

# Quels risques pour quelle altitude ?

Paul Robach, PhD

Ecole nationale des sports de montagne, Chamonix

[paul.robach@ensm.sports.gouv.fr](mailto:paul.robach@ensm.sports.gouv.fr)



# Quels risques en altitude ?

- Baisse de la performance physique
- Pathologies d'altitude
- Altérations de la fonction cardiaque
- Baisse de la performance cognitive

# L'environnement de haute altitude

- Pression atmosphérique
- Température
- Humidité de l'air
- Rayonnement solaire

# Monter en altitude



Baisse de la pression atmosphérique

$FIO_2$  constante = 0.21



Baisse de la pression en  $O_2$  dans l'air

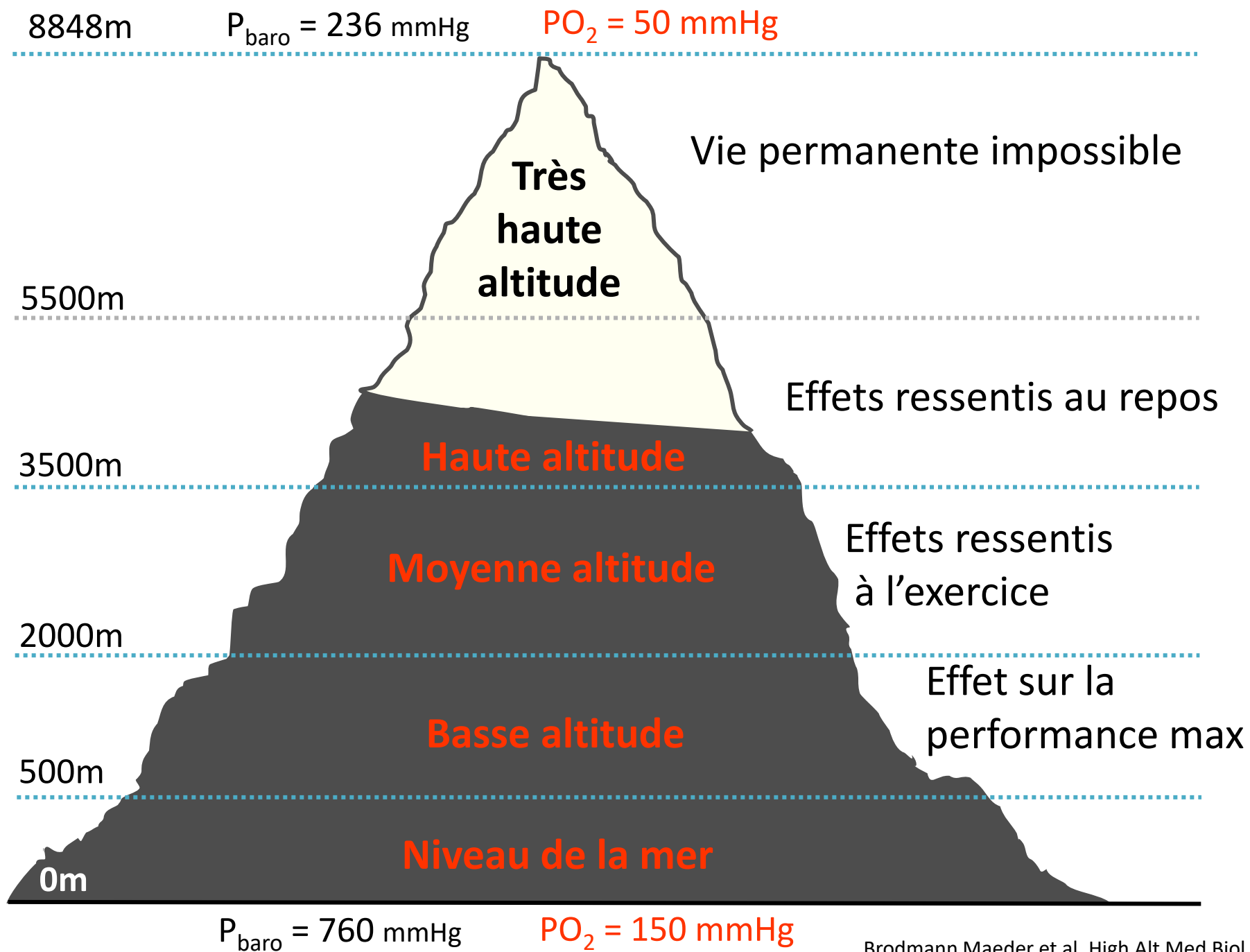


Baisse de la **pression en  $O_2$**  dans le sang



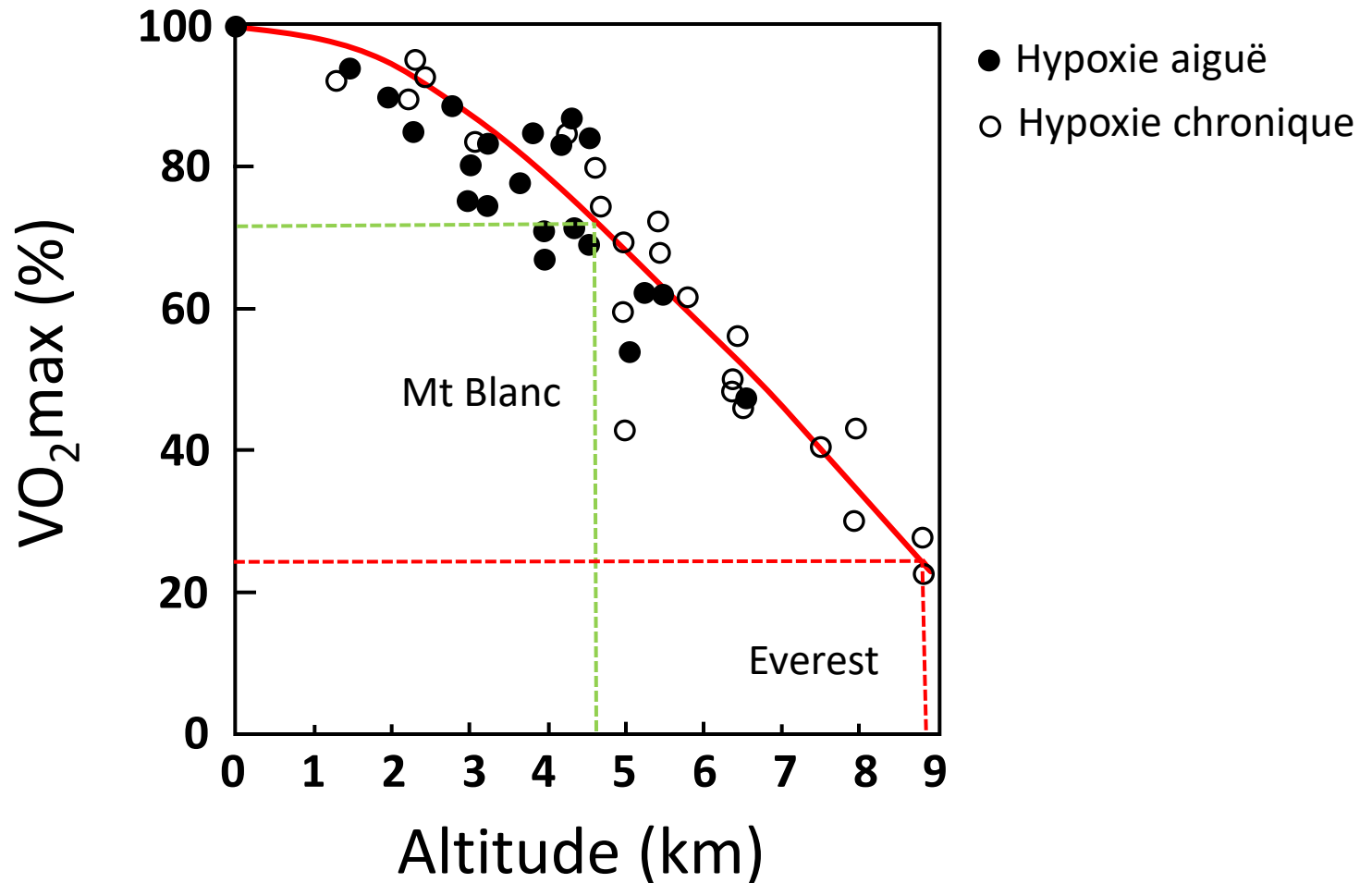
Baisse de la **capacité de transport d' $O_2$**  par le sang

Hypoxie

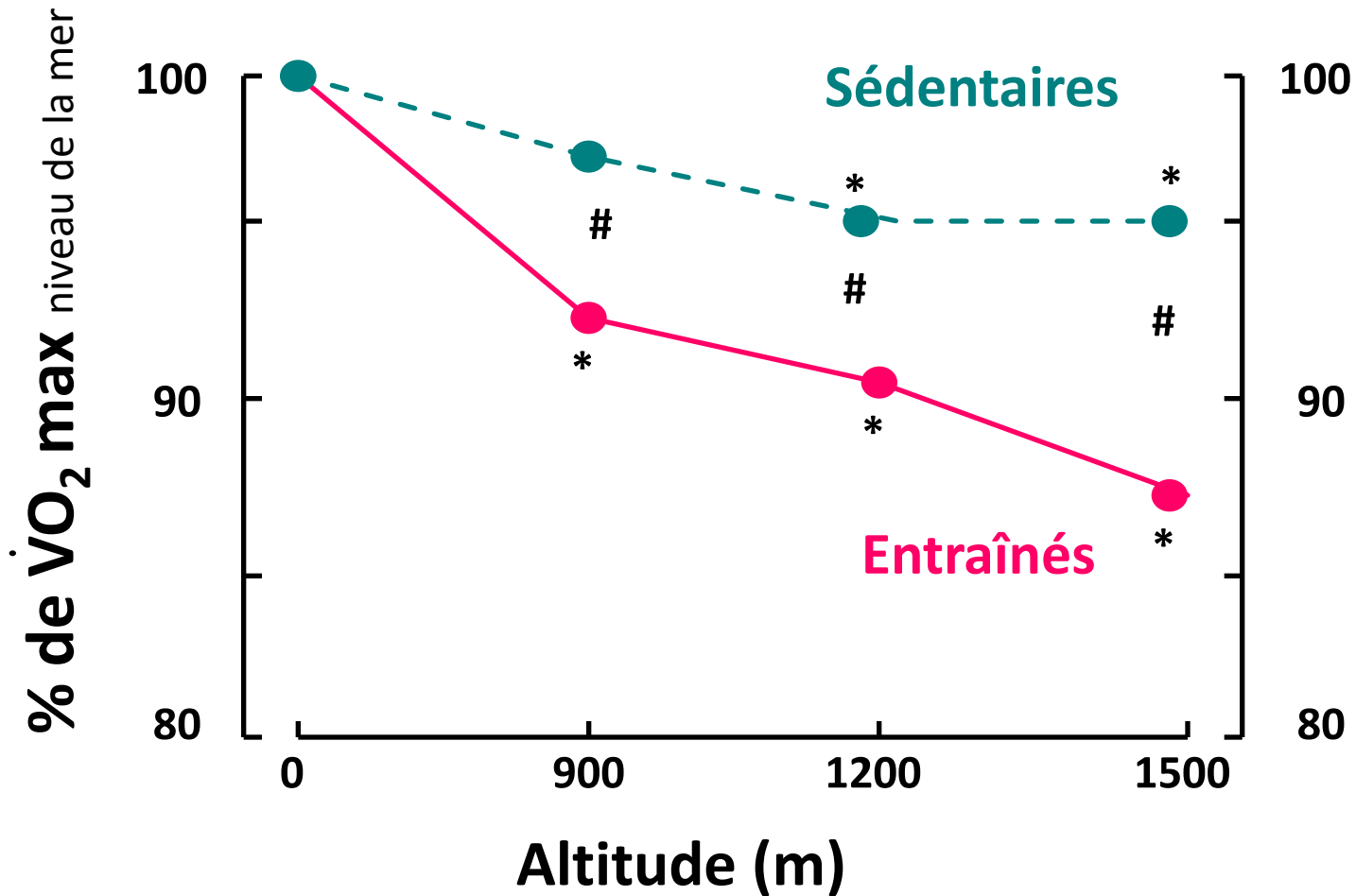


# Baisse de la performance physique en altitude

# Effet de l'altitude sur la consommation maximale d'oxygène



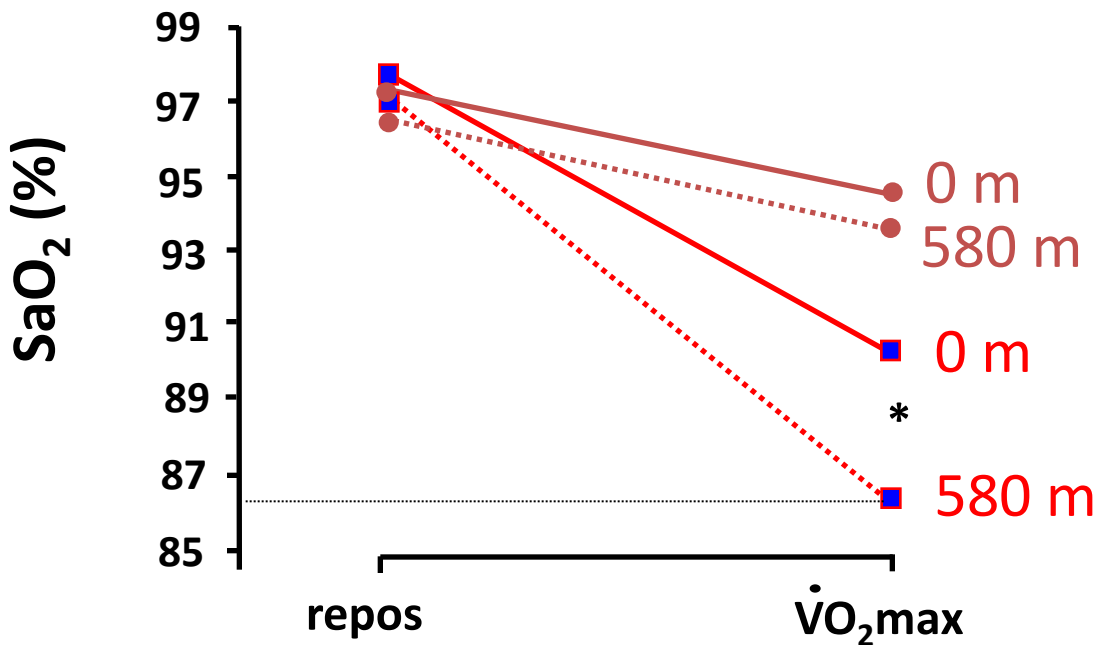
# Baisse de $\dot{V}O_2$ max en altitude (900-1500m)



# Baisse de $\dot{V}O_2\text{max}$ en altitude (580m)

non entraînés: pas de baisse de  $\dot{V}O_2\text{max}$

entraînés: baisse de  $\dot{V}O_2\text{max}$  de 6,8%



# Hypoxémie induite par l'exercice

(50% des athlètes d'endurance)

- Ventilation inadéquate
- Limitation de la diffusion alvéolo-capillaire

➤ **En altitude:**



**Majoration** de l'hypoxémie à l'exercice

**Majoration** de la baisse de  $\dot{V}O_2$ max

# Risques liés à la baisse de performance en altitude

**Moyenne altitude:** performance sportive  
dégradée

**Haute altitude:** fatigue, épuisement, facteur de  
risque pour les pathologies d'altitude

# Pathologies d'altitude

# Pathologies d'altitude: **prévalence**

	Prévalence
Mal Aigu des Montagnes (MAM)	25–40% à 3000–3500 m 40–90% à 4500–6000 m
Œdème cérébral de haute altitude (OCHA)	0,5–1% à 4000–5000 m Rarement à 2500 m
Œdème pulmonaire de haute altitude (OPHA)	1,7% à une altitude >4000 m Quelques cas à 2500 m
Mal chronique des montagnes (CMS)	5–6% à 3600–3800m 12–15% à une altitude >4000 m Plus fréquent chez les personnes âgées

# Pathologies d'altitude: **facteurs de risque**

Facteurs de risques	
Mal Aigu des Montagnes (MAM)	Trop vite trop haut (> 2500 m) Susceptibilité individuelle (faible réponse ventilatoire à l'hypoxie)
Œdème cérébral de haute altitude (OCHA)	Ascension rapide > 4000 m Antécédent de MAM ou OCHA Susceptibilité individuelle
Œdème pulmonaire de haute altitude (OPHA)	Ascension rapide > 3000–4000 m Vasoconstriction pulmonaire hypoxique exagérée / antécédent de OPHA Foramen ovale perméable
Mal chronique des montagnes (CMS)	Génétique spécifique aux populations

# Pathologies d'altitude: **symptômes**

	Symptômes
Mal Aigu des Montagnes (MAM)	< 24 h après le début de l'ascension Céphalée (symptôme N°1), nausée, vertige, fatigue
Œdème cérébral de haute altitude (OCHA)	2–4 jours après le début de l'ascension Trouble de la conscience et ataxie
Œdème pulmonaire de haute altitude (OPHA)	≥2 jours après le début de l'ascension Dyspnée, baisse exagérée de la capacité à l'effort, toux, bruits de gargouillement
Mal chronique des montagnes (CMS)	Céphalée, dyspnée et/ou palpitations, vertiges, troubles du sommeil, cyanose localisée, paresthésies, distension des veines, acouphènes

# Pathologies d'altitude: **diagnostic**

Diagnostic	
Mal Aigu des Montagnes (MAM)	Basé sur les signes et symptômes: Score de Lake Louise: 3–5 = léger; 6–9 = modéré, 10–12 = sévère
Œdème cérébral de haute altitude (OCHA)	Basé sur les signes et symptômes IRM (rétrospectif)
Œdème pulmonaire de haute altitude (OPHA)	Radiographie pulmonaire, SpO <sub>2</sub> basse, symptômes
Mal chronique des montagnes (CMS)	Score Qinghai CMS >6 Concentration Hb ≥ 21 g/dL (homme) et ≥ 19 g/dL (femme)

# Prévention / traitement des pathologies d'altitude aiguës

Prévention

Ascension lente (300–500 m/jour au dessus de 2500–3000 m + jour de repos tous les 3–4 jours)  
Pré-acclimatation à l'hypoxie

Acétazolamide  
Dexaméthasone

Nifédipine libération prolongée

MAM léger

MAM sévère

OCHA

OPHA

Traitement

Arrêt de l'ascension  
Repos

Arrêt de l'ascension  
Oxygénothérapie à  $SpO_2 \geq 90\%$   
Caisson de recompression  
Position assise

Antalgiques  
Acétazolamide?

Dexaméthasone

Nifédipine libération prolongée ?

Poursuite de l'ascension après récupération

Si absence de récupération

Descente à une altitude inférieure  
Evacuation

# Risques associés aux pathologies d'altitude

- **Mal aigu des montagnes**: risque bénin
- **Œdème pulmonaire ou cérébral de haute altitude**: risque de décès de ~50% si non traité
- **Mal chronique des montagnes**: perte de 3 mois de vie en bonne santé par année à 4 000 m d'altitude

# Risque cardiovasculaire en altitude

- Baisse de la fréquence cardiaque maximale  
(= mécanisme protecteur du myocarde en hypoxie)
- Pas de dysfonction cardiaque majeure
- **Altitude > 2500 m**: risque accru d'évènements indésirables chez les patients atteints de maladies cardiovasculaires

# Risque d'arythmie à l'Everest

- Taux d'arythmie:

Plus de 1/3 des alpinistes participants

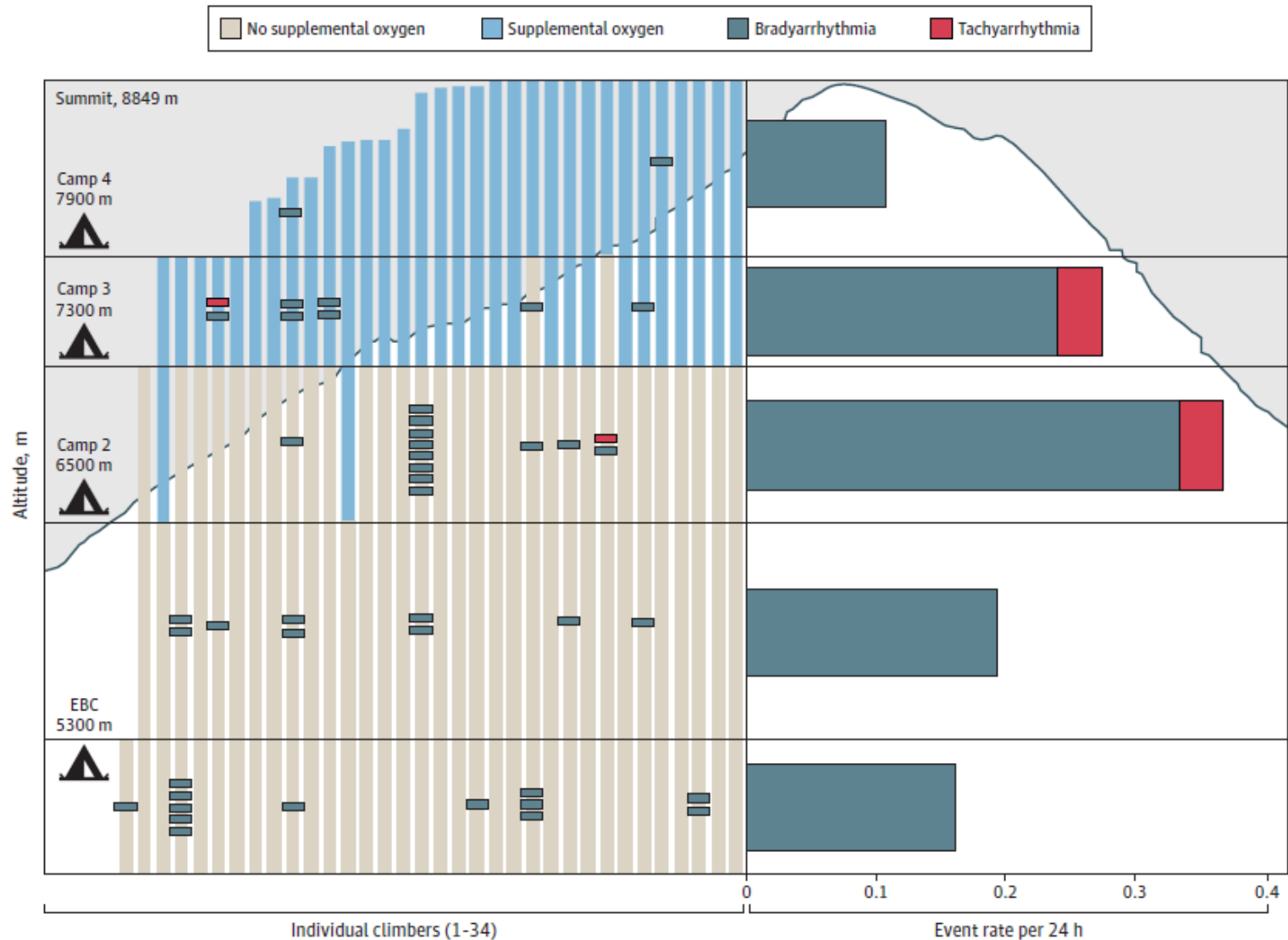
Stable avec l'altitude

Diminue avec l'oxygène

Aucune manifestation clinique en lien avec l'arythmie

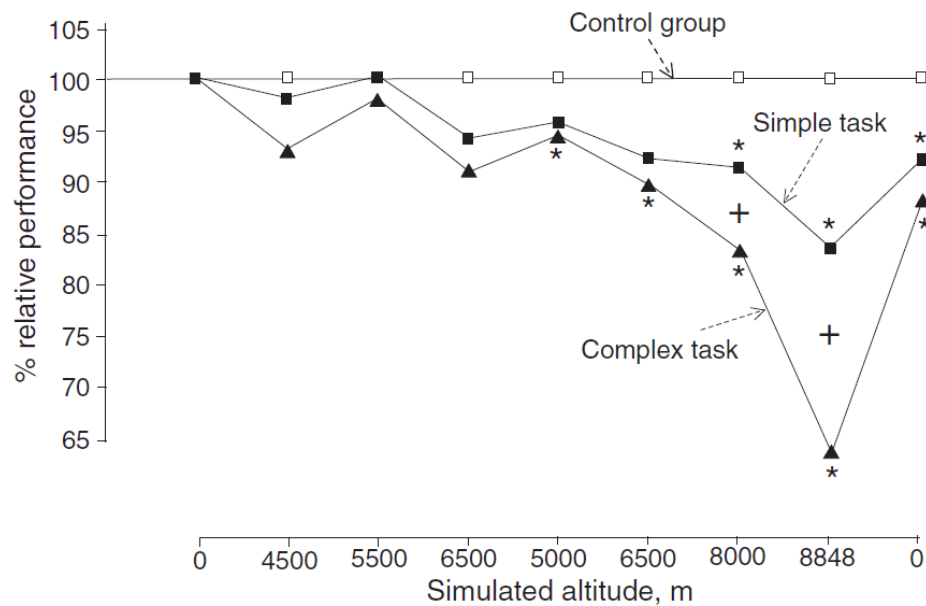
Population étudiée: 81 % de Sherpas

# Risque d'arythmie à l'Everest



# Baisse de la performance cognitive en altitude

- Performance cognitive préservée en haute altitude
- Dégradation en très haute altitude



# PaO<sub>2</sub> et SaO<sub>2</sub> à 8400 m

**Table 2.** Arterial Blood Gas Measurements and Calculated Values for Pulmonary Gas Exchange from Four Subjects at an Altitude of 8400 m, during Descent from the Summit of Mount Everest.\*

Variable	Subject No.				Group Mean
	1	2	3	4	
pH	7.55	7.45	7.52	7.60	7.53
PaO <sub>2</sub> (mm Hg)†	29.5	19.1	21.0	28.7	24.6
PaCO <sub>2</sub> (mm Hg)†	12.3	15.7	15.0	10.3	13.3
Bicarbonate (mmol/liter)‡	10.5	10.67	11.97	9.87	10.8
Base excess of blood‡	-6.3	-9.16	-6.39	-5.71	-6.9
Lactate concentration (mmol/liter)	2.0	2.0	2.9	1.8	2.2
SaO <sub>2</sub> (%)‡	68.1	34.4	43.7	69.7	54.0
Hemoglobin (g/dl)§	20.2	18.7	18.8	19.4	19.3
Respiratory exchange ratio¶	0.81	0.74	0.72	0.70	0.74
PAO <sub>2</sub> — mm Hg†**	32.4	26.9	27.4	33.2	30.0
Alveolar–arterial oxygen difference — mm Hg†	2.89	7.81	6.44	4.51	5.41

# Hypoxémie sévère en très haute altitude



Benjamin Védrines au sommet du K2 en 10h59  
28 juillet 2024



Extrait du film « Edge of Reason » de B Védrines au K2 en  
2023

Troubles de la conscience induits par une hypoxémie cérébrale sévère ?

# Risque cognitif en très haute altitude

- Baisse de la performance cognitive
- Troubles de la conscience liés à l'hypoxémie
- Accidents ischémiques transitoires à 8000m  
3 participants sur 8 (Everest Comex)

Cauchy et al. Aviat Space Environ. Med. 1999

# Quels risques en altitude en ski alpin ?

- Baisse de la performance physique: conséquences **limitées** en moyenne altitude
- Pathologies d'altitude: conséquences **très limitées** en moyenne altitude
- Fonction cardiaque: conséquences **très limitées** (sauf si maladies cardiovasculaires et altitude > 2500 m)
- Baisse de la performance cognitive: **sans conséquence** en moyenne altitude

# **EXPLOIT HISTORIQUE : ANDRZEJ BARGIEL SKIE L'EVEREST DEPUIS LE SOMMET, SANS OXYGÈNE**

22 septembre 2025



# EXPLOIT AU NANGA PARBAT VERSANT RUPAL : TIPHAINE DUPÉRIER ET BORIS LANGENSTEIN À SKIS, DAVID GÖTTLER EN PARAPENTE

24 juin 2025



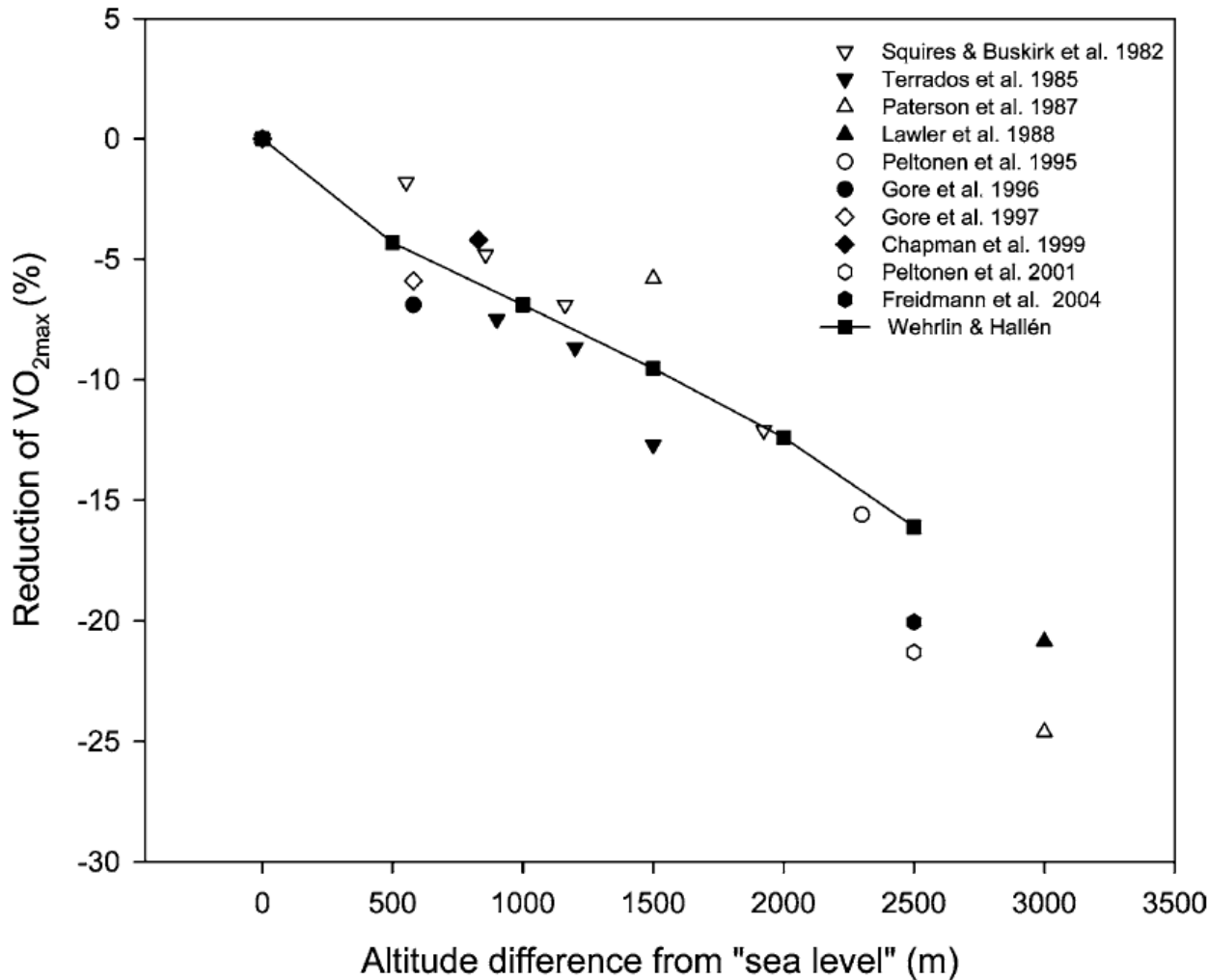
Nanga Parbat 2025, Tiphaine Dupérier, Boris Langenstein et David Göttler au sommet ©David Göttler

Merci pour votre attention !



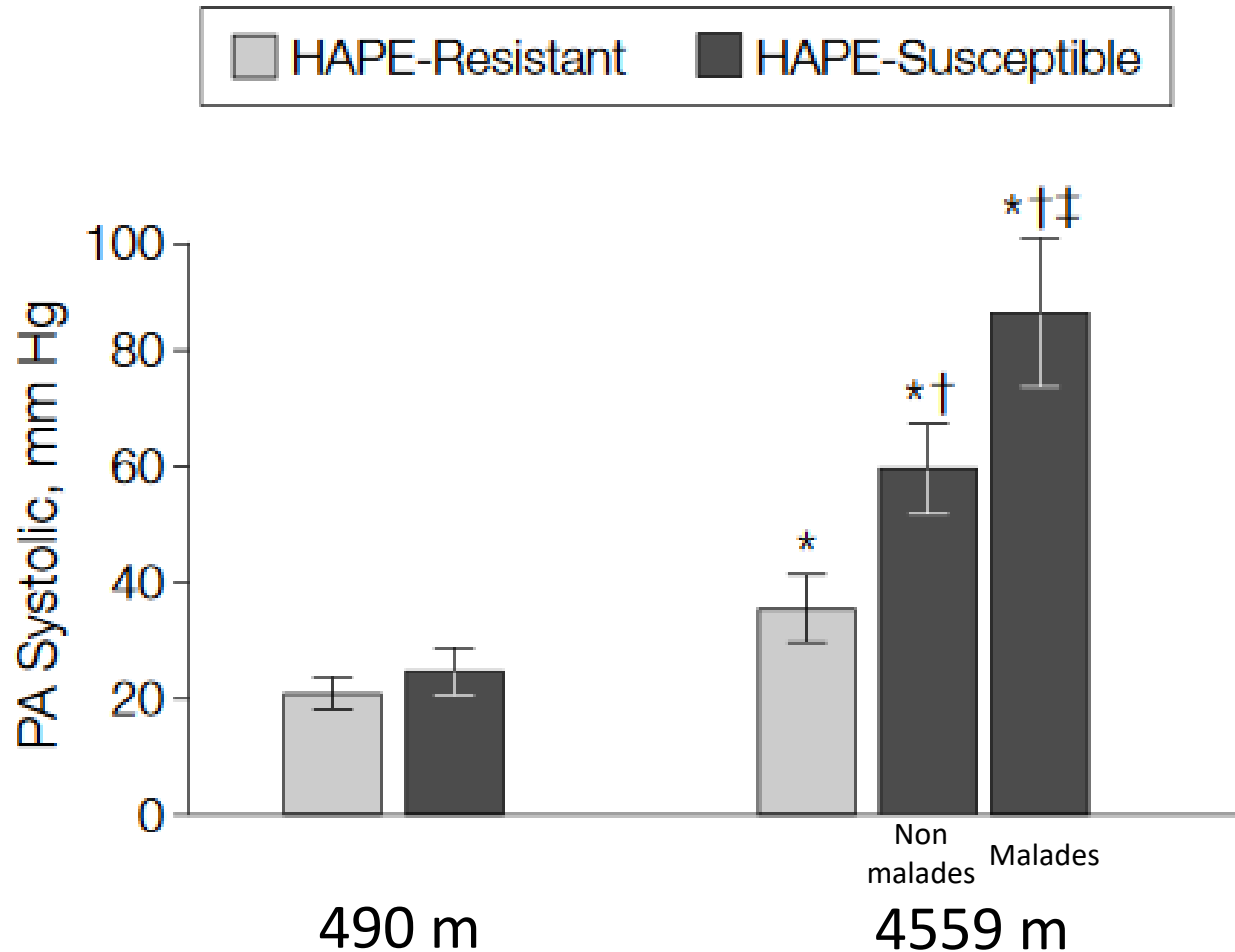


# Baisse de $\text{VO}_2\text{max}$ en altitude chez l'athlète d'endurance



Athlètes avec  
 $\text{VO}_2\text{max} > 60 \text{ mL/min/kg}$

# Pression artérielle pulmonaire en haute altitude



HAPE = high altitude pulmonary oedema

# Pathologies d'altitude: **diagnostic différentiel**

	Diagnostic différentiel
Mal Aigu des Montagnes (MAM)	Migraine, céphalée en grappes, déshydratation, intoxication au monoxyde de carbone, syndrome post-alcoolique
Œdème cérébral de haute altitude (OCHA)	Hémorragie intracrânienne, AVC, hypoglycémie, hyponatrémie, hypothermie, intoxication
Œdème pulmonaire de haute altitude (OPHA)	Pneumonie, syndrome d'hyperventilation, embolie pulmonaire
Mal chronique des montagnes (CMS)	Maladies pulmonaires chroniques, autres pathologies exacerbant l'hypoxémie

Première ascension  
de l'Everest sans O<sub>2</sub>  
1978



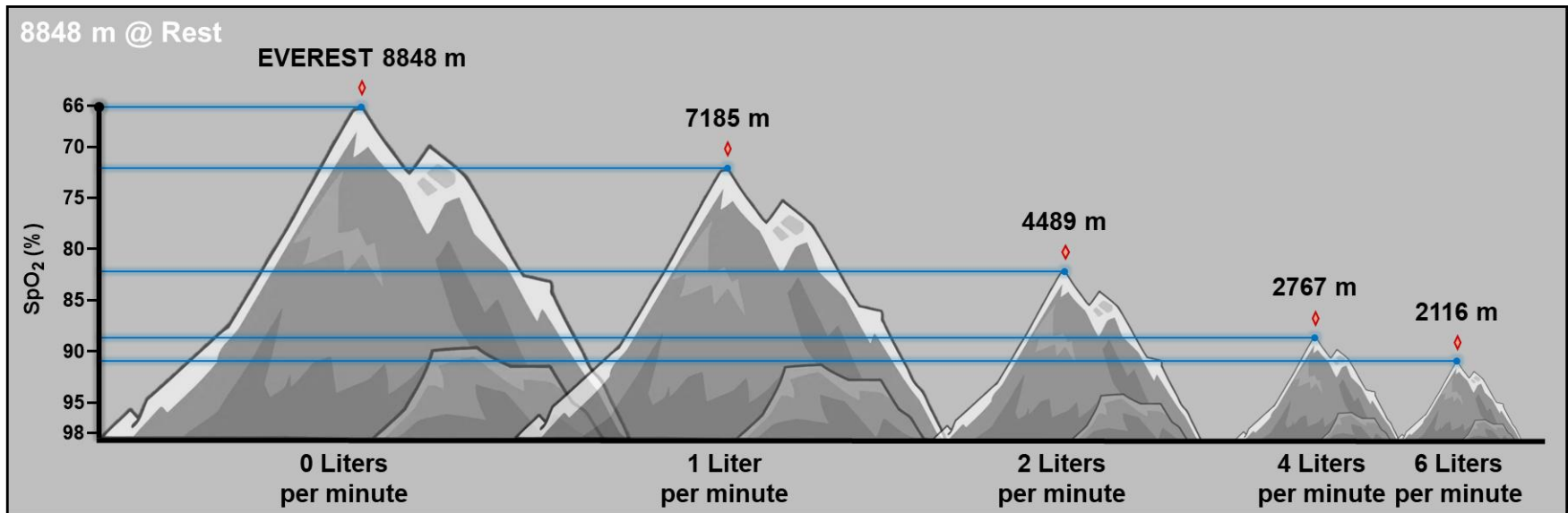
# Risques en altitude : quelles conséquences sur la santé et/ou la sécurité ?

- **Baisse de la performance physique:** conséquences limitées en moyenne altitude, potentiellement graves en haute altitude
- **Pathologies d'altitude:** conséquences très limitées en moyenne altitude, potentiellement graves au dessus de 3500 m
- **Fonction cardiaque:** conséquences limitées (potentiellement graves au dessus de 2500 m si maladies cardiovasculaires)
- **Baisse de la performance cognitive:** sans conséquence en moyenne altitude; conséquences limitées en haute altitude, potentiellement graves en très haute altitude

# Utilisation d'oxygène en très haute altitude

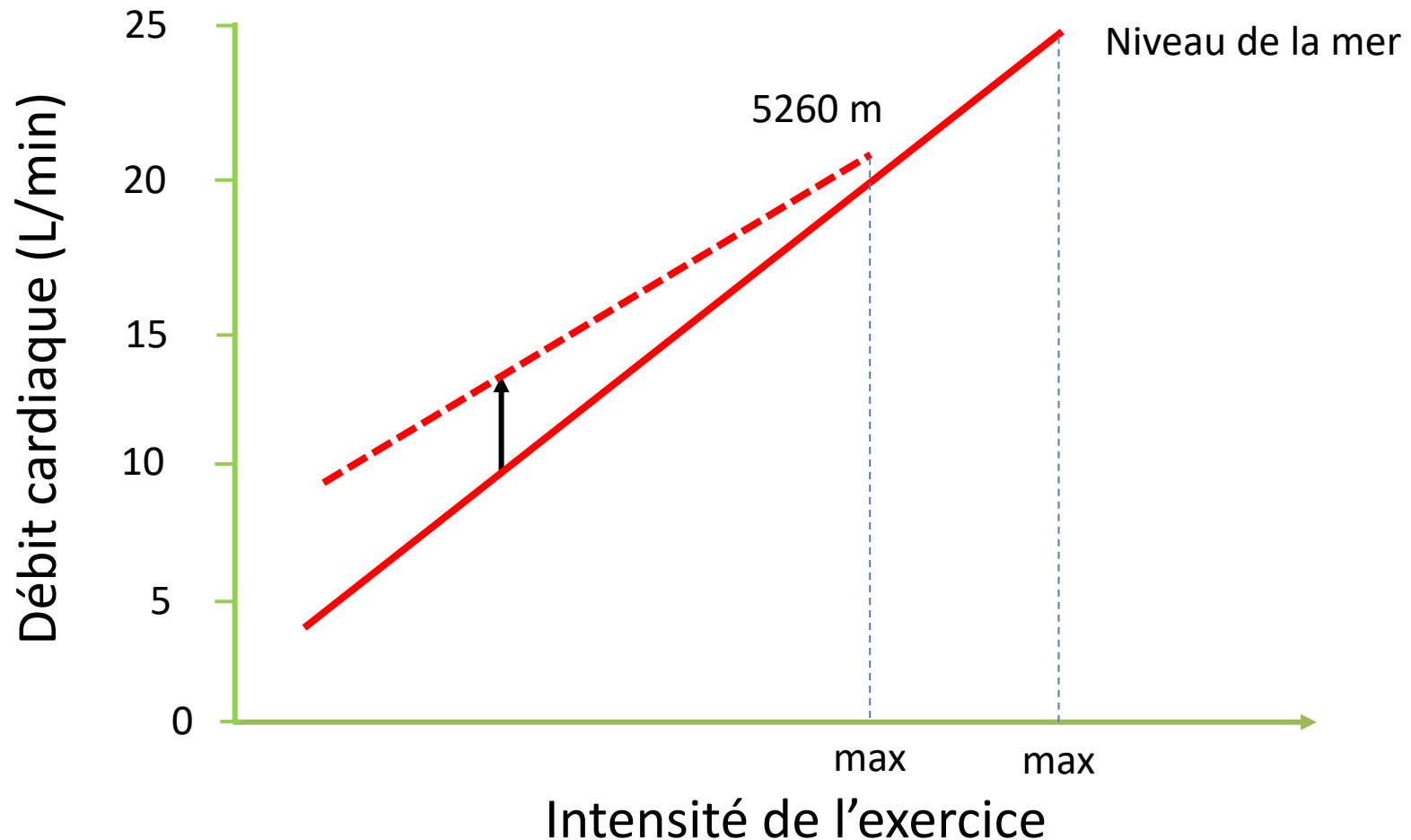
Catégorie	Nombre de sommets Everest cumulés (jusqu'à fin 2024)	Nombre de personnes ayant fait le sommet sans oxygène	pourcentage
Total des ascensions	12 884	230	1,8 %
Membres « non-Sherpa »	5 401	96	15%

# “Altitude équivalente” induite par l’inhalation d’O<sub>2</sub> au sommet de l’Everest au repos

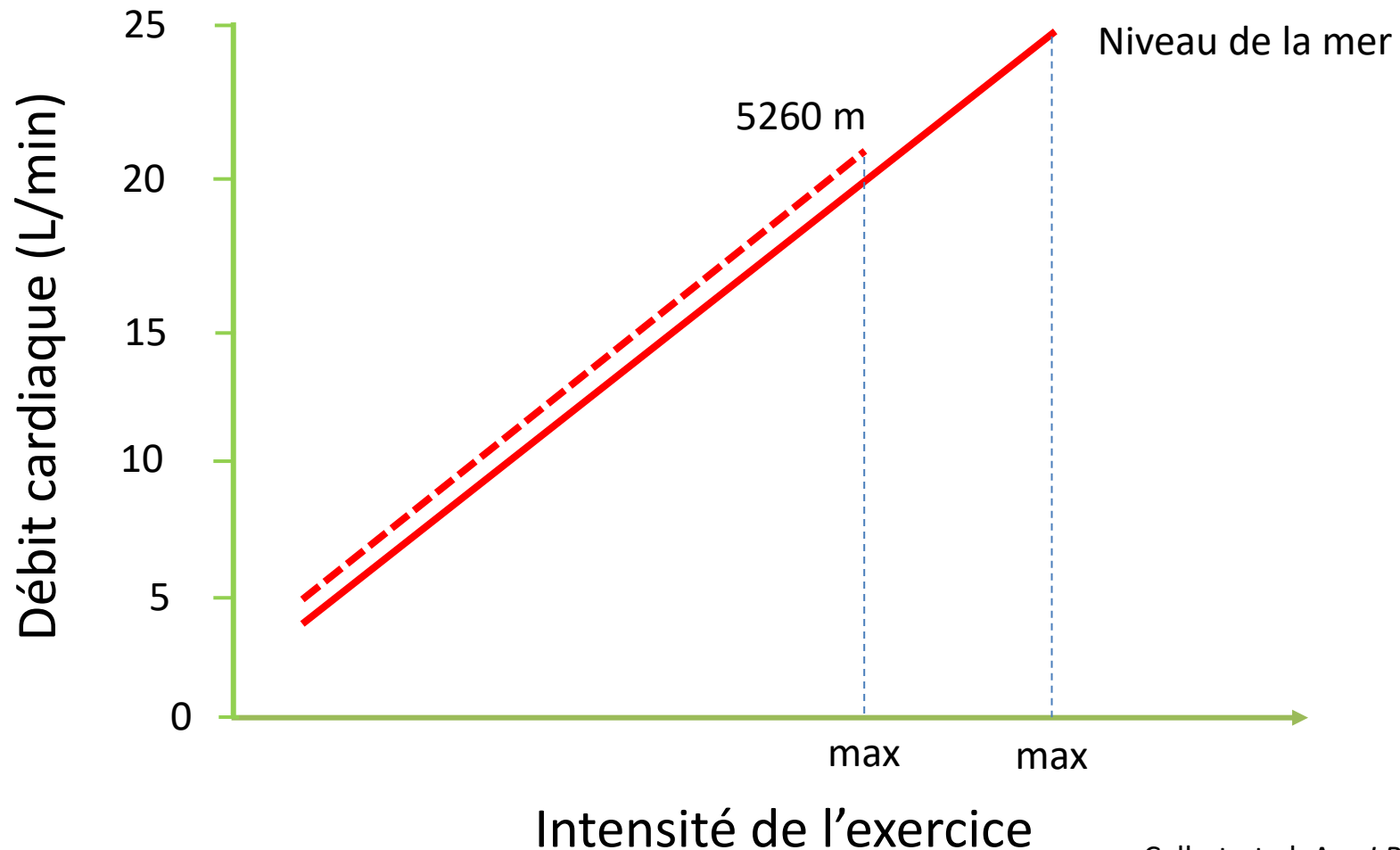


calculée d’après la saturation artérielle en O<sub>2</sub> et la pression barométrique

# Augmentation du débit cardiaque sous-maximal en hypoxie aiguë



# Normalisation du débit cardiaque sous-maximal après acclimatation



# Saturation O<sub>2</sub> versus Pression O<sub>2</sub>

