis roulant)
- test piste 10 min à 90% de V.M.A.
- Analyse de sang, VP
- Test hypoxie
- TFM, TDF
- questionnaires

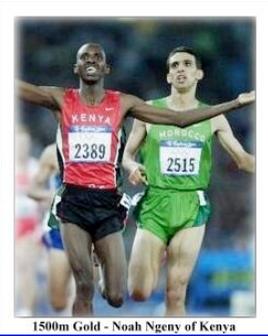
- vO_2 max (tapis roulant)
- Test piste 10 mn à 90% VMA
- Analyse de sang, VP
- TFM, TDF
- questionnaires



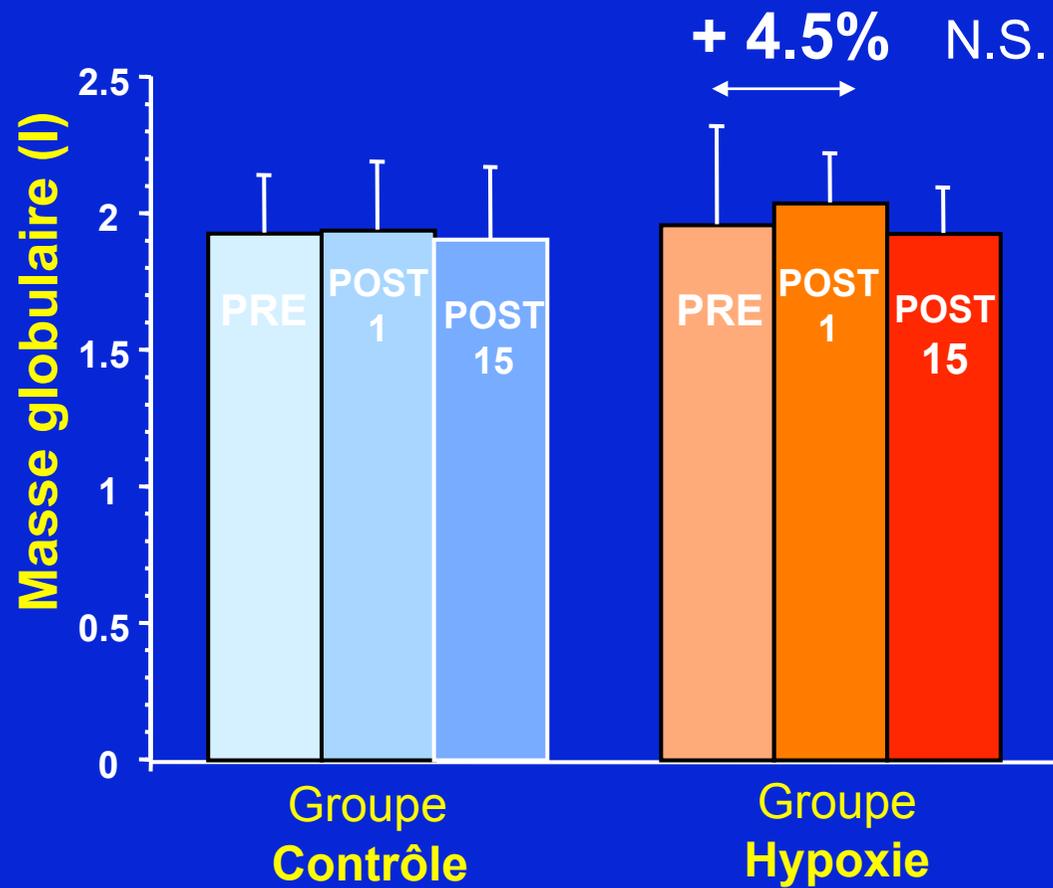


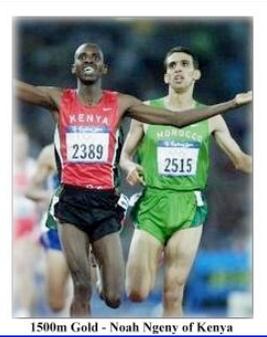
Performance ($\dot{V}O_{2\max}$)





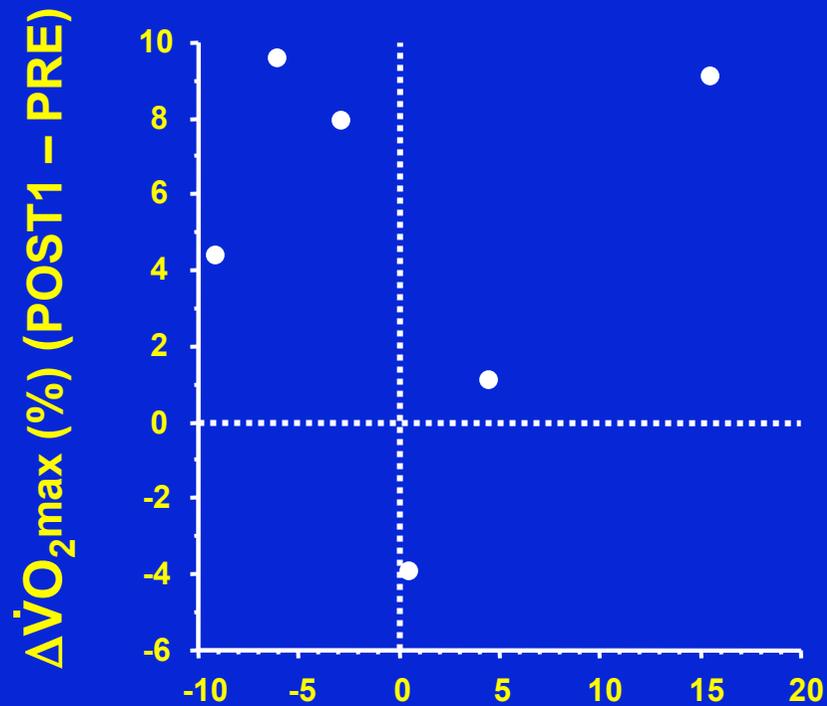
Masse globulaire totale



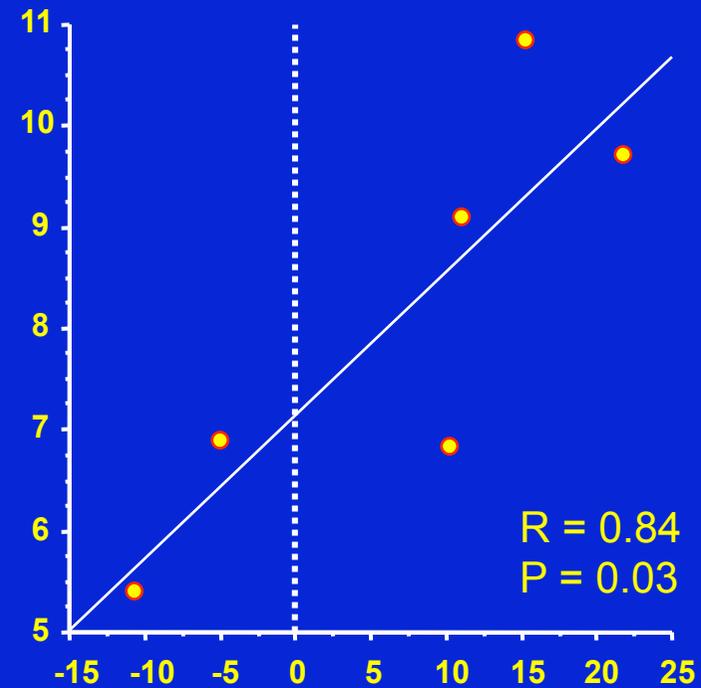


Variations de performance vs hémoglobine totale

Groupe contrôle



Groupe hypoxique



ΔnHb (%) (POST1 - PRE)

Masse Hb et VO₂max au niveau de la mer

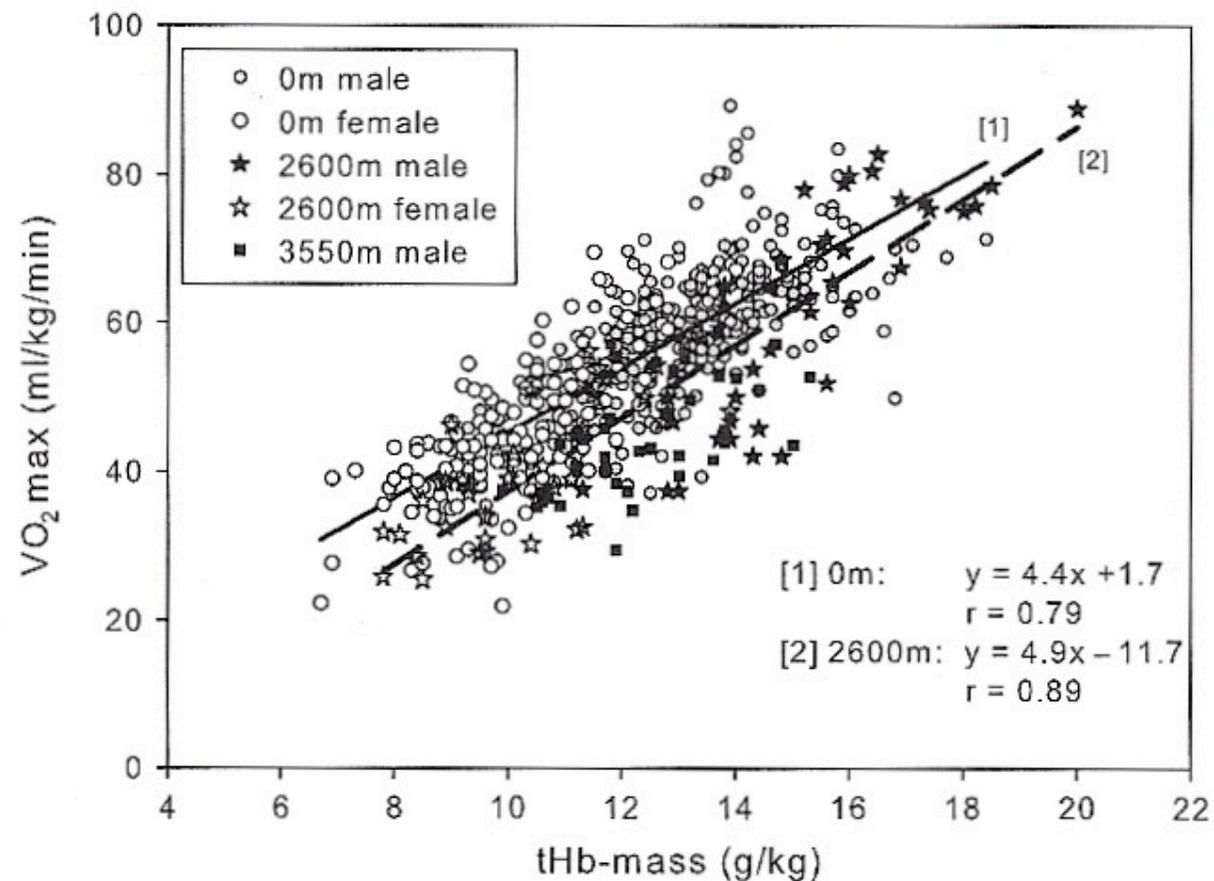


Fig. 2. Total hemoglobin mass (tHb-mass) vs VO₂max. Presented are relative values of 611 subjects native to lowland and to 2600 m, as well as natives and adapted subjects to 3550 m.

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

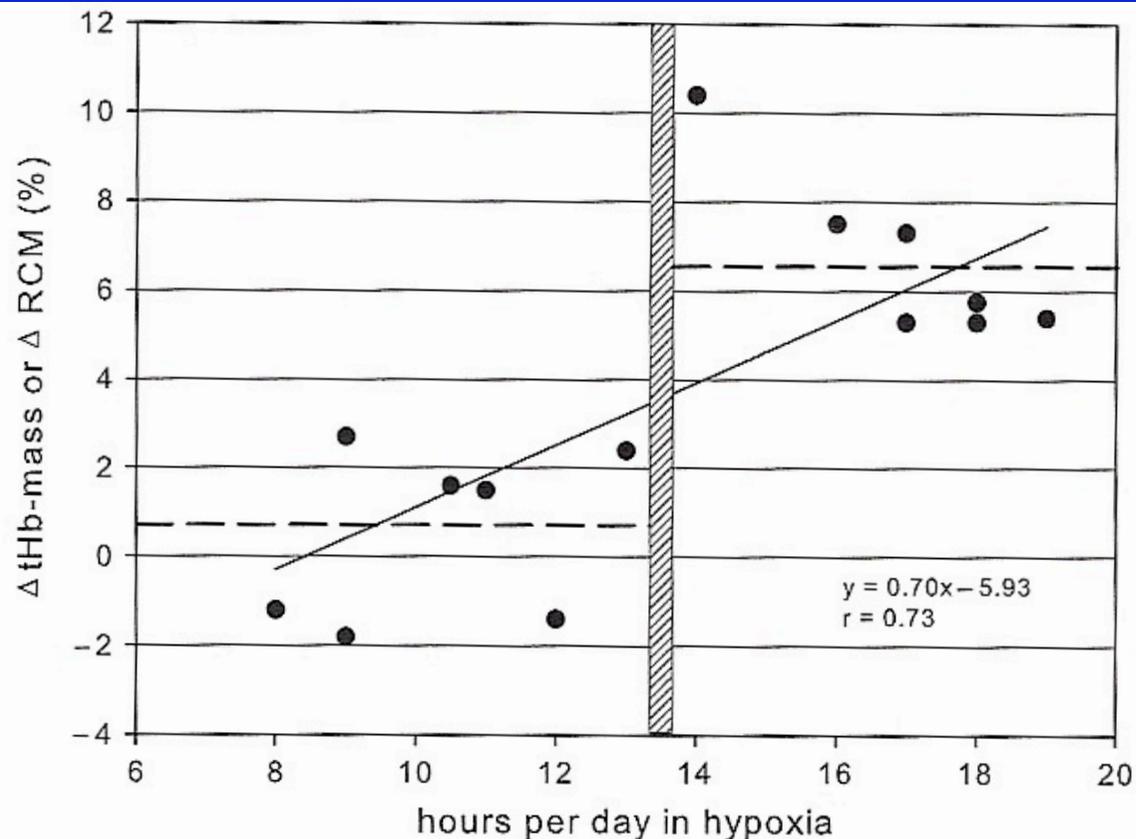
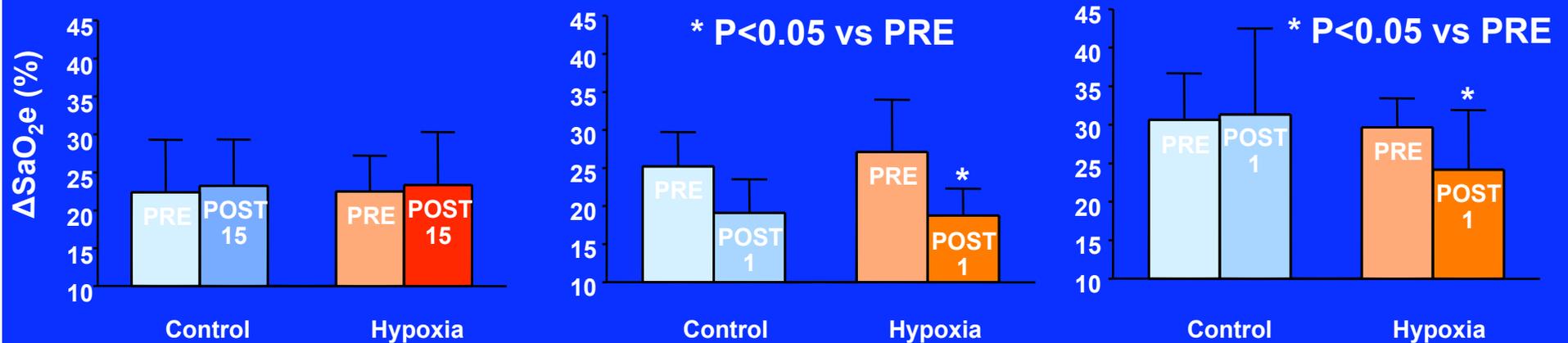


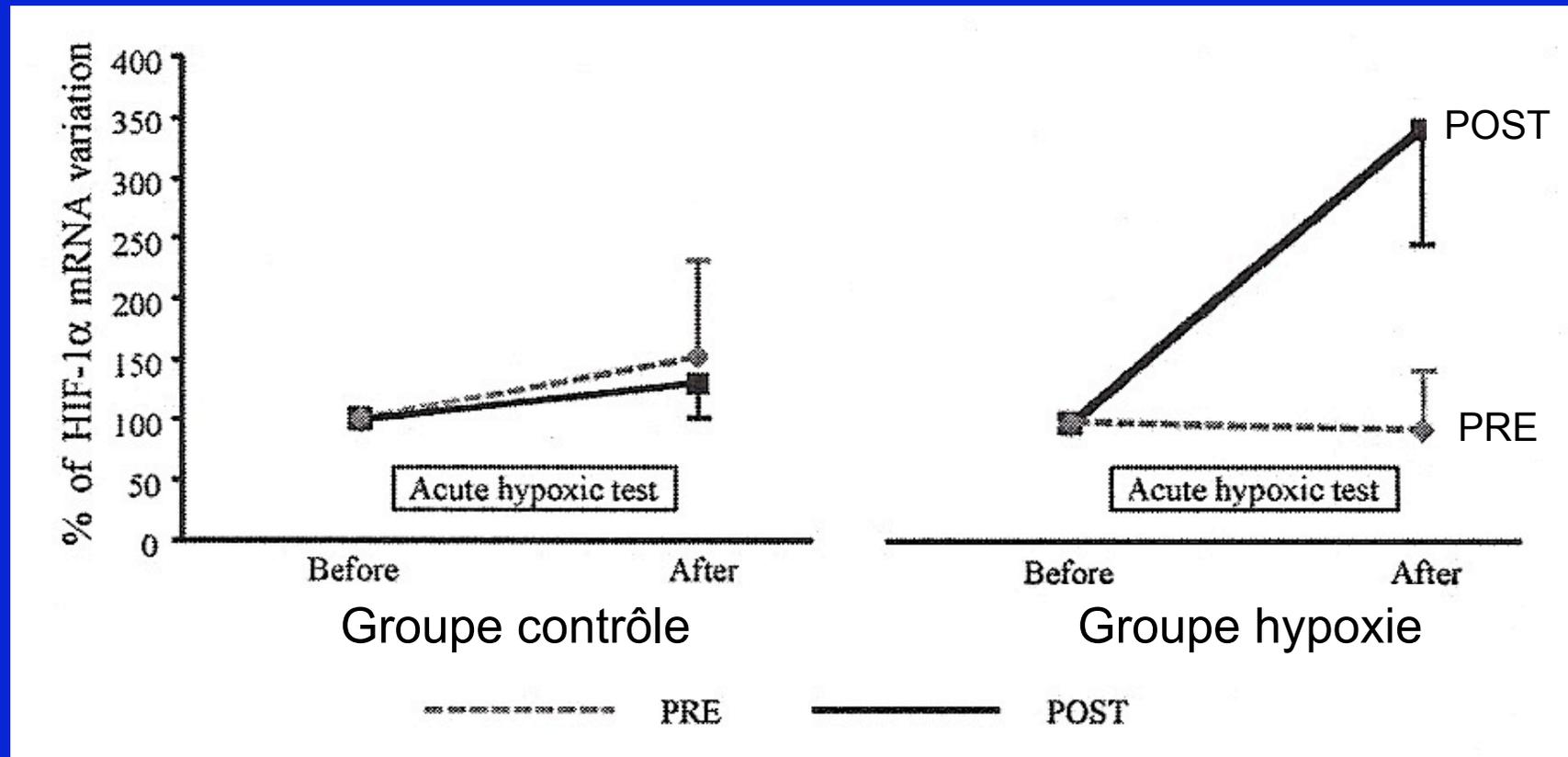
Fig. 4. Percentage changes in mean tHb-mass or red cell mass during LH-TL protocols in relation to the hours of daily exposure to hypoxia. For more information see Table 3. The horizontal lines indicate the mean change in tHb-mass for daily hypoxic exposures of less (left side) and of more (right side)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

Désaturation induite par l'exercice en hypoxie (ΔSaO_2e)



Plus faible désaturation à l'exercice (ΔSaO_2e) à la fin de la session LHTL = signe d'acclimatation ventilatoire.

Réponse de HIF-1 α lors d'un stress hypoxique aigu, avant et après une session LH-TL



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

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

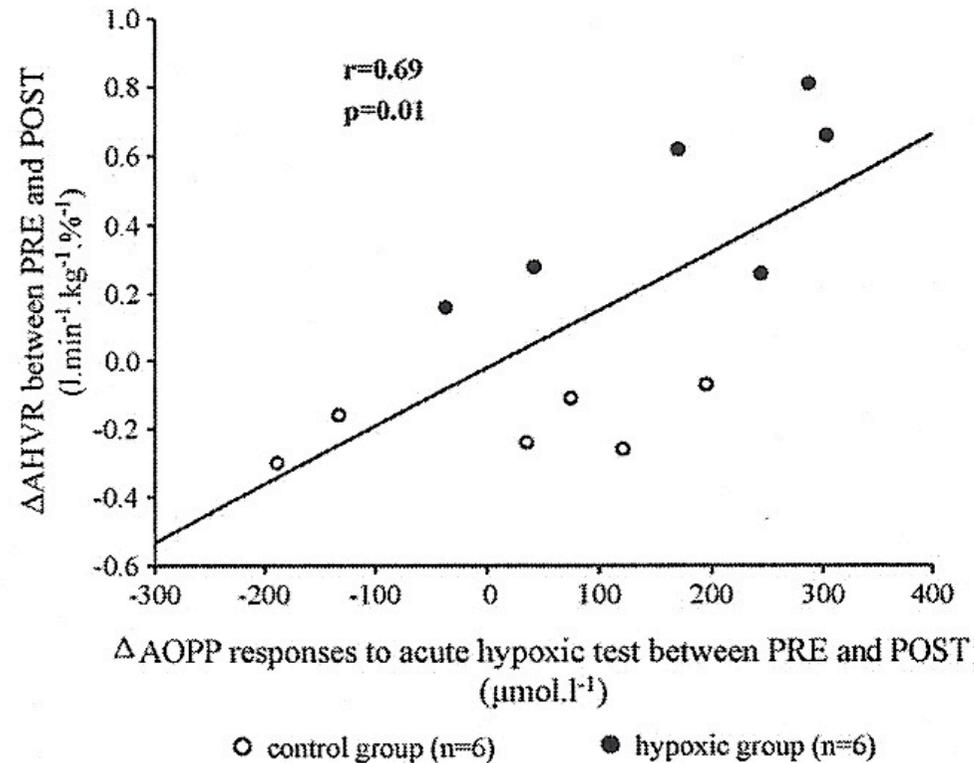
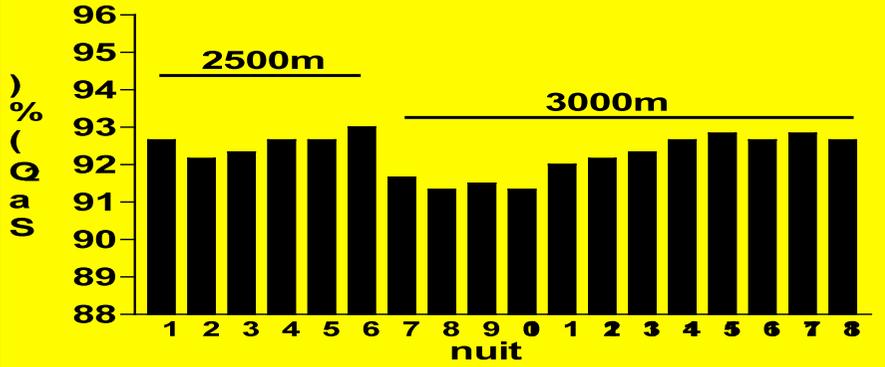
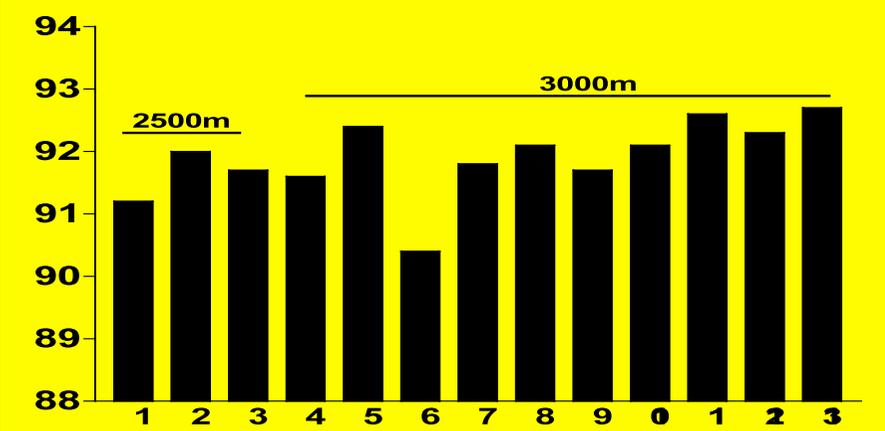
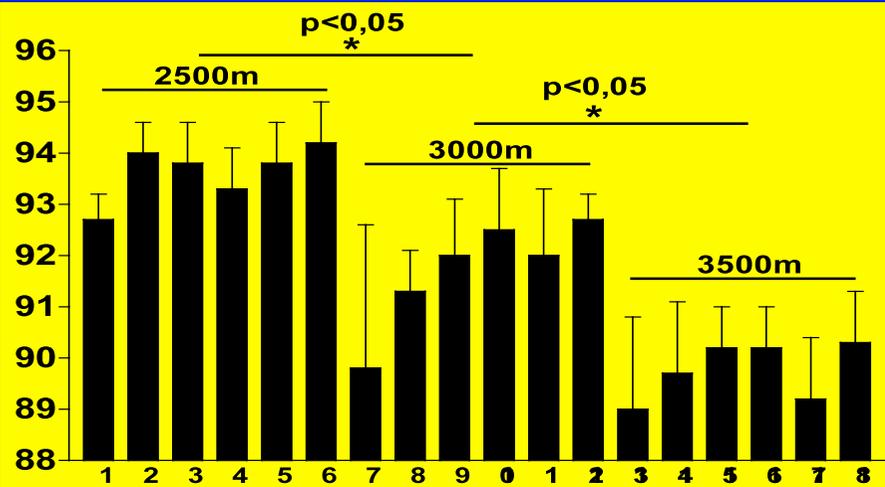


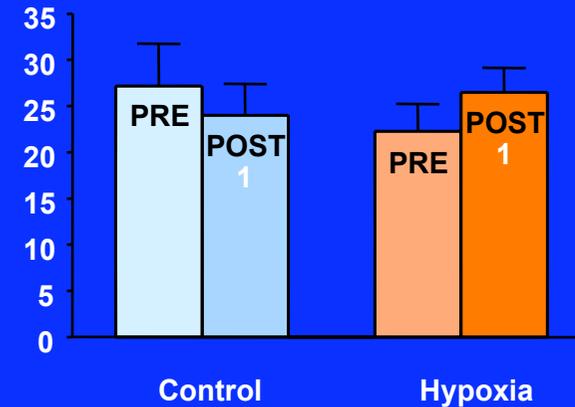
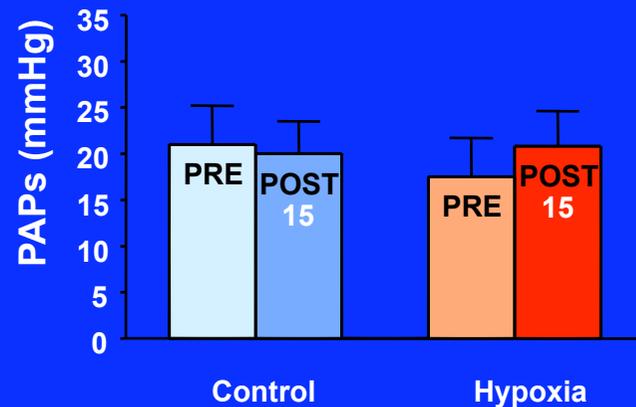
Fig. 2. Relationship between the changes in the acute hypoxic ventilatory response (ΔAHVR) during exercise and protein oxidation (ΔAOPP) during the acute hypoxic response test between before (PRE) and after (POST) 18 days of “living high–training low” ($n=12$). The black circles represent subjects of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

Saturation nocturne en oxygène (SaO₂)



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

Pression artérielle pulmonaire systolique (PAPs)



PAPs ne varie pas significativement:
Pas d'HTAP ni de modification de fonction cardiaque

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

Hypoxie hypobare

Altitude réelle

Chambre hypobare

P_{baro}

Normoxie

PiO_2

Ventilation

PaO_2

SaO_2

Effets physiologiques

Hypoxie normobare

Chambre hypoxique

Altitrainer

FiO_2

FiN_2

$$PiO_2 = FiO_2 \times (P_{\text{baro}} - P_{H_2O})$$

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

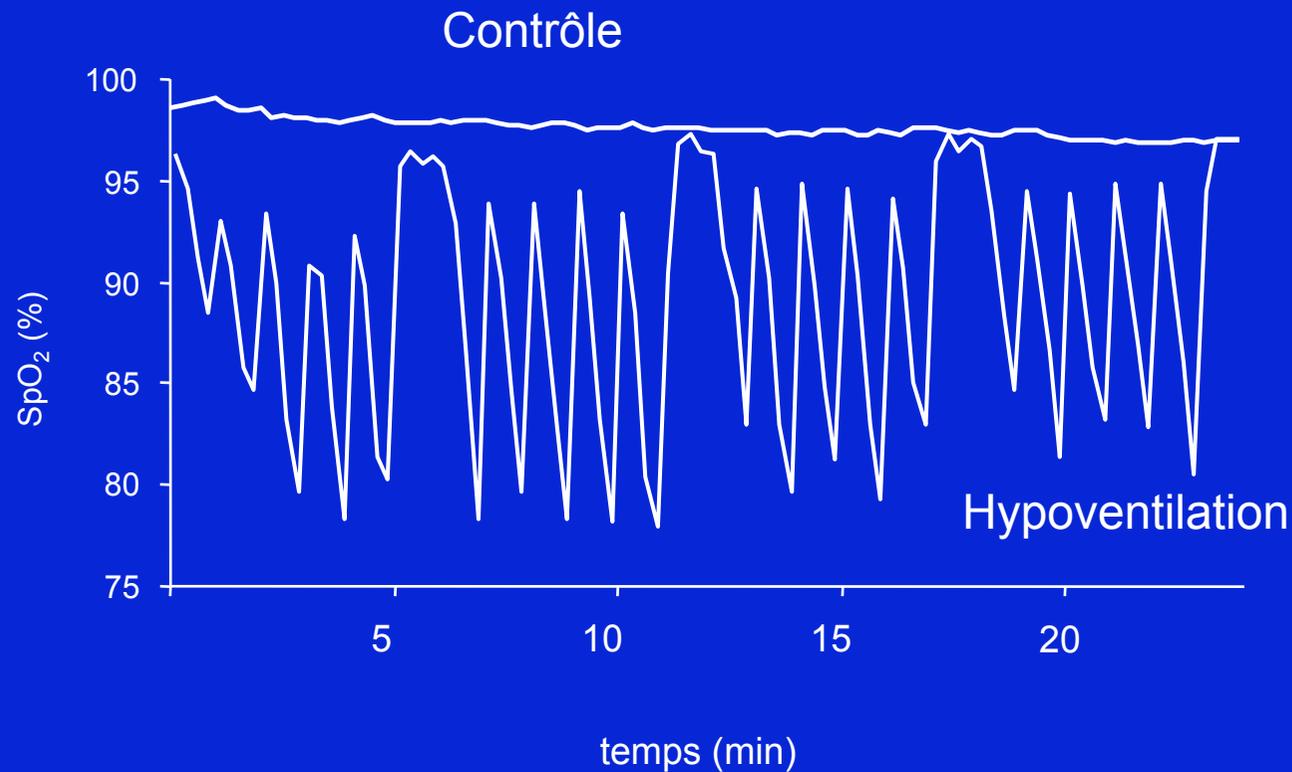
40% $\dot{V}O_{2max}$

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

SpO₂ 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 est l' objet d' études nouvelles.
- **L' hypoventilation** volontaire pourrait être une alternative « bon marché ».