

# Sports d'endurance en montagne – Les *clés* de la *réussite* –



François Nicot

<http://securite-en-montagne.e-monsite.com>



## **Sports d'endurance en montagne : les clés de la réussite**

Ce thème sera décliné en 5 volets, chaque volet faisant donc l'objet d'une conférence-débat. L'idée est de favoriser au cours de ces soirées une ambiance d'échanges, constructive et conviviale.

Les sports concernés sont essentiellement :

course à pied, trail, ski de fond, ski-alpinisme, cyclisme

Horaire : 20h00 – 22h00

Lieu : salle Veyton, Allevard

Entrée gratuite

## Programme :

### **Vendredi 18 décembre 2015**

Spécificités physiques de l'environnement montagnard

F. Nicot

### **Vendredi 15 janvier 2016**

Principes physiologiques des sports d'endurance : peut-on tous performer ?

F. Nicot

### **Vendredi 05 février 2016**

Effets de l'altitude sur la performance : le cumul des stress

F. Nicot

### **Vendredi 11 mars 2016**

Sports et nutrition : principes généraux et règles pratiques

F. Nicot

### **Vendredi 15 avril 2016**

Pathologies sportives : prévention et gestion des blessures

F. Nicot, avec les interventions de médecins du sport, kiné, ostéopathe, podologue

# Effet de l'altitude sur la performance :

## Le cumul des stress

- ➡ Rappel sur les conséquences physiques de l'altitude
- ➡ Le stress thermique : chaud ou froid ?
- ➡ Le stress hypoxique : le déclin de  $VO_2^{\max}$
- ➡ Le stress oxydant



# On en est où ?

## 👉 Rappel sur les conséquences physiques de l'altitude

👉 Le stress thermique : chaud ou froid ?

👉 Le stress hypoxique : le déclin de  $VO_2_{max}$

👉 Le stress oxydant

# Rappel des déterminants du milieu montagnard

## Éléments fondamentaux

- Conditions météo (température, brouillard, vent, précipitations, orages)
- Altitude

## L'être humain dans ce contexte

- Réponse physiologique (accommodation / acclimatation)
- Adaptations comportementales (équipement, acte moteur, apprentissage)

# Décroissance de la température

## La température

Elle décroît avec l'altitude. On admet en moyenne :

1 °C / 100 m (air sec)

0.5 °C / 100 m (air saturé : pluie, brouillard, neige)

Limite pluie/neige : 300 m en dessous de l'isotherme '0 °C'

**Ex.** Allevard (alt. 450 m) :

$t^{\circ} = +2 \text{ °C}$


Météo = pluie

Au col du Barioz (alt. 1050 m) :

$(1050 - 450) \times 0.5 \sim 3 \text{ °C}$

$t^{\circ} = -1 \text{ °C}$

Météo attendue au col = neige

 Limite pluie/neige : vers  m d'altitude ?



# L'influence du vent : indice Windchill

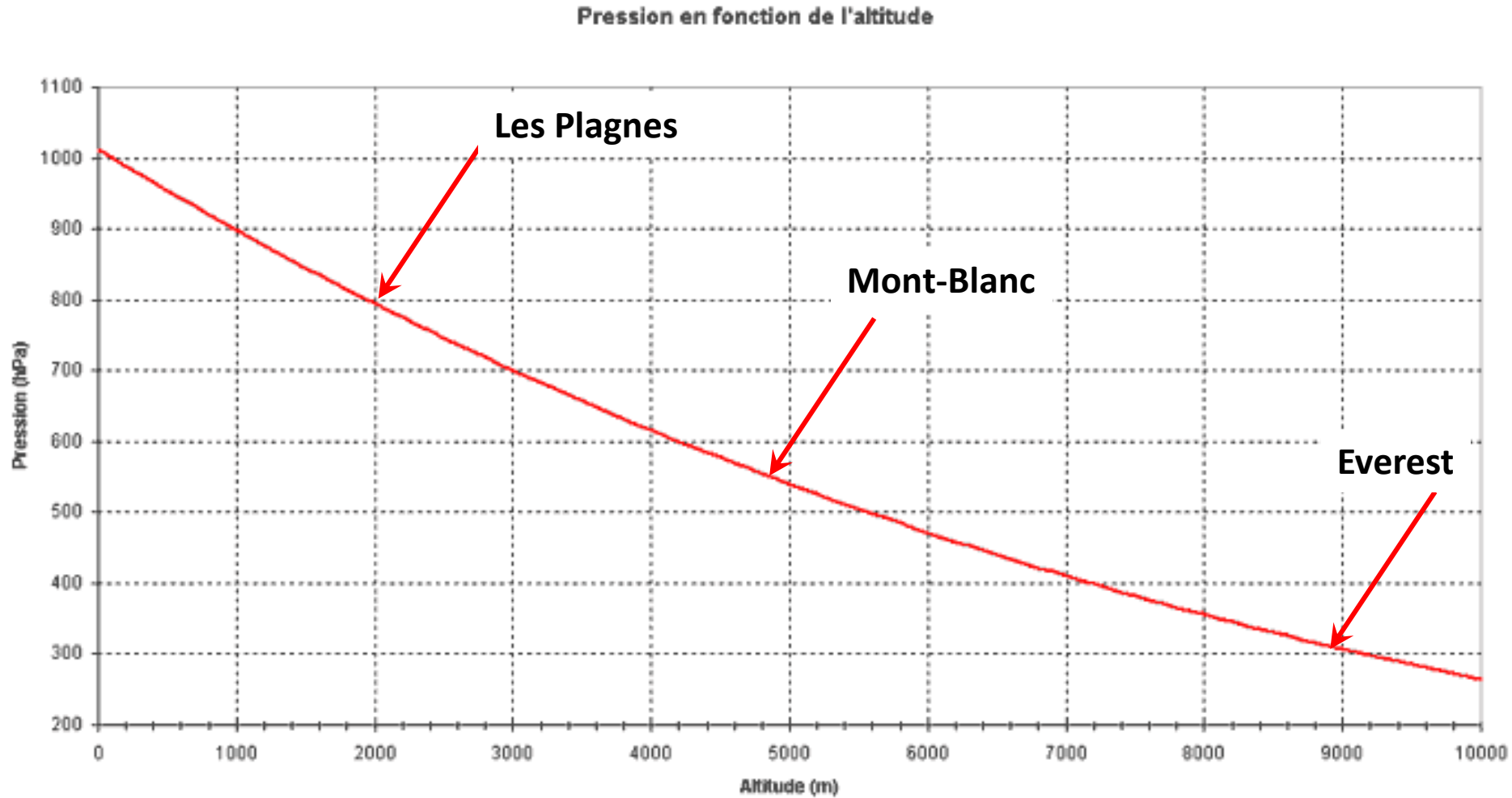
## Effet Windchill

vent/temp	+ 5 °c	+ 0 °c	- 5 °c	- 10 °c	- 15 °c	- 20 °c	- 25 °c	- 30 °c	- 35 °c
5 km/h	+ 4 °c	- 1 °c	- 6 °c	- 11 °c	- 16 °c	- 21 °c	- 26 °c	- 31 °c	- 36 °c
10 km/h	+ 2 °c	- 4 °c	- 10 °c	- 14 °c	- 20 °c	- 25 °c	- 30 °c	- 36 °c	- 42 °c
15 km/h	+ 0 °c	- 8 °c	- 13 °c	- 17 °c	- 25 °c	- 30 °c	- 37 °c	- 43 °c	- 51 °c
20 km/h	- 1 °c	- 9 °c	- 16 °c	- 22 °c	- 29 °c	- 35 °c	- 41 °c	- 48 °c	- 55 °c
25 km/h	- 3 °c	- 11 °c	- 19 °c	- 25 °c	- 32 °c	- 39 °c	- 45 °c	- 53 °c	- 59 °c
30 km/h	- 5 °c	- 13 °c	- 20 °c	- 27 °c	- 34 °c	- 41 °c	- 47 °c	- 56 °c	- 62 °c
35 km/h	- 7 °c	- 14 °c	- 22 °c	- 29 °c	- 36 °c	- 43 °c	- 50 °c	- 58 °c	- 65 °c
40 km/h	- 9 °c	- 15 °c	- 23 °c	- 30 °c	- 37 °c	- 45 °c	- 52 °c	- 61 °c	- 68 °c
45 km/h	- 11 °c	- 16 °c	- 25 °c	- 32 °c	- 39 °c	- 47 °c	- 54 °c	- 63 °c	- 70 °c
50 km/h	- 12 °c	- 17 °c	- 26 °c	- 33 °c	- 40 °c	- 48 °c	- 55 °c	- 64 °c	- 72 °c
55 km/h	- 12 °c	- 18 °c	- 26 °c	- 34 °c	- 40 °c	- 49 °c	- 56 °c	- 65 °c	- 74 °c
60 km/h	- 12 °c	- 19 °c	- 27 °c	- 36 °c	- 41 °c	- 50 °c	- 57 °c	- 66 °c	- 74 °c
65 km/h	- 12 °c	- 20 °c	- 28 °c	- 36 °c	- 43 °c	- 51 °c	- 58 °c	- 68 °c	- 75 °c

La sensation de froid par une température de 0° C et avec un vent de 20 km/h est la même que par une température négative de - 9° C sans vent



# Décroissance de la pression



# Effets de l'altitude

## Incidences physiques de l'altitude

- Diminution de la pression partielle d'Oxygène de l'air
- Elle est directement proportionnelle à la diminution de la pression avec l'altitude

$$\frac{\Delta P}{P} = - \frac{g}{R T} \Delta z$$



## On en est où ?

- ☞ Rappel sur les conséquences physiques de l'altitude
- ☞ **Le stress thermique : chaud ou froid ?**
- ☞ Le stress hypoxique : le déclin de  $VO_2^{\max}$
- ☞ Le stress oxydant

# Efforts d'endurance en ambiance froide

- ✓ L'ambiance froide est essentiellement contraignante au plan ventilatoire (arbre bronchique)
- ✓ L'effort physique permet une thermogénèse induite (production de chaleur endogène)

Cout énergétique d'une activité physique : **MI**

**25 %**

Travail mécanique  
(Travail musculaire effectif)

**75 %**

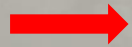
Energie dissipée en chaleur  
(Augmentation de la t° corporelle)



# Efforts d'endurance en ambiance froide

## La réponse physiologique au froid

- ✓ Centres thermorégulateurs de l'hypothalamus
- ✓ Stimulation du système endocrinien (Thyroïde, Adrénaline, Nad)



Vasoconstriction périphérique (risque de gelure)  
Redistribution sanguin vers les organes centraux  
Le muscles sont moins vascularisés  
Frissons (pilo-érection)

## Les mécanismes d'acclimatation

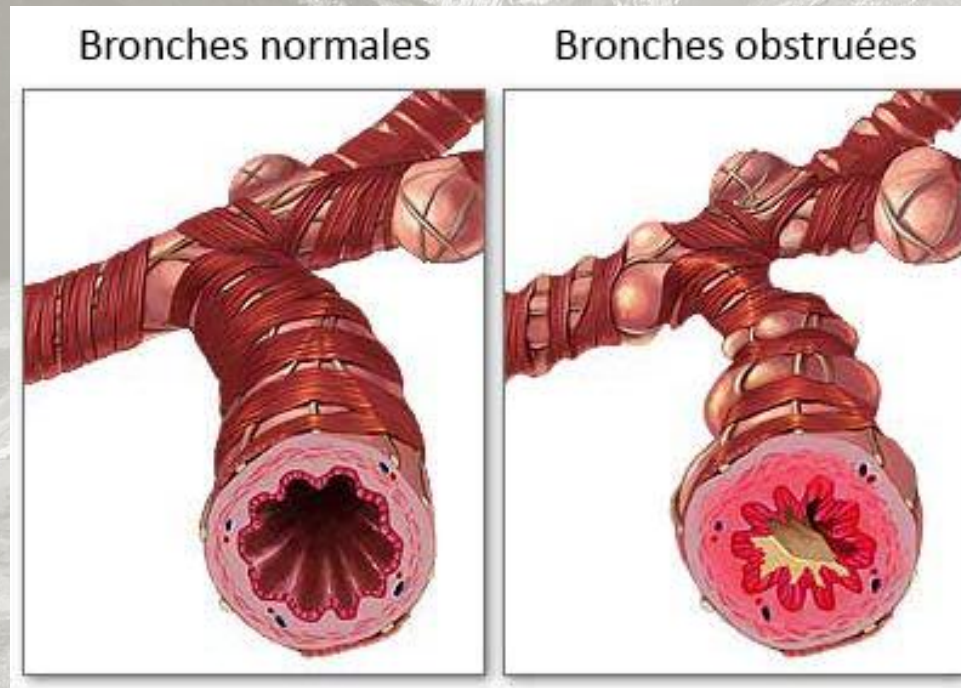
- ✓ Retard des frissons (consommateurs d'énergie)
- ✓ Réduction de la vasoconstriction (limite le risque de gelure)
- ✓ Meilleure redistribution du flux sanguin (territoires musculaires)

# Efforts d'endurance en ambiance froide

## Les complications liées au froid

- ✓ Risque de gelures
- ✓ Atteintes au niveau pulmonaire (efforts soutenus en ambiance froide et sèche)

Hyper réactivité bronchique  
Broncho constriction induite par l'exercice





# Efforts d'endurance en ambiance chaude

## Le corps a un choix difficile à faire :

- ✓ Assurer l'apport d'oxygène aux muscles tout en préservant son statut hydrique
- ✓ Refroidir impérieusement le moteur musculaire, au risque de défaillance (éventuellement mortelle)

# Le rendement musculaire

Cout énergétique d'une activité physique : **MI**

**25 %**

Travail mécanique  
(Travail musculaire effectif)

**75 %**

Energie dissipée en chaleur  
(Augmentation de la t° corporelle)

## Augmentation de la température corporelle

**0.83 Kcal** : élève la t° d'**1** Kg de poids du corps de **1** deg

Il faut **0.83** Kcal pour élever la t° d'**1** Kg de poids corporel de **1** degré

Ex. Poids 60 Kg, course de 15 Km : MI = 900 Kcal

Energie dissipée en chaleur :  $0.75 \times 900 = 675$  Kcal

Augmentation de la t° corporelle :  $675 / 0.83 / 60 = 13.5$  °C !!!



Refroidissement par évaporation de la transpiration  
(on perd **580 Kcal** par **litre** de transpiration évaporée)



# Le rôle de l'eau

## ESSENTIEL !

Le corps humain est composé de 70 % d'eau

- 75 % du travail musculaire part en chaleur → nécessité de refroidir
- Les réactions chimiques lors du métabolisme nécessitent de l'eau



L'eau est nécessaire pour :  
- faire fonctionner le moteur  
- refroidir le moteur

## HYDRATATION et PERFORMANCE

On perd 5 à 10 % de VMA par perte d'eau de 1 % du poids du corps

Ex. 60 Kg, **VMA = 20 Km/h**

Perte d'eau : 2 litres (= 2 Kg) → chute de la VMA  
 $(7.5 / 100) \times 20 \times (2 / 60) \times 100 = 5 \text{ Km/h}$

La VMA descend à **15 Km/h** (chute de 25 %)

# Thermorégulation (1)

L'organisme émet de la transpiration au travers de la peau par les *glandes sudoripares*  
Cela représente une perte d'eau pour l'organisme

Le refroidissement s'effectue uniquement par **évaporation** de la transpiration



On dissipe 580 Kcal de chaleur par litre de transpiration évaporée

- Quand la transpiration coule sur la peau et tombe au sol, c'est de l'eau perdue pour rien. Elle ne permet pas de refroidir le corps.
- L'évaporation est d'autant plus efficace que l'air est sec.



Difficulté des efforts physiques en ambiance chaude **ET** humide.



# Thermorégulation (2)

- On refroidit également la peau par convection directe avec l'air lorsqu'il y a un déplacement suffisamment rapide (vélo) ou du vent, sans phénomène d'évapotranspiration.
- L'effort induit une augmentation résiduelle (de 1 à 2 deg) de la t° corporelle quelle que soit la thermorégulation. Elle est nécessaire au fonctionnement musculaire et à l'ensemble des réactions du métabolisme.



Importance de l'échauffement avant un effort intense

# Thermorégulation (3)

Ex. Poids 60 Kg, course de 15 Km : MI = 900 Kcal (Métabolisme Induit)

Energie dissipée en chaleur :  $900 \times 0.75 = 675$  Kcal

Augmentation de la t° corporelle : 13.5 °C

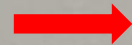
Durée de course ~ 1 heure

Evapotranspiration : 1 litre → dissipe 580 Kcal

Bilan :  $675 - 580 = 95$  Kcal →  $95 / 0.83 / 60 = 1.9$  °C

1 litre de sueur évaporé sur la peau dissipe **580 Kcal**

Il faut **0.83 Kcal** pour élever la t° d'**1 Kg** de poids corporel de **1 degré**



Augmentation de la t° corporelle de 2 °C



Les pertes en eau sont majorées en altitude par la respiration (*hyperventilation*)

Toute perte d'eau par transpiration doit être compensée par la boisson

Négliger l'hydratation expose :

- A la contre-performance (chute de la VMA)
- A l'hyperthermie



**DANGER !**



# L'acclimatation (1)

## Exposition aiguë (réponse physiologique par **accommodation**)

- ✓ Déviation (spoliation) d'une partie du flux sanguin vers les zones périphériques (peau)

→ Importance de la surface d'échange, et du choix vestimentaire

- ✓ Mécanisme de sudation

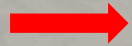
- ✓ Diminution de la volémie (eau plasmatique)

→ Augmentation des contraintes circulatoires  
Augmentation de la  $F_c$  afin de maintenir le débit cardiaque  
(dérive cardiaque au fil de l'effort)

# L'acclimatation (2)

Exposition chronique (réponse physiologique par **acclimatation**)

✓ Augmentation de nombre de glandes sudoripares (hyperplasie)



Sudation précoce, afin de limiter la dette hydrique initiale

✓ Au bilan, moins de pertes d'eau

✓ Volémie préservée, garantissant le VES, et donc le débit cardiaque

✓ Adaptations endocriniennes (glandes, hormones) :

Système Rénine – Angiotensine – Aldostérone  
Hormone Anti Diurétique (HAD)



Vers une meilleure préservation du statut hydrique



# L'hydratation

## Comment perd-on de l'eau ?

- Par la transpiration (refroidissement par évapo-transpiration)
- A travers le métabolisme
- Par la respiration (très important, en altitude)
- Par l'urine

## Les besoins en eau

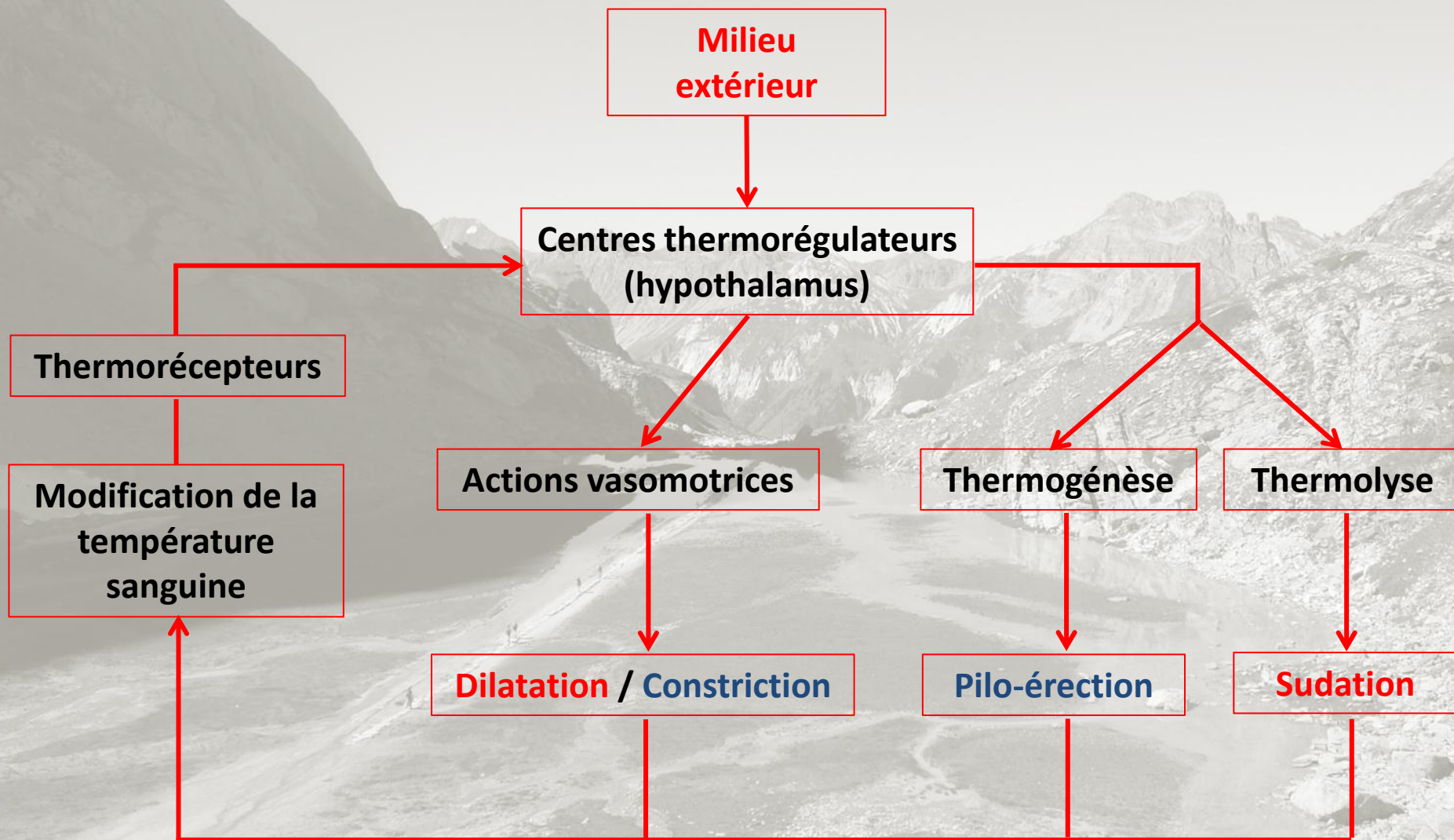
- 2.5 litres / jour
- Majorés par l'effort / exposition en ambiance chaude et en altitude
- On peut perdre jusqu'à 3 litres d'eau par heure

## Modalités de prise d'eau pendant l'effort

- Toutes les 15/20 minutes
- Quelques gorgées, dégluties lentement
- Boissons à température tempérée (jamais glacée)
- Boissons hypo ou isotoniques (jamais hypertoniques)

Attention aux problèmes gastriques  
(ischémie digestive)

# Bilan

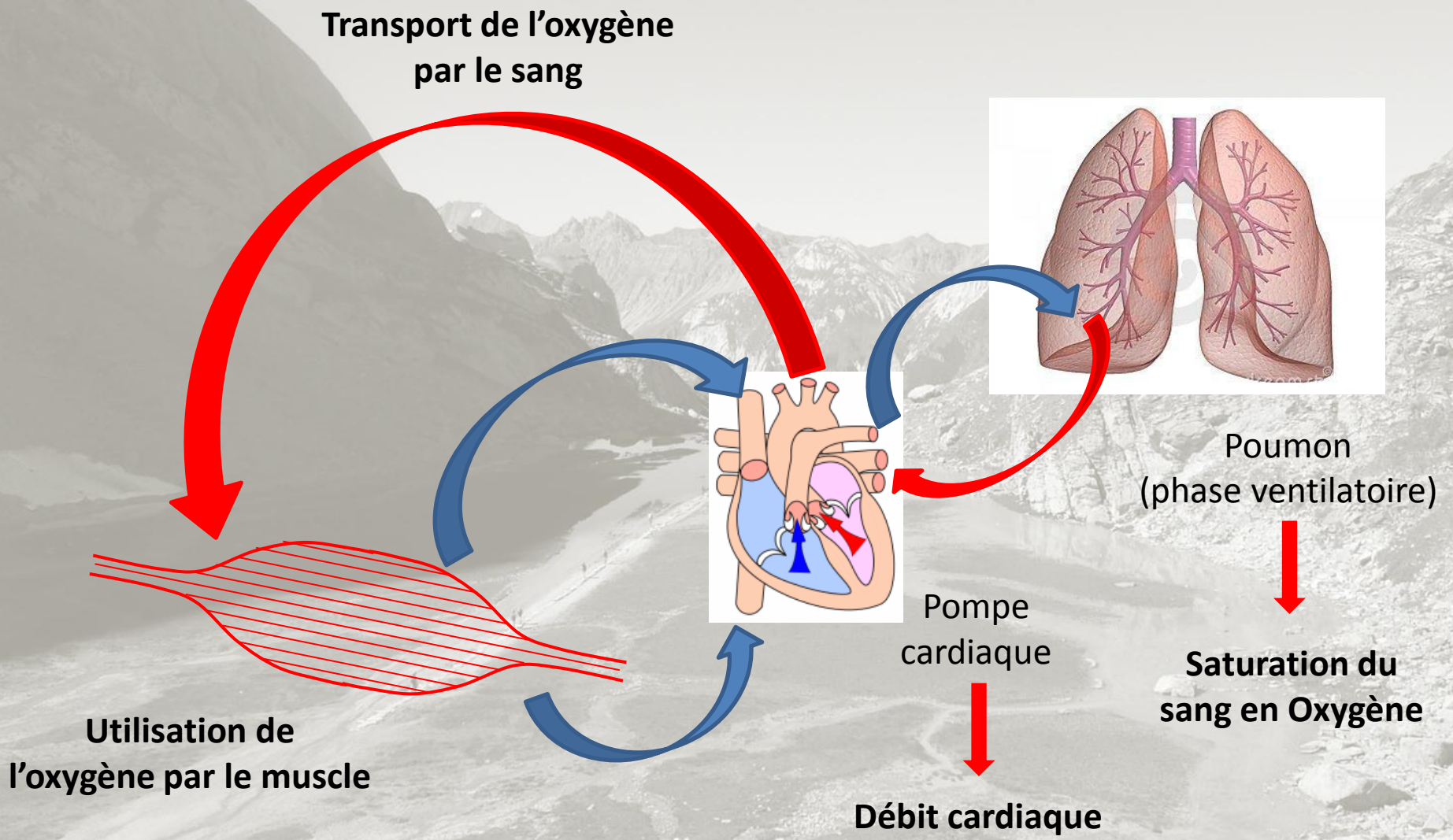




## On en est où ?

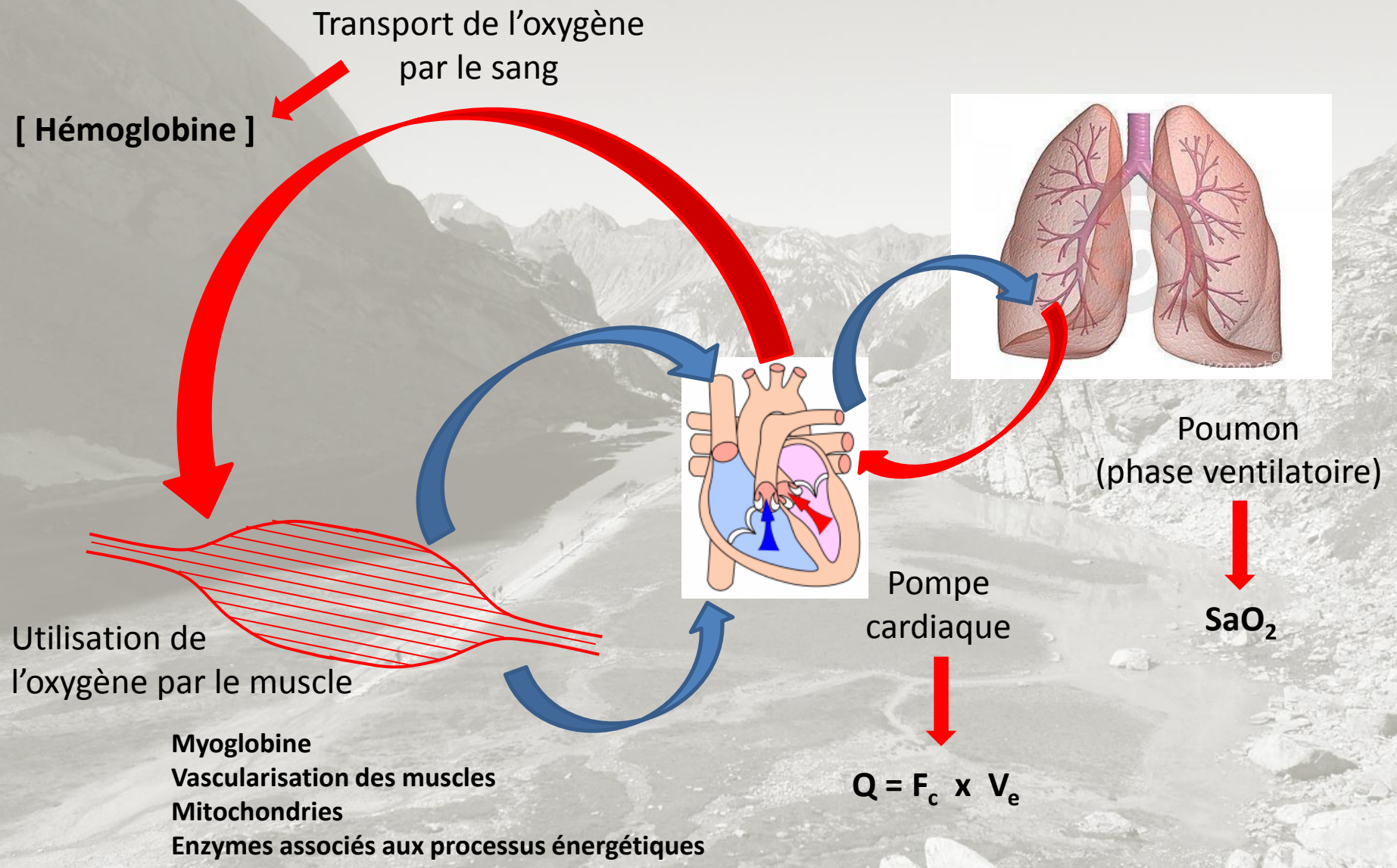
- ☞ Rappel sur les conséquences physiques de l'altitude
- ☞ Le stress thermique : chaud ou froid ?
- ☞ **Le stress hypoxique : le déclin de  $VO_2^{\max}$**
- ☞ Le stress oxydant

# Origine de la Puissance aérobie





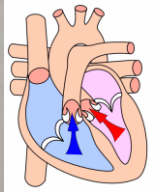
# Origine de la Puissance aérobie



# Origine de la Puissance aérobie (= débit d'Oxygène)

## Loi fondamentale de l'hémodynamique : la loi de Fick

$$VO_2 = \text{Débit cardiaque} \times (CaO_2 - CvO_2)$$



### *Facteur central*

(implication de la pompe cardiaque)

$$Q = F_c \times V_e$$

Q : débit cardiaque

$F_c$  : fréquence cardiaque

$V_e$  : volume d'éjection systolique

### *Facteur périphérique*

(utilisation de l'oxygène par les muscles)

$CaO_2 - CvO_2$  : différence artério-veineuse

$CaO_2$  : contenu artériel en  $O_2$

$CvO_2$  : contenu veineux en  $O_2$

$$CaO_2 = SaO_2 \times \text{Transport}_{O_2}$$

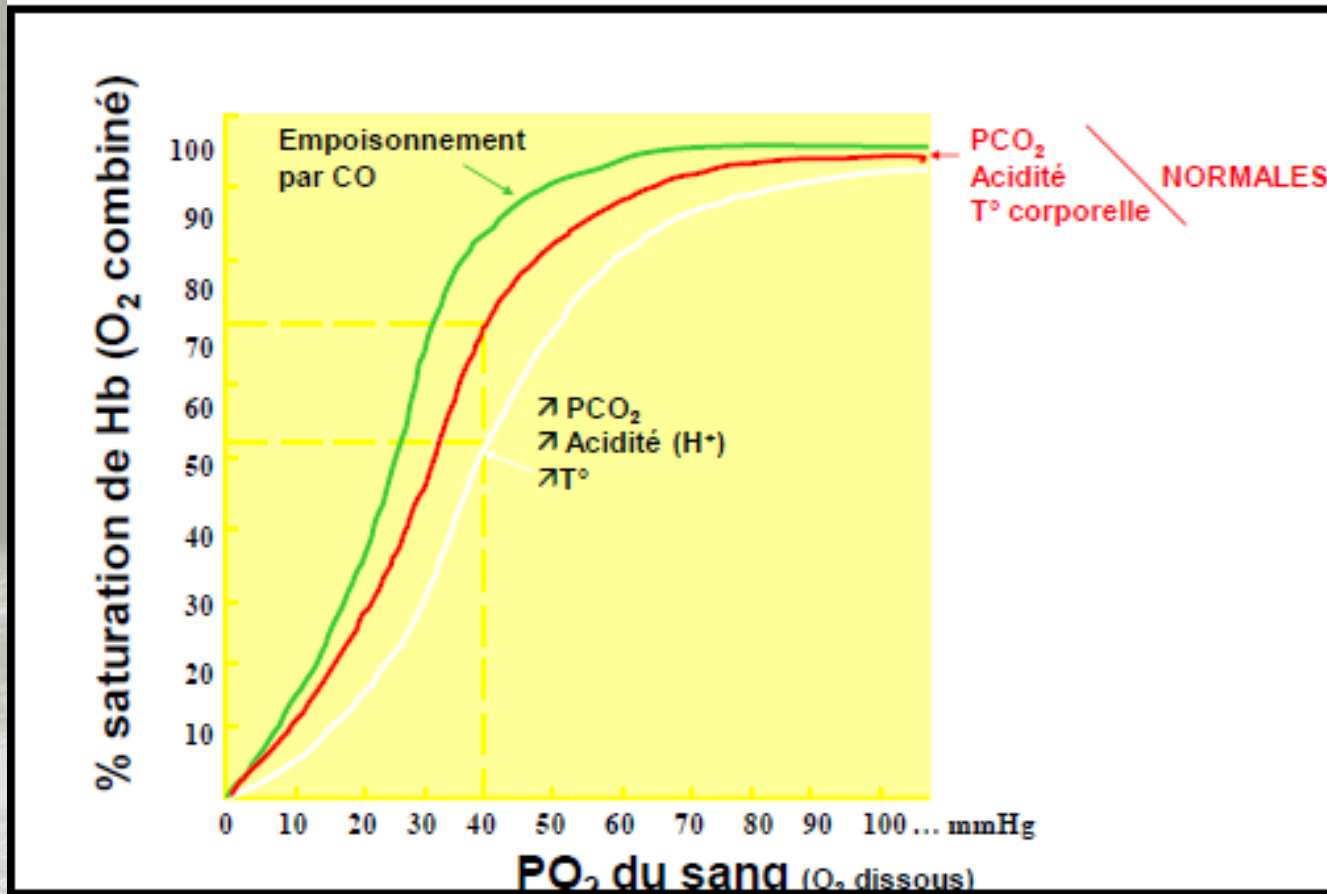
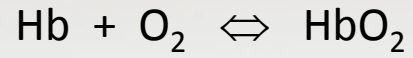
Saturation artérielle en  $O_2$

Concentration en  
hémoglobine



# Altitude et Puissance aérobie

## Transport et libération de l'oxygène



# Altitude et Puissance aérobie

$$\begin{aligned} \text{VO}_2 &= \text{Débit cardiaque} \times (\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2) \\ \text{CaO}_2 &= \text{SaO}_2 \times [\text{Hémoglobine}] \\ Q &= F_c \times V_e \end{aligned}$$

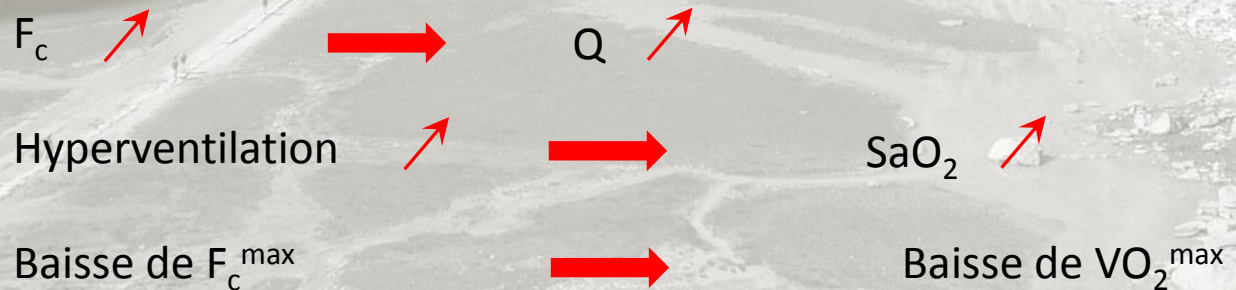
Effet de l'hypoxie (baisse de la pression partielle d'O<sub>2</sub>) : SaO<sub>2</sub> ↓ → VO<sub>2</sub> ↓

## Mécanismes d'adaptation

### 1- Accommodation

Délai de mise en place : quelques heures

Paramètres modifiés :



**Mais**



# Altitude et Puissance aérobie

## Mécanismes d'adaptation

### 1- Accommodation

Permet de ramener  $VO_2$  à sa valeur initiale

**Mais** Mécanismes coûteux (au niveau du cœur)  
 $VO_2^{\max}$  est diminué (près de 50% au sommet du Mont-Blanc)

# Altitude et Puissance aérobie

$$\begin{aligned} \text{VO}_2 &= \text{Débit cardiaque} \times (\text{CaO}_2 - \text{CvO}_2) \\ \text{CaO}_2 &= \text{SaO}_2 \times [\text{Hémoglobine}] \\ Q &= F_c \times V_e \end{aligned}$$

## Mécanismes d'adaptation

### 2- Acclimatation

Délai de mise en place : plusieurs semaines

Paramètres modifiés :

[Hémoglobine]

$F_c$

Ventilation

$\text{CaO}_2$

**Mais**

Hémoconcentration

Diminution de  $V_e$  par  
diminution de la pré-charge

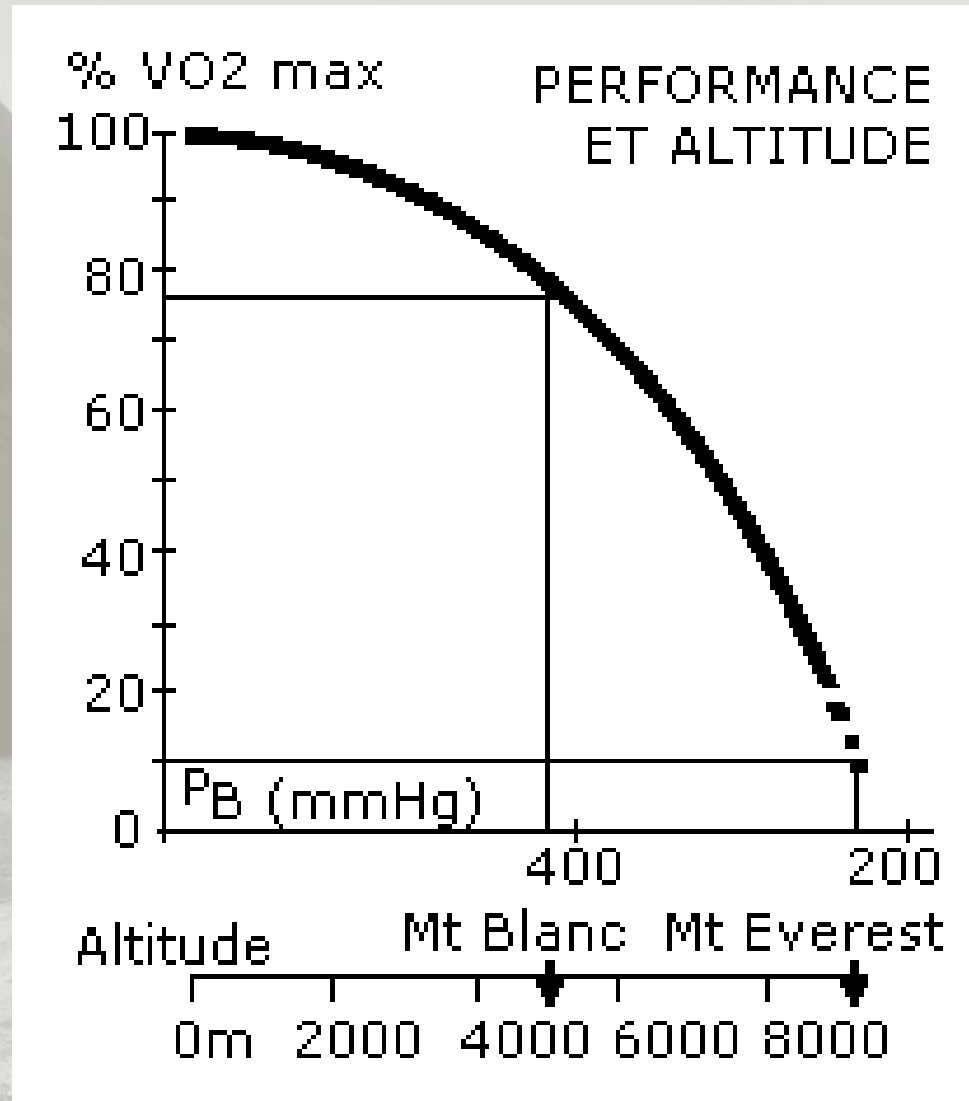
**Conclusions**

Permet de maintenir  $\text{VO}_2$  de manière économique

Mais  $\text{VO}_2^{\max}$  est diminué

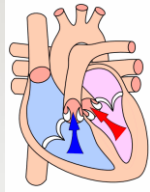


# Altitude et Puissance aérobie

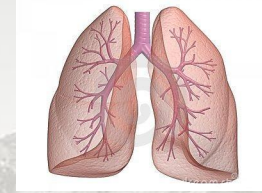


# Altitude et Puissance aérobie

✓ Diminution de la  $F_c^{\max}$



✓ Hypoxémie Induite par l'Exercice (HIE) : baisse de  $SaO_2$



➔ **Réduction de  $VO_2^{\max}$** , proportionnelle à l'altitude  
(plus aigüe chez les sportifs de haut niveau ( $VO_2^{\max}$  élevé))

Cette réduction est effective à partir de 1600 m.

Elle est de 1% par élévation de 100 m

**Exemple :**  $VO_2^{\max} = 70$  ml/Kg/min (au niveau de la mer)

Effort mené à l'altitude de 2500 m

$$VO_2^{\max} = 70 \times (1 - 0.01 \times (2500 - 1600) / 100) = 63.7$$

(réduction de 10 % des capacités maximales)

# Altitude et Stratégie d'entraînement



## Scénario 1 : séjour bref en altitude (week-end)

- Phase d'**accommodation** (*hypoxie aigue*)
- Arythmie cardiaque, hyperventilation
- Réduction de  $F_c^{\max}$  (réponse cardiaque au *stress hypoxique*)
- Possibilité d'installation du syndrome MAM



# Altitude et Stratégie d'entraînement

## Scénario 2 : séjour prolongé en altitude (3500 m, 3 semaines)

- Phase d'**acclimatation** (*hypoxie chronique*)
- La ventilation et le rythme cardiaque **au repos** reprennent des valeurs normales (*normoxie*)
- Une *polyglobulie* (globules rouges) se met en place
  - Augmentation de l'*hématocrite* (par augmentation de l'EPO ...)
  - Augmentation de la viscosité du sang (importance de l'hydratation)
  - Réduction du VES
  - Risques accrus d'accidents thromboemboliques
  - Susceptibilité plus forte aux gelures
- Réduction de  $F_c^{\max}$  (la réponse cardiaque au stress hypoxique demeure)

### Conclusion :

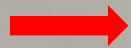
Mise en place de mécanismes de réponse plus économiques  
Réduction de  $VO_2^{\max}$ , proportionnelle à l'altitude  
La performance à l'effort demeure altérée  
Attention à l'augmentation de la viscosité du sang

# Altitude et Stratégie d'entraînement

## Altitude et performance sportive

### Question récurrente 1 :

Peut-on « s'acclimater » à l'altitude (stress hypoxique) par des séjours en altitude brefs (week-end) et répétés (tous les 8/10 jours) ?



Clairement **NON** !!!

Les adaptations physiologiques durables à l'altitude exigent un séjour de plusieurs semaines. Les effets sont d'autant plus marqués que le séjour est long, et l'altitude de résidence élevée.

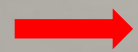
Les effets (polyglobulie) disparaissent une fois le sujet redescendu après 3 à 4 semaines.

# Altitude et Stratégie d'entraînement

## Altitude et performance sportive

Question récurrente 2 :

Existe-t-il un intérêt à s'entraîner régulièrement en altitude (2500 m)?



Pour l'athlétisme en basse altitude : a priori **NON** !!!



Pour les épreuves de montagne (trail, ski-alpinisme) : a priori **OUI** !!!

Il existe des éléments contradictoires sur cette stratégie, essentiellement à cause de la réduction de  $VO_2^{\max}$

La stratégie recommandée est :

**Vivre HAUT – S'entraîner BAS**



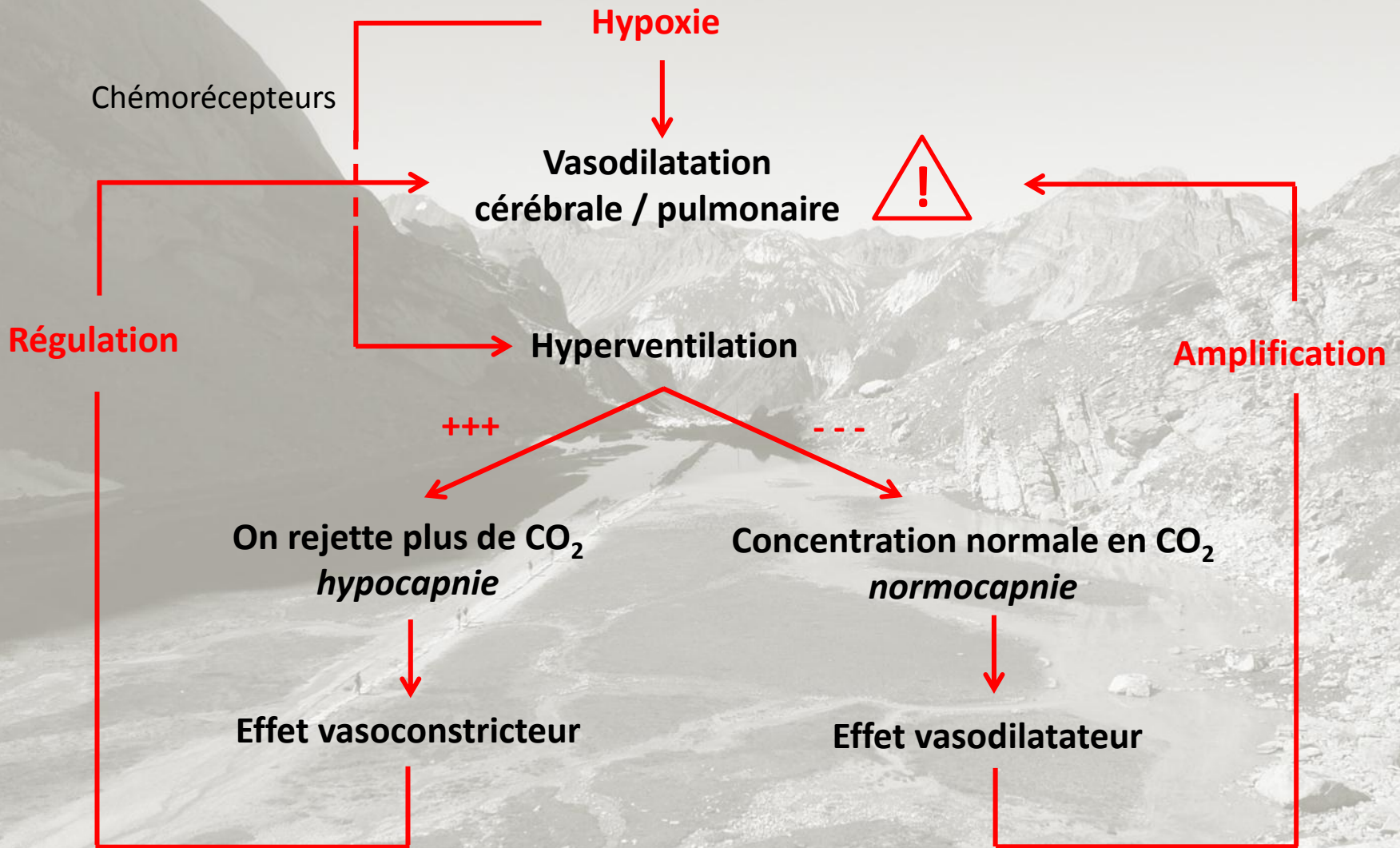
# Les pathologies liées à l'altitude

- ✓ Coup de chaleur lié à l'exercice (pouvant se compliquer en *Rhabdomyolyse*)
- ✓ Sur-hydratation, pouvant mener à une *Hyponatrémie*
- ✓ Hypothermie (*gelures*, etc.)
- ✓ Réponses pathologiques au stress hypoxique (MAM)



Complications en *Œdème* (cérébral ou pulmonaire)

# Adaptation / maladaptation





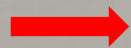
## On en est où ?

- ☞ Rappel sur les conséquences physiques de l'altitude
- ☞ Le stress thermique : chaud ou froid ?
- ☞ Le stress hypoxique : le déclin de  $VO_2_{max}$
- ☞ **Le stress oxydant**

# Qu'est-ce que le stress oxydant ?

## Endogène

- ✓ L'oxygène véhiculé par le sang est utilisé dans les mitochondries (fibre musculaire) pour re-synthétiser l'ATP (voir conférence *Nutrition*)
- ✓ Une (petite) partie de cet oxygène peut former des Radicaux Libres Oxygénés (Espèces Oxygénées Réactives)



Dommages moléculaires, cellulaires et fonctionnels  
Oxydation des lipides (membranes cellulaires)  
Oxydation des protéines (enzymes, hormones)  
Oxydation de l'ADN (altération chromosomique)  
Fatigue musculaire, baisse de performance, tendinites, ...



Mais assurent aussi un rôle fondamental dans l'organisme  
(voies de signalisation des cellules : immunité, cicatrisation, homéostasie)

# Qu'est-ce que le stress oxydant ?

## Exogène

- ✓ Rayonnement solaire (attention à l'exposition au soleil)
- ✓ Rayonnements électromagnétiques
- ✓ Pollution (particules fines : nanoparticules)
- ✓ Alimentation (produits chimiques liés aux produits cuisinés commerciaux)



# Les anti-oxydants

Les EOR sont pris en charge au niveau cellulaire par les Anti-oxydants :

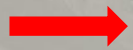
- ✓ 3 enzymes fondamentales : SOD, GPx, CAT
- ✓ Alimentation é-quili-brée :

vitamines : C, E  
carotène, sélénium

Superoxyde dismutase  
Gluthation peroxydase  
Catalase

# Tout est question d'équilibre

En fonctionnement normal, EOR et Anti-oxydants s'équilibrent



Il n'y a pas de stress oxydant  
(homéostasie rédox)

## Quelles sont les situations à risque ?

- ✓ Exercice, long et intense
- ✓ Hypoxie
- ✓ Inflammation
- ✓ Déséquilibre alimentaire (fruits, ...)

## Une bonne nouvelle

La réponse anti-oxydante chez l'athlète est accrue  
(capacité enzymatique anti-oxydante)