

# Intérêt de la préparation en altitude pour les sports collectifs

Charles-Yannick Guezennec

Département de Médecine du Sport Hôpital Saint Jean  
Perpignan

Laboratoire Performance Santé Altitude  
Université de Perpignan Via Domitia

# Compétitions en altitude

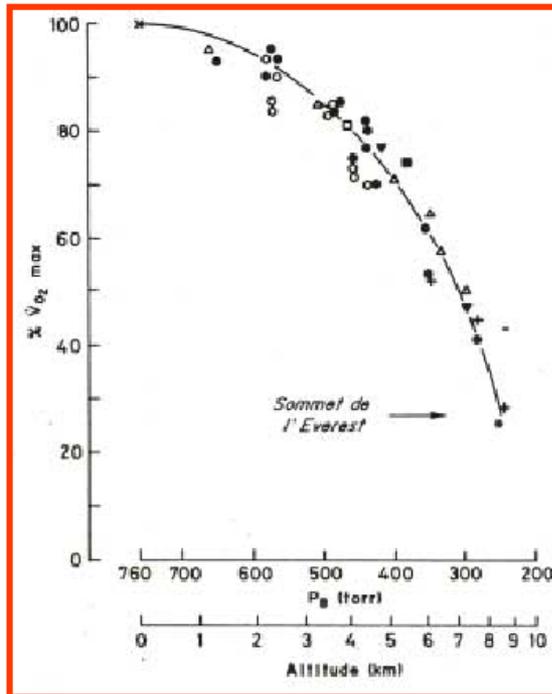
- Depuis les Jeux de Mexico l'entraînement en moyenne altitude (**1600m-2500m**) est utilisé pour **préparer des compétitions en altitude**
- L'entraînement en altitude est aussi proposé comme une méthode permettant **d'améliorer les performances lors du retour en plaine**
- L'acclimatation à l'altitude produit des adaptations qui **améliorent le transport et l'utilisation de l'oxygène** au niveau périphérique et central



# La conséquence principale de l'exposition à l'altitude est la diminution de la capacité aérobie

## Adaptations à l'exercice

La réponse intégrée : la consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ )



La  $VO_{2max}$  ↓ avec l'altitude

A partir de 1600 m, à chaque fois qu'on s'élève de 300 m, la  $VO_{2max}$  ↓ de 3%

Exemples :

À 2400m la  $VO_{2max}$  = 90% de  $VO_{2max}$  en plaine,

A 3100m = 80% de  $VO_{2max}$  en plaine.

A 7500 m = 40% de  $VO_{2max}$  en plaine.

Everest vaincu pour la 1ère fois en 1953 mais seulement en 1978 sans apport d'O<sub>2</sub>.

$VO_{2max}$  inférieure à celle de repos :  
(~10 ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>)

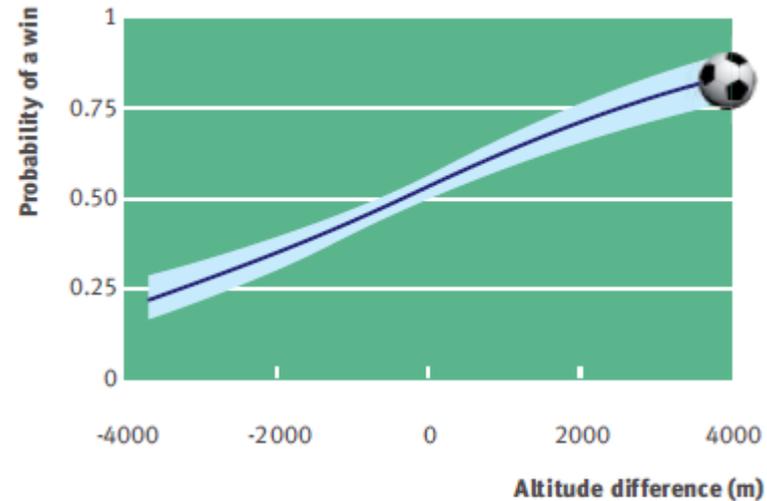
# Compétition de sports collectifs et altitude

- Les conditions environnementales de la coupe du monde 2010 de football en Afrique du Sud ont permis d'aborder la question des effets de la moyenne altitude sur la performance ([Nassis GP. J Strength Cond Res 2013](#))
- Les matchs se sont déroulés au niveau de la mer et à 660, 1200-1400, 1401-1753 m
- L'analyse des distances parcourues en match et des gestes techniques montrent que la performance en endurance est altérée au dessus de 1200m sans modifications des habiletés techniques ( coups au but, erreurs des gardiens, nombre de dribbles)

# Les effets de l'adaptation à l'altitude

McSharry BMJ 2007;335:1278-81

- L'analyse de 1460 matchs de football joués en Amérique du Sud entre 1900 et 2004 pour des altitudes se situant entre le niveau de la mer et 3700m montrent que les équipes composées de natifs de l'altitude ont un avantage certain au dessus de 1000m et le gain de coups au but augmente de moitié pour chaque élévation de 1000m



Ces résultats ont conduit la FIFA à interdire les matchs internationaux au dessus de 2500m en 2007

# L'intérêt de l'entraînement en moyenne altitude

- Depuis les J.O. de Mexico de nombreux travaux ont été consacré aux effets de l'entraînement en moyenne altitude (538 référencées sur Pub Med)
- Ces études se sont attachées à deux aspects complémentaires:

## **Les adaptations physiologiques**

### **Les effets sur la performance**

- On a souvent inféré des résultats d'une de ces question pour répondre à l'autre:
- Exemple: la **Polyglobulie d'altitude** améliore systématiquement la performance en endurance
- **La réalité est plus complexe:** les effets sur la performance dépendent de nombreux autres facteurs: **muscle, métabolisme, ventilation, système nerveux autonome....**



**Font Romeu 1850m**

# Comment s'entraîner en hypoxie

## Altitude naturelle VS Hypoxie artificielle

Revue par Wilber MSSE 2007

### 1-Vivre et s'entraîner en altitude LHTH

- **2-Living High Training Low (LHTL)** La vie en altitude au dessus de 2500m et l'entraînement en faible altitude en dessous de 1500m permet d'acquérir les adaptations à l'hypoxie en réduisant les effets du désentraînement associé à l'entraînement en altitude. (Levine and Stray-Gundersen. *J. Appl. Physiol.* 1997):**2000-2500m/4sem/22hjour**
- **3-Intermittent Hypoxic Training (HT)** L'entraînement en hypoxie et la vie en basse altitude, la synthèse des données montrent que les effets sur l'érythropoïèse sont très inconstant. (Vallier et al. 1996)
- **Il y a des interrogations éthiques sur l'utilisation de l'hypoxie artificielle (WADA) ce qui soutien l'intérêt de vivre et s'entraîner en altitude naturelle (LHTH)**



# L'adaptation à l'altitude

- Si l'exposition à l'hypoxie se prolonge au delà de quelques heures, l'organisme met en route des mécanismes d'adaptation qui vont progressivement prendre le relais de l'hyperventilation et de la tachycardie .
- Ces mécanismes ne seront efficaces que si l'exposition à l'altitude est progressive et suffisamment prolongée
- Le phénomène le plus important est l'apparition d'une polyglobulie qui va accroître la capacité de transport de l'oxygène dans le sang. L'élévation de celle-ci n'est sensible qu'après 8 à 10 jours en altitude

# Deux types d'adaptations

## • Adaptations hémato­logiques

- **Augmentation de la concentration des érythrocytes et de l'hémoglobine (HB)** (Berglund Sports Med 1992) rapide les premiers jours puis plus lente, cette évolution peut s'étendre sur plusieurs mois.
- **L'augmentation de [Hb] est de 1 % par semaine à 2500 m** et peut atteindre 12% après 12 semaines à cette altitude. Il semblerait qu'une exposition à une altitude supérieure à 1600-1800 m soit nécessaire pour stimuler l'érythropoïèse
- **L'augmentation de l'EPO** est considérée comme le facteur principal de la stimulation de l'érythropoïèse. Sa réponse est variable selon les études: maximale au bout de 24 à 48h d'exposition à l'altitude et diminue au bout d'une semaine. Le niveau de la réponse dépend de l'altitude où vit et s'entraîne l'athlète
- **L'hypothèse initiale d'une amélioration des performances en endurance reposait principalement sur cet effet hémato­logique**

- **Adaptations non hémato­logiques**
- Gore et al MSSE 2007: selon cet auteur 86% de la variance du Vo2max en réponse à l'hypoxie serait due à ces adaptations
- L'observation d'une **amélioration des performances sans modifications hémato­logiques** majeures a soutenu l'intérêt pour les facteurs d'adaptation non hémato­logiques
- **Musculaire:** amélioration des fonctions mitochondriales, effet tampon. Capillarisation, myoglobine
- **Métabolique:** stimulation des voies glycolytiques (Hochachka et al 1991)
- **Ventilatoires :** augmentation de la réponse ventilatoire à l'hypoxie
- L'ensemble de ces adaptations serait responsable d'une:  
**Amélioration du rendement énergétique**

# Effets de l'altitude sur les voies métaboliques et la structure des tissus contractiles

- **Le muscle:** L'exposition à la haute altitude se traduit par une diminution de la surface des fibres musculaires avec une augmentation du réseau capillaire et une redistribution des mitochondries à la périphérie: ce processus aboutit à une meilleure diffusion de l'O<sub>2</sub> du sang vers la machinerie métabolique (Hoppeler Experimental Physiology 2003)
- Sur le plan métabolique, l'adaptation à l'entraînement en altitude se traduit par une augmentation de l'utilisation du glucose et une diminution de la production de lactate (paradoxe du lactate Hochachka Ann Sports Med 1988).
- L'entraînement physique en moyenne altitude augmente le pouvoir tampon du muscle : **il en résulte un maintien et parfois une augmentation des capacités anaérobies en moyenne altitude (Mizuno et al J Appl Physiol 1990)**
- **Le coeur:** le coeur s'adapte à la haute altitude en améliorant son efficacité mécanique (Guezennec et al Aviat Space 1987). La masse du ventricule gauche est augmentée chez des athlètes après un stage prolongé en altitude (Svedenhag et al Acta Physiol Scand 1997)

# Les mécanismes: rôle central de l'Hypoxic Inductible Factor (HIF)

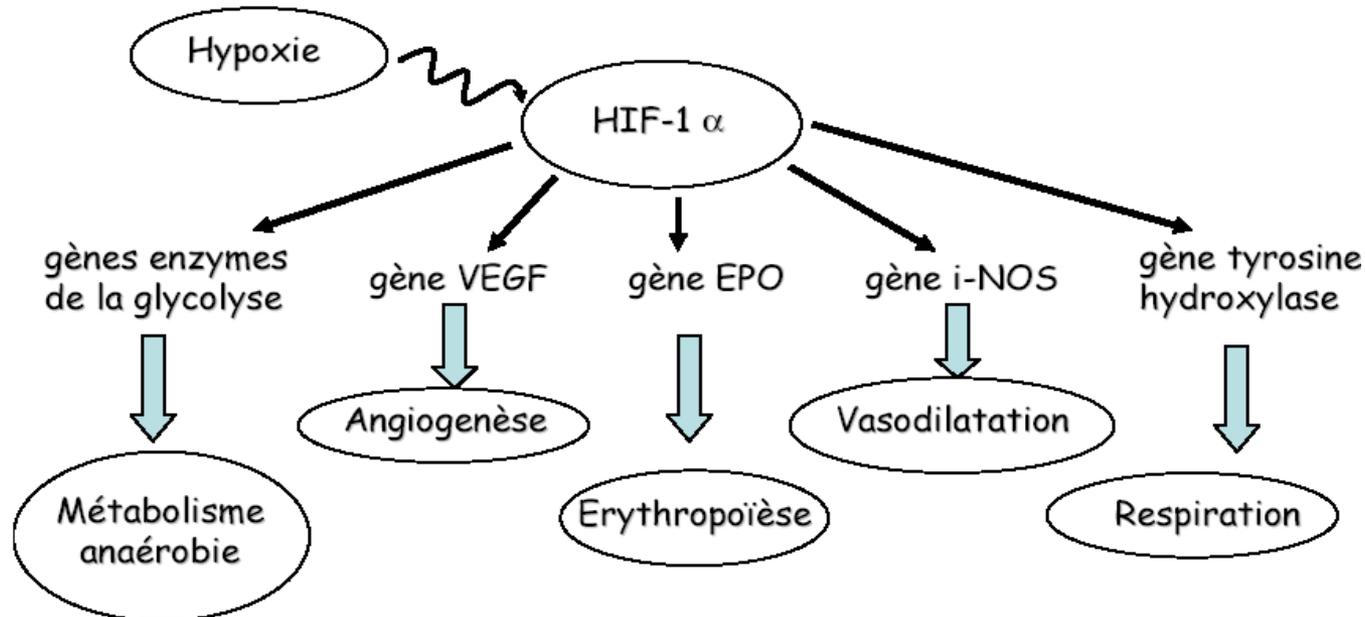
Hoppeler et al Experimental Physiology 2003

**HIF** est un facteur de transcription présent dans de nombreux tissus sous la forme d'un hétérodimère. Il est considéré comme le chef d'orchestre de l'ensemble des réactions et adaptations en réponse à l'hypoxie.

Selon Gore et al 2007 la multiplicité des effets de HIF expliquerait les deux types d'adaptation

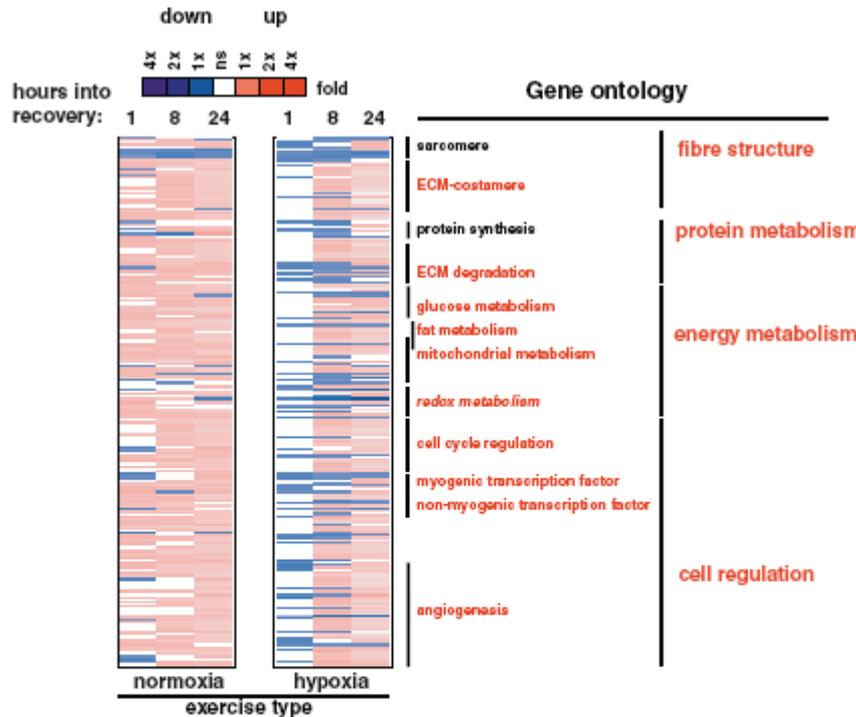
## Une molécule centrale

HIF-1 $\alpha$  : Hypoxia inducible factor 1 -alpha

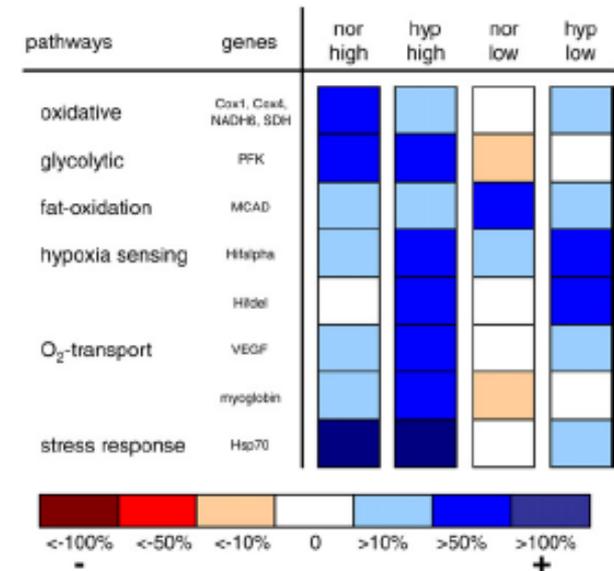


**La réponse est proportionnelle à l'altitude et à l'intensité de l'entraînement**

# Effets de l'entraînement en altitude sur la régulation de l'expression des gènes: les données concordent pour montrer: un remaniement cellulaire et une réorientation des voies métaboliques



**Figure 2. Transcript signature of recovery from exercise in normoxia and hypoxia**  
 Composite figure visualizing the fold changes of regulated transcripts according to gene ontology (GO) throughout the first day of recovery from exercise in normoxia and hypoxia ( $n = 6$  subjects each). The median of fold differences versus pre-exercise levels for significantly altered transcripts 1, 8 and 24 h postexercise (SAM for two paired classes,  $n = 6$  per time point) is visualized by coloured stripes (red, up; blue, down; white, not significant, ns). Names in red demarcate those GOs whose transcripts demonstrated significantly different or tenuously different regulation (italics) during the time course of 'recovery from exercise' between the 'training types' (SAM for a two-class unpaired time course based on signed area).



**Fig 3. Pattern of the changes in different [mRNAs] measured in musculus vastus lateralis of previously untrained subjects.** The more blue the staining, the higher the increase. Subjects trained for 6 weeks in 4 different groups: nor-high indicates normoxia high intensity; hyp-high, hypoxia high intensity; nor-low, normoxia low intensity; hyp-low, hypoxia low intensity (data from Vogt et al (2001)<sup>20</sup>).

Vogt et al Progr Cardio Disease 2010

Schmutz et al Exp Physiol 2010

## Les résultats expérimentaux indiquent une forte variabilité de la réponse physiologique et des performances

- Une revue de question récente de De Paula et Niebauer Sleep Breath 2010 soulignent **les disparités entre les phénomènes physiologiques attendus et les effets sur la performance**
- Certaines études rapportent un effet sur la performance sans modifications hématologiques (Katayama et al 2004, Hamlin et al 2007)
- D'autres montrent une réponse de l'EPO sans modification des paramètres hématologiques (Gore et al 2006)
- Cependant ces auteurs soulignent le fait que lorsque les bonnes conditions méthodologiques sont respectées: l'augmentation du volume globulaire est associé avec une augmentation du  $\text{Vo}_2\text{max}$  et de la performance en endurance (Levine and Stray-Gundersen 1997)

Le résultat de l'entraînement en moyenne altitude résulte de la **balance entre effets négatifs et positifs**

### **Effets positifs:**

- Augmentation de la capacité de transport de l'oxygène dans le sang
- Amélioration du métabolisme musculaire
- Stimulation de la fonction respiratoire
- Amélioration du rendement de la locomotion
- Facilitation du schéma moteur dans les disciplines de vitesse

### **Effets négatifs:**

- Diminution de la puissance absolue de travail aérobie
- Troubles du sommeil et de l'appétit
- Diminution des défenses immunitaires

# Intérêt de l'entraînement en altitude pour les sports collectifs

**Ce qui est bien établi** et recherché par les équipes qui utilisent la préparation en altitude

Améliorer les capacités d'endurance

Améliorer l'aptitude à réaliser des performances en altitude

**Ce qui est moins connu**

Améliorer la capacité à répéter des efforts courts et intenses

Augmenter la masse musculaire

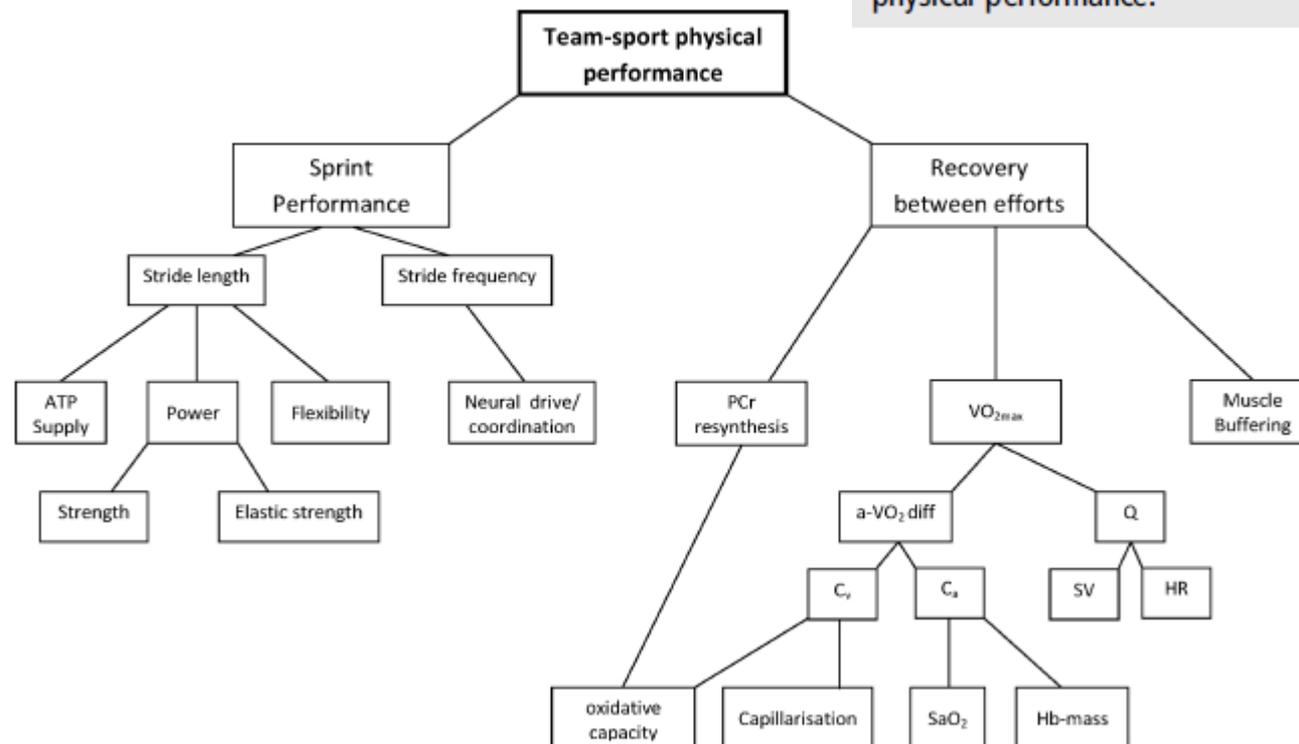
Diminuer la masse grasse

Stimuler la prise d'information visuelle et les habiletés motrices

# Intérêt théorique de l'entraînement en altitude pour la pratique des sports collectifs

Bishop et Girard Br J Sports Med 2013

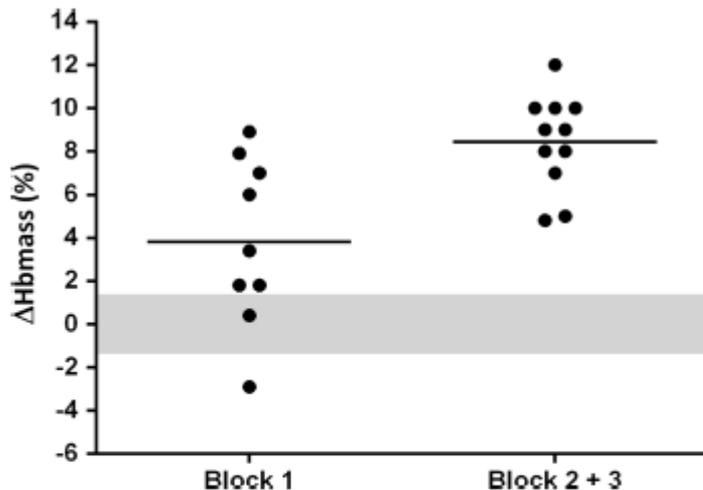
This review highlights that there is theoretical support for the use of altitude training by team-sport athletes. However, it also highlights the need for further research to verify that altitude training can promote greater physiological adaptations than appropriate sea-level training and that these greater physiological adaptations translate to improved team-sport physical performance.



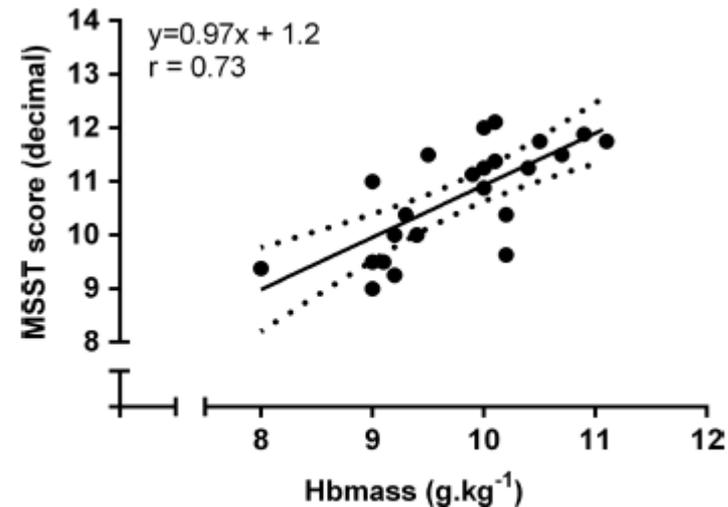
Contrairement aux sports d'endurance il existe peu d'étude sur le gain de capacité aérobie résultant de l'entraînement en hypoxie pour les sports collectifs

Il est donc intéressant de se référer à celle réalisée sur les joueuses de water polo Australienne (Garvican-Lewis LA, et al. Br J Sports Med 2013)

Les joueuses ont effectuées 3 périodes de LHTL 11j 300m puis 9j 2500m puis 10j 2800m



**Figure 2** Individual (black circles) and mean changes (solid line) in haemoglobin mass (Hbmass) following each simulated live high: train low altitude exposure compared to preseason values. Block 1: 11 days at 3000 m; block 2+3: change in Hbmass following 9 days at 2500 m, followed by 11 days in normoxia then 10 days at 2800 m. Shaded area indicates typical error of Hbmass measurement.



**Figure 3** Relationship between haemoglobin mass (Hbmass) and the Multistage Shuttle Swim Test (MSST). Dotted lines indicate the 95% confidence band of regression line.

► Simulated live high:train low may provide an alternative means of increasing oxygen transport capacity (through haemoglobin mass) in water polo players without inducing musculoskeletal load; however, whether these adaptations translate to improved match fitness or performance remains to be elucidated.

Le gain de capacité aérobie est très net pour une équipe de 12 basketteurs réalisant 5x4 min à 90% Vo<sub>2</sub>max à 2500 m 3x3 sem en chambre hypobare (**Czuba et al J of Human Kinetics 2013**)

*Average values of considered variables registered during the ramp test in the hypoxic (H) and control (C) groups, as well as the significance of differences between both series of testing during the experiment ; \*\*\* - p<0.001, \*\*-p<0.01, \*- p<0.05*

| Variable                                   | Hypoxic (H) group |                      | Control (C) group |                    |
|--|-------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
|  | Before training   | After training       | Before training   | After training     |
|  | n=6<br>x ± SD     | n=6<br>x ± SD        | n=6<br>x ± SD     | n=6<br>x ± SD      |
| Total distance (m)                         | 2644.6<br>±489.8  | 2909.3<br>±470 ***   | 2313.2<br>±379.8  | 2407.3<br>±379.7   |
| WR <sub>max</sub> (W)                      | 380.3<br>±55.1    | 397.6<br>±50.5 **    | 426.1<br>±20.8    | 433.5<br>±21       |
| WR <sub>max</sub> (W/kg)                   | 4.52<br>±0.36     | 4.8<br>±0.34 **      | 4.30<br>±0.43     | 4.42<br>±0.47 *    |
| VO <sub>2</sub> max (ml/min)               | 4416.3<br>±461.6  | 4701.6<br>±467.2 *** | 5247.3<br>±397.6  | 5314.3<br>±384.2 * |
| VO <sub>2</sub> max(ml/kg/min)             | 52.6<br>±3.9      | 56.7<br>±4.1 ***     | 53<br>±5.2        | 54.1<br>±5.2 *     |
| RER <sub>max</sub>                         | 1.1<br>±0.03      | 1.09<br>±0.02        | 1.07<br>±0.01     | 1.08<br>±0.02      |
| VE <sub>max</sub> (l/min)                  | 154.9<br>±16.9    | 155.3<br>±11.6       | 170.4<br>±17.9    | 171.2<br>±18.5     |
| BF <sub>max</sub> (l/min)                  | 59.6<br>±7.1      | 59.7<br>±8.4         | 55.4<br>±7.9      | 55.2<br>±7.7       |
| HR <sub>max</sub> (bpm)                    | 185<br>±6         | 182<br>±5 *          | 182<br>±5         | 183<br>±6          |
| O <sub>2</sub> /HR <sub>max</sub> (ml/bpm) | 23.8<br>±2.9      | 25.8<br>±2.9 ***     | 28.9<br>±2.1      | 29<br>±2.0         |
| ΔLA (mmol/l)                               | 8.25<br>±1.63     | 7.46<br>±1.13 **     | 8.58<br>±1.60     | 8.37<br>±1.73      |
| ΔLA 12'rec (mmol/l)                        | -2.12<br>±0.88    | -2.57<br>±0.77 *     | -2.08<br>±0.53    | -2.17<br>±0.57     |
| ΔpH  | -0.181<br>±0.041  | -0.165<br>±0.037     | -0.174<br>±0.028  | -0.162<br>±0.029   |

# Amélioration de la capacité à répéter des sprints

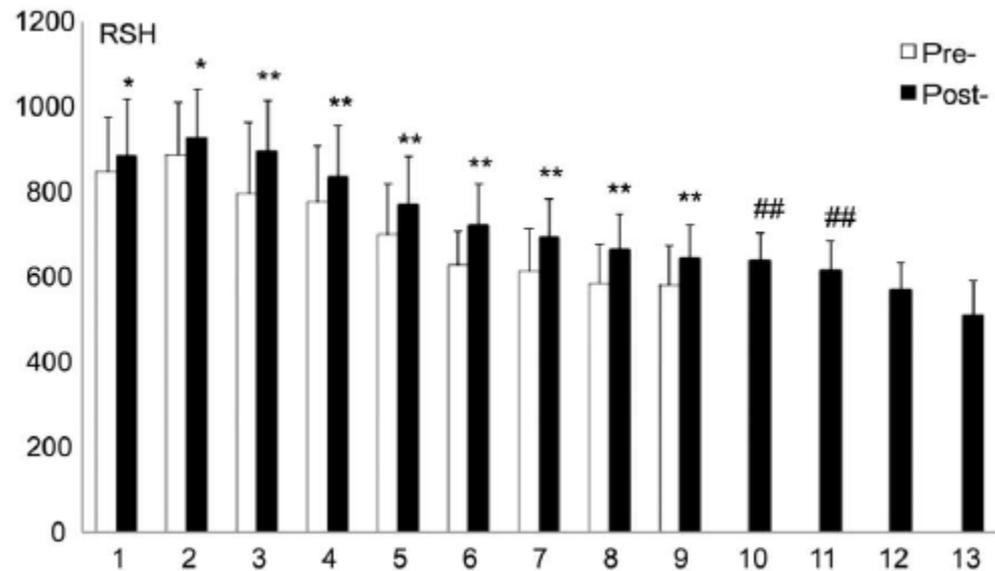
Contrairement à la variabilité de la réponse individuelle du gain de capacité aérobie  
Le gain de capacité à répéter des efforts intermittents de haute intensité semble plus constant sous l'effet de l'entraînement en hypoxie (Faiss et al PLOS one 2013)

Cet effet de l'entraînement en hypoxie a été attribué à la stimulation des voies glycolytiques qui permettent une resynthèse accélérée de la PCr

Une augmentation de la dette d'O<sub>2</sub> se produit après 15 j à 2500m et entraînement à 610m

Roberts et al Eur J Appl 2003)

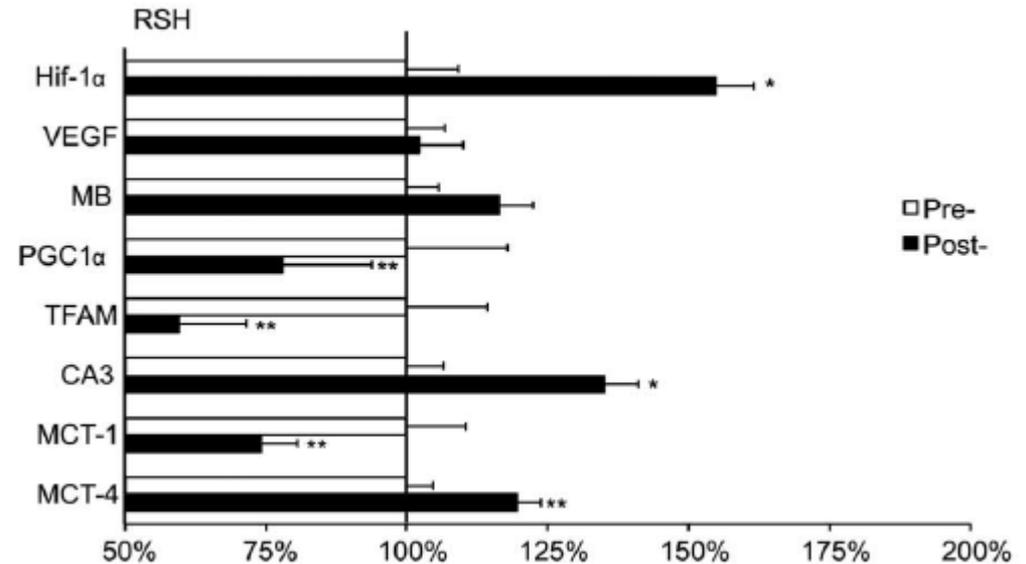
Le même effet après 14 nuits à 2100m et entraînement à 2700m ( Mizuno et al J Appl Physiol 1990)



# Pourquoi?

## Faiss et al PLOS one 2013

- Stimulation des voies glycolytiques anaérobies lors de l'exercice maximal en hypoxie
- Augmentation des capacités tampon du muscle
- Augmentation de la perfusion musculaire
- Effet survitesse due à la diminution de la densité de l'air (uniquement en hypoxie hypobare)



HIF-1a, hypoxia inducible factor-1a

VEGF, vascular endothelial growth factor

MB, myoglobin

PGC1-a, proliferator-activated receptor gamma coactivator-1a

TFAM, mitochondrial transcription factor A; CA3, carbonic anhydrase III

MCT-1, monocarboxylate transporter-1

MCT-4, monocarboxylate transporter-4

## Stimulation du gain de masse musculaire sous l'effet de l'entraînement en moyenne altitude

De façon surprenante au regard des données solidement établies en haute altitude mettant en évidence une spoliation progressive de la masse musculaire, **l'entraînement en moyenne altitude, 3 sem à 2300m, pourrait augmenter la masse musculaire et réduire la masse grasse** (Chia et al Chines J Physiol 2013)

Table 1. Changes in body composition after 3-week altitude exposure

|                          | Control (n = 8) |             |               | Altitude (n = 10) |             |               |
|--------------------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------|-------------|---------------|
|                          | <i>Pre</i>      | <i>Post</i> | <i>Change</i> | <i>Pre</i>        | <i>Post</i> | <i>Change</i> |
| Height (m)               | 1.60 ± 0.22     | –           | –             | 1.72 ± 0.09       | –           | –             |
| Body mass (kg)           | 51.9 ± 12.8     | 52.1 ± 13.1 | 0.3%          | 61.4 ± 6.4        | 61.5 ± 6.7  | 0.1%          |
| BMI (kg/m <sup>2</sup> ) | 20.5 ± 3.4      | 20.5 ± 3.4  | 0.1%          | 20.8 ± 1.3        | 20.8 ± 1.3  | 0.1%          |
| Lean mass (kg)           | 39.5 ± 14.6     | 39.4 ± 15.1 | -0.2%         | 48.9 ± 8.0        | 49.7 ± 8.0  | 1.5%*         |
| Fat mass (kg)            | 10.7 ± 5.0      | 10.8 ± 4.7  | 1.9%          | 16.6 ± 5.4        | 14.9 ± 5.7  | -11.4%*       |

Selon Kon et al (J Strength Cond Res 2012) la réponse à un entraînement en musculation serait stimulée par une réponse hormonale plus élevée de l'axe somatotrope à l'exercice physique en moyenne altitude.

**Ce phénomène pourrait aussi résulter d'un effet altitude sur la sensibilité musculaire à l'insuline.**

# Les effets de l'hypoxie hypobare sur la coordination visuo-motrice

- Dans tous les sports de balle, les balles vont plus vites
- Les partenaires et les adversaires se déplacent plus vites sur de courtes distances
- Au dessus de 3000m il peut se produire une légère diminution de la prise d'information visuelle périphérique
- **Au total la contrainte visuo-motrice de la prise d'informations est augmentée lors des entraînements en moyenne altitude**

En pratique que proposer pour une équipe de Volley Ball qui souhaite s'entraîner en altitude

- Respecter les recommandations déjà bien établie: réduire volume et intensité dans la période initiale
- En plus du gain potentiel de capacité aérobie, utiliser l'entraînement en altitude pour augmenter les capacités de force vitesse
- Renforcer le suivi individuel pour éviter les effets négatifs de l'entraînement en altitude

# Il faut adapter l'entraînement

- Dès que l'athlète est exposé à l'altitude ses possibilités aérobies sont systématiquement limitées. Il est important de tenir compte de cette contrainte dans la planification de l'entraînement et de la récupération. Le niveau absolu de travail aérobique est diminué ce qui peut entraîner une perte de l'adaptation musculaire
- la puissance anaérobie n'est pas modifiée. En moyenne altitude, les possibilités de l'athlètes au cours d'un exercice bref et intense sont donc préservées
- **. La préparation physique en musculation devient un élément d'adaptation et de préservation des qualités musculaires**
- **Le travail intermittent court étant un élément clef de la préparation en altitude pour les sports collectifs**

# Comment optimiser les effets de l'entraînement en altitude

- Une revue de question (Mazzeo et al Sports Med 2004) montre que ce résultat est plus net lorsque certaines conditions sont respectées:
- Il faut prendre en compte le fait que l'entraînement intensif d'athlètes de haut niveau en moyenne altitude équivaut au stress métaboliques de la haute altitude. Il faut donc appliquer les **principes de la préservation des capacités physiques en haute altitude**
- **Sommeil**
- **Nutrition**
- **Récupération**

# Rôle clé de la nutrition

- **Avant** l'exposition à l'altitude augmenter les stocks d'éléments critiques pour la tolérance à l'entraînement et à la performance
- Fer
- Réserve glycogénique
- **Pendant** le stage en altitude: augmenter légèrement l'apport calorique et l'apport en CHO
- Augmenter l'hydratation

# Le Fer

- L'entraînement intense en altitude augmente le besoin en Fer
- Stray-Gundersen et al (1992) ont montré que les athlètes présentant un statut en Fer faible avant un stage en altitude n'avait pas de réponse sur la stimulation de la production de Globules Rouges
- Ces auteurs proposent d'augmenter l'apport en fer pour obtenir avant un stage en altitude un statut en Ferritine au dessus de 20ng/ml pour les femmes et de 30ng/ml pour les hommes

# La réponse individuelle à l'entraînement en altitude est elle un trait fixe

McLean et al BMJ 2014

Ces auteurs ont comparé la réponse hématologique de 12 joueurs de football Australien effectuant 2 stages à 2100m séparés d'un an: leurs conclusions sont:

- ▶ Team sport athletes produce repeatable group mean increases in  $Hb_{mass}$  (~4%) over 18–19 day moderate altitude camps, and these benefits may be achieved in as short as 13 days.
- ▶ Individual athletes do not exhibit consistency in altitude-induced changes in  $Hb_{mass}$  from year to year, and thus a 'responder' or 'non-responder' to altitude does not appear to be a fixed trait.
- ▶ To achieve full erythropoietic benefit from altitude exposure, athletes should maintain body mass and remain free from illness immediately before and throughout the exposure.

# Conclusions

- L'entraînement en altitude/hypoxie peut être proposé aux Volleyeurs
- Le développement des qualités de force/vitesse doit être un des objectifs principaux
- La préparation avant le stage doit se centrer sur les apports nutritionnels et la prévention des infections respiratoires banales
- Pendant le stage le suivi individuel s'appuyer sur un agenda de sommeil et un dépistage précoce des signes de fatigue