



UNIVERSITÉ
BORDEAUX
S E G A L E N

La respiration

Adaptations physiologiques et réponses physiopathologiques du système cardio-respiratoire à l'altitude

effet de l'altitude sur la pression partielle en oxygène inhalé

composition de l'air

effet de l'altitude

conséquences sur les pressions et les concentrations en O₂ et en CO₂ dans l'organisme

pression alvéolaire

diffusion alvéolaire

pression partielle et concentration dans le sang

effet sur le fonctionnement de l'appareil respiratoire des animaux de basse altitude

effet à court terme (1-3 jours)

effet à moyen et long terme (2-3 jours à 3-4 semaines)

physiologie respiratoire des populations vivant en altitude

composition gazeuse de l'air en %

<i>composant</i>	<i>%</i>
O ₂	20,95
CO ₂	0,05
N ₂	78,09
Argon	0,93

pression atmosphérique au niveau de la mer : 760 mm Hg (101,3 kPa)

pression partielle en vapeur d'eau

<i>température</i>	<i>pression de vapeur saturante</i>
0°C	4,6 mmHg
37°C	47 mmHg

notion d'humidité relative

pression partielle en H₂O / pression de vapeur saturante

pression partielle en vapeur d'eau

<i>température</i>	<i>pression de vapeur saturante</i>
0°C	4,6 mmHg
37°C	47 mmHg

notion d'humidité relative

pression partielle en H₂O / pression de vapeur saturante

pression partielle en vapeur d'eau et pression partielle en O₂ dans l'air inhalé

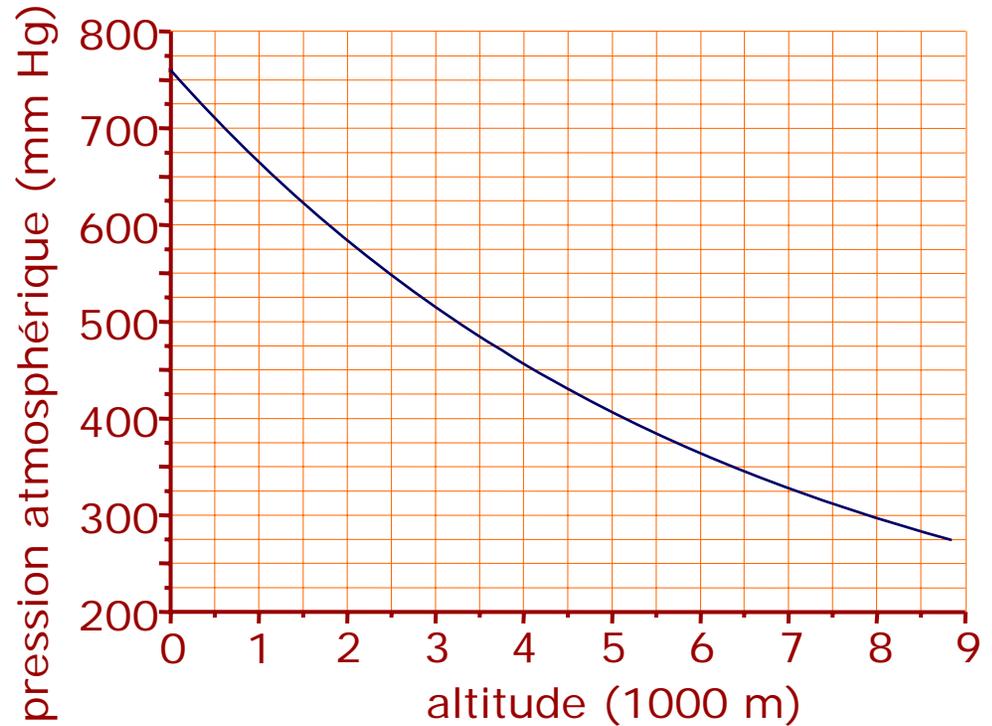
Dans un poumon :

pression de vapeur d'eau = pression de vapeur saturante = 47 mmHg.

pression de l'air sec est de 760 – 47 = 713 mmHg.

L'air sec : 21% d'oxygène,

PIO₂ (pression partielle en O₂ dans l'air inhalé) = 150 mmHg.

effet de l'altitude

pressions (mmHg)	niveau de la mer	5500 m	différence
p. atmosphérique	760	380	380
PO ₂	160	80	80
PIO ₂	150	70	80
PCO ₂	0,23	0,11	0,12
PICO ₂	0,21	0,11	0,11

pression alvéolaire

l'équation de l'air alvéolaire

dioxyde de carbone

$P_A\text{CO}_2$: ne dépend pas de l'air inspiré
dépend de la production de CO_2

$$P_A\text{CO}_2 = (\dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}_A)K$$

K : constante

$\dot{V}\text{CO}_2$: débit de CO_2 produit

\dot{V}_A : débit alvéolaire

pression alvéolaire

dioxyde de carbone

l'équation de l'air alvéolaire

$P_A\text{CO}_2$: ne dépend pas de l'air inspiré
dépend de la production de CO_2

$$P_A\text{CO}_2 = (\dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}_A)K$$

K : constante

$\dot{V}\text{CO}_2$: débit de CO_2 produit

\dot{V}_A : débit alvéolaire

→ pas d'effet de l'altitude

pression alvéolaire

l'équation de l'air alvéolaire

dioxyde de carbone

$P_A\text{CO}_2$: ne dépend pas de l'air inspiré
dépend de la production de CO_2

$$P_A\text{CO}_2 = (\dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}_A)K$$

K : constante $\dot{V}\text{CO}_2$: débit de CO_2 produit \dot{V}_A : débit alvéolaire

→ pas d'effet de l'altitude

oxygène

$$PAO_2 = (PIO_2 - (PACO_2/R) + F$$

R : quotient respiratoire F : constante ($F = 0$ si $R = 1$)

pression alvéolaire

l'équation de l'air alvéolaire

dioxyde de carbone

$P_A\text{CO}_2$: ne dépend pas de l'air inspiré
dépend de la production de CO_2

$$P_A\text{CO}_2 = (\dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}_A)K$$

K : constante

$\dot{V}\text{CO}_2$: débit de CO_2 produit

\dot{V}_A : débit alvéolaire

→ pas d'effet de l'altitude

oxygène

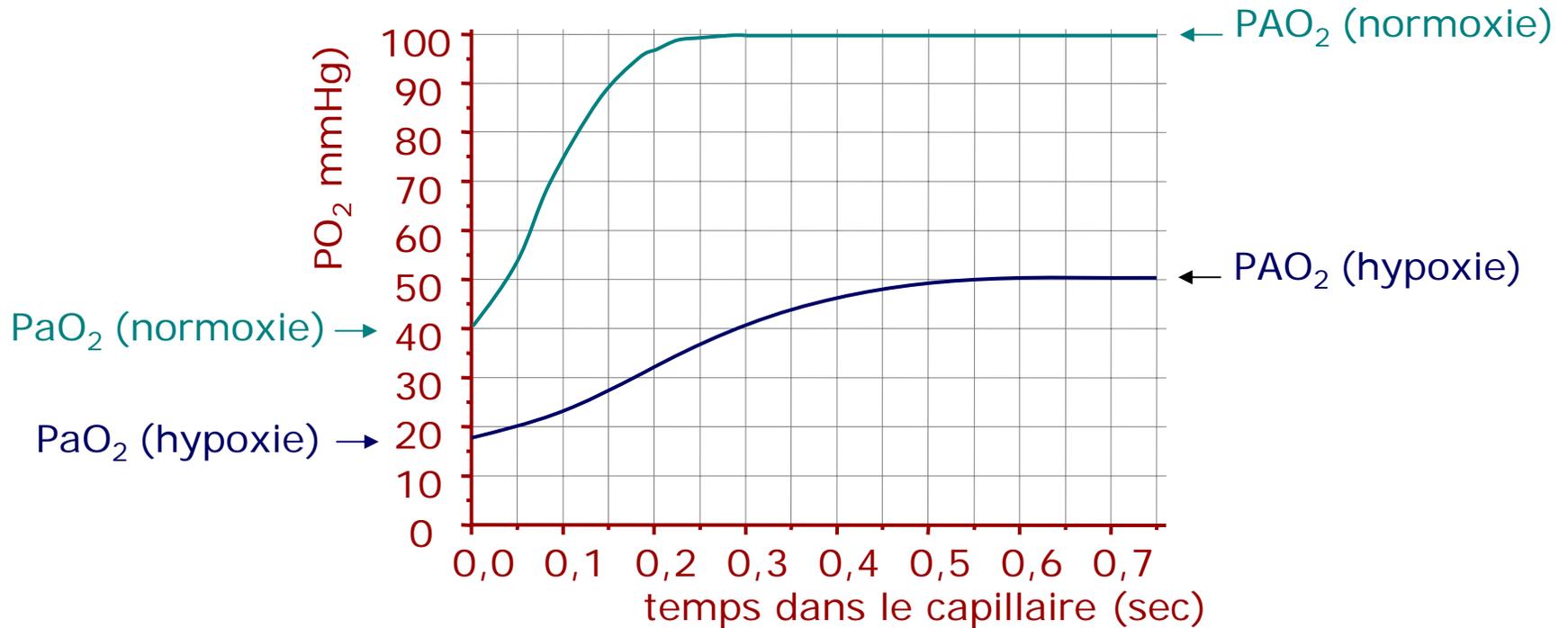
$$PAO_2 = (PIO_2) - (PACO_2/R) + F$$

R : quotient respiratoire

F : constante (F = 0 si R = 1)

→ altitude : diminution de la PAO_2

diffusion alvéolaire



PO_2 dans le sang, en fonction du temps de passage dans le capillaire, selon la PAO_2

pression partielle et concentration dans le sang

oxygène

quantité d'O₂ présente dans le sang – en ml O₂/100 ml de sang :

$$(1,39 \times \text{Hb} \times (\text{Sat}/100)) + 0,003 \text{ PO}_2$$

Hb : concentration en hémoglobine du sang (en g/100 ml)

Sat : % de saturation de l'hémoglobine

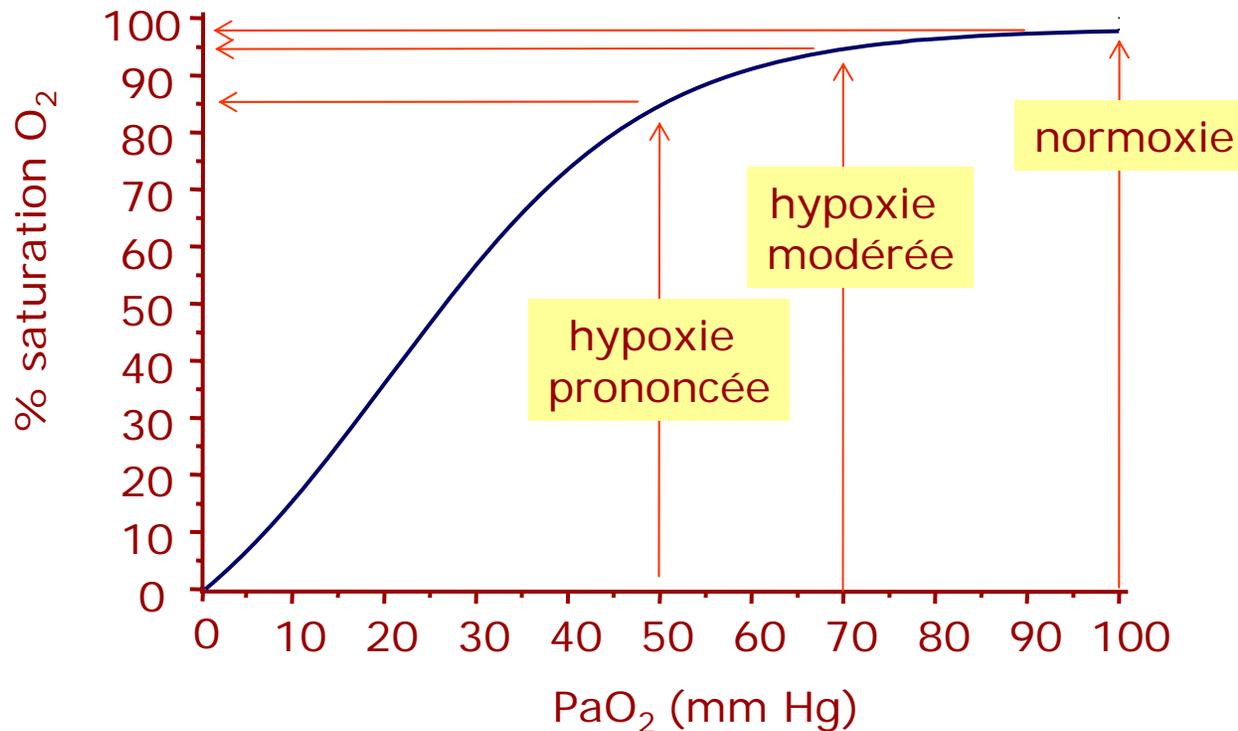
PO₂ en mmHg

pression partielle et concentration dans le sang

oxygène

quantité d'O₂ présente dans le sang – en ml O₂/100 ml de sang :

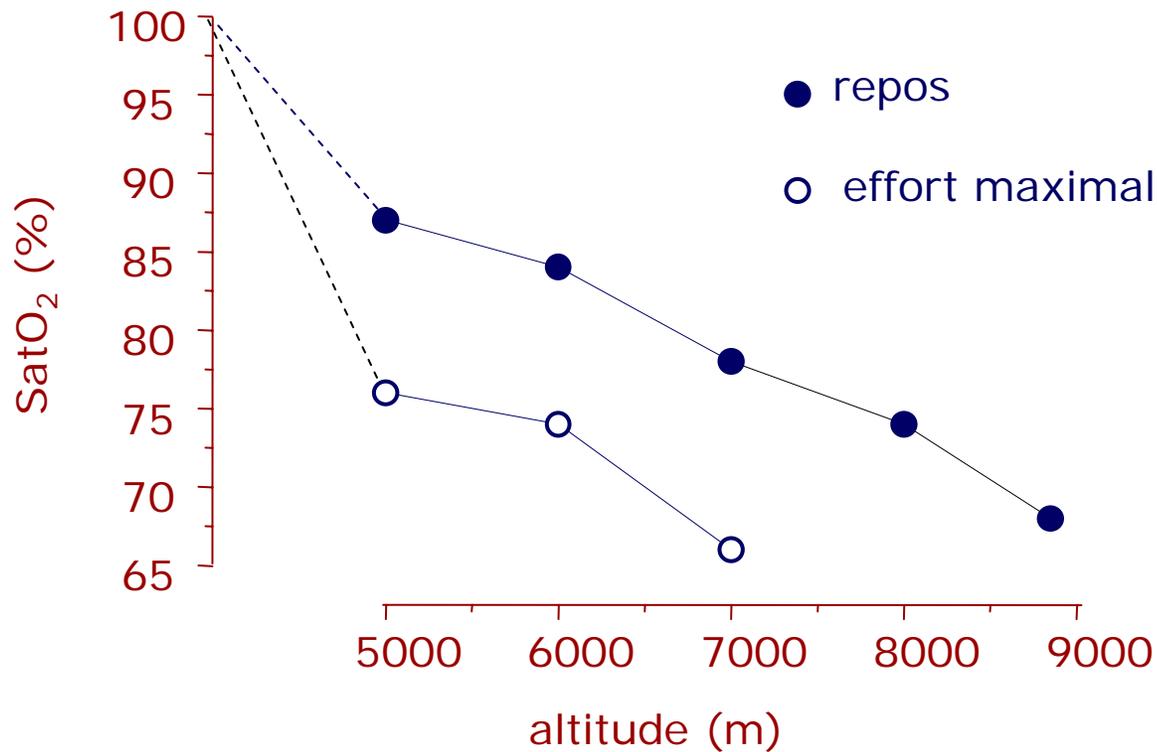
$$(1,39 \times \text{Hb} \times (\text{Sat}/100)) + 0,003 \text{ PO}_2$$



pression partielle et concentration dans le sang

oxygène

quantité d'O₂ présente dans le sang

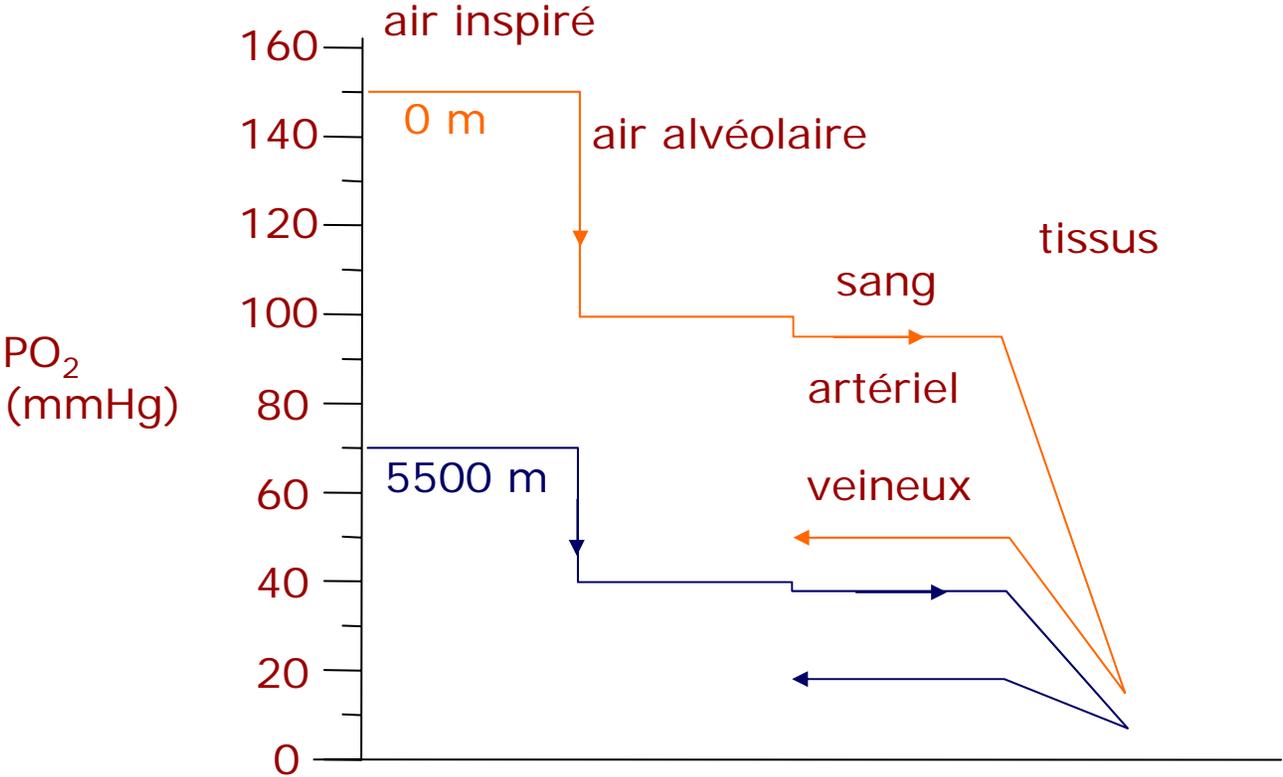


effet de l'altitude _____ pressions & concentrations en gaz

pression partielle et concentration dans le sang

oxygène

conséquence sur l'oxygénation tissulaire



pression partielle et concentration dans le sang

dioxyde de carbone

quantité de CO_2 présente dans le sang

- ◆ pas d'effet direct de l'altitude sur la quantité de CO_2 présente dans le sang
- ◆ effet indirect par la mise en jeu de systèmes de régulation

effet à court terme (1-3 jours) _____ variables, capteurs & effecteurs

principales variables régulées de la fonction respiratoire

variables régulées	capteurs	effecteurs
PO_2	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PO_2 concentration en O_2	capteurs rénaux	érythropoïèse
PCO_2	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PCO_2	chémorécepteurs centraux	ventilation

effet à court terme (1-3 jours) _____ variables, capteurs & effecteurs

principales variables régulées de la fonction respiratoire

variables régulées	capteurs	effecteurs
PO_2	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PO_2 concentration en O_2	capteurs rénaux	érythropoïèse
PCO_2	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PCO_2	chémorécepteurs centraux	ventilation

activation des chémorécepteurs à la PO_2 artérielle et ces conséquences

- ◆ effet de l'hyperventilation sur l'oxygène
hyperventilation réflexe (fréquence respiratoire et volume)
→ augmentation de la PAO_2

activation des chémorécepteurs à la PO₂ artérielle et ces conséquences

◆ effet de l'hyperventilation sur l'oxygène

hyperventilation réflexe (fréquence respiratoire et volume)

→ augmentation de la PAO₂

◆ effet sur le dioxyde de carbone

élimination accrue du CO₂ → diminution de la PCO₂ + alcalose

$$P_A \text{CO}_2 = (\dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}_A)K$$

activation des chémorécepteurs à la PO_2 artérielle et ces conséquences

◆ effet de l'hyperventilation sur l'oxygène

hyperventilation réflexe (fréquence respiratoire et volume)

→ augmentation de la PAO_2

◆ effet sur le dioxyde de carbone

élimination accrue du CO_2 → diminution de la PCO_2 + alcalose

$$P_A CO_2 = (\dot{V}CO_2 / \dot{V}_A)K$$

effet à court terme (1-3 jours) _____ variables, capteurs & effecteurs

principales variables régulées de la fonction respiratoire

variables régulées	capteurs	effecteurs
PO_2	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PO_2 concentration en O_2	capteurs rénaux	érythropoïèse
PCO_2	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PCO_2	chémorécepteurs centraux	ventilation

activation des chémorécepteurs à la PO₂ artérielle et ces conséquences

◆ effet de l'hyperventilation sur l'oxygène

hyperventilation réflexe (fréquence respiratoire et volume)

→ augmentation de la PAO₂

◆ effet sur le dioxyde de carbone

élimination accrue du CO₂ → diminution de la PCO₂ + alcalose

$$P_A \text{CO}_2 = (\dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}_A)K$$

◆ effet du dioxyde de carbone sur la ventilation

diminution de la PCO₂ + alcalose → activation des chémorécepteurs au CO₂

→ hypoventilation

activation des chémorécepteurs à la PO_2 artérielle et ces conséquences

◆ effet de l'hyperventilation sur l'oxygène

hyperventilation réflexe (fréquence respiratoire et volume)

→ augmentation de la PAO_2

◆ effet sur le dioxyde de carbone

élimination accrue du CO_2 → diminution de la PCO_2 + alcalose

$$P_A CO_2 = (\dot{V}CO_2 / \dot{V}_A)K$$

◆ effet du dioxyde de carbone sur la ventilation

diminution de la PCO_2 + alcalose → activation des chémorécepteurs au CO_2

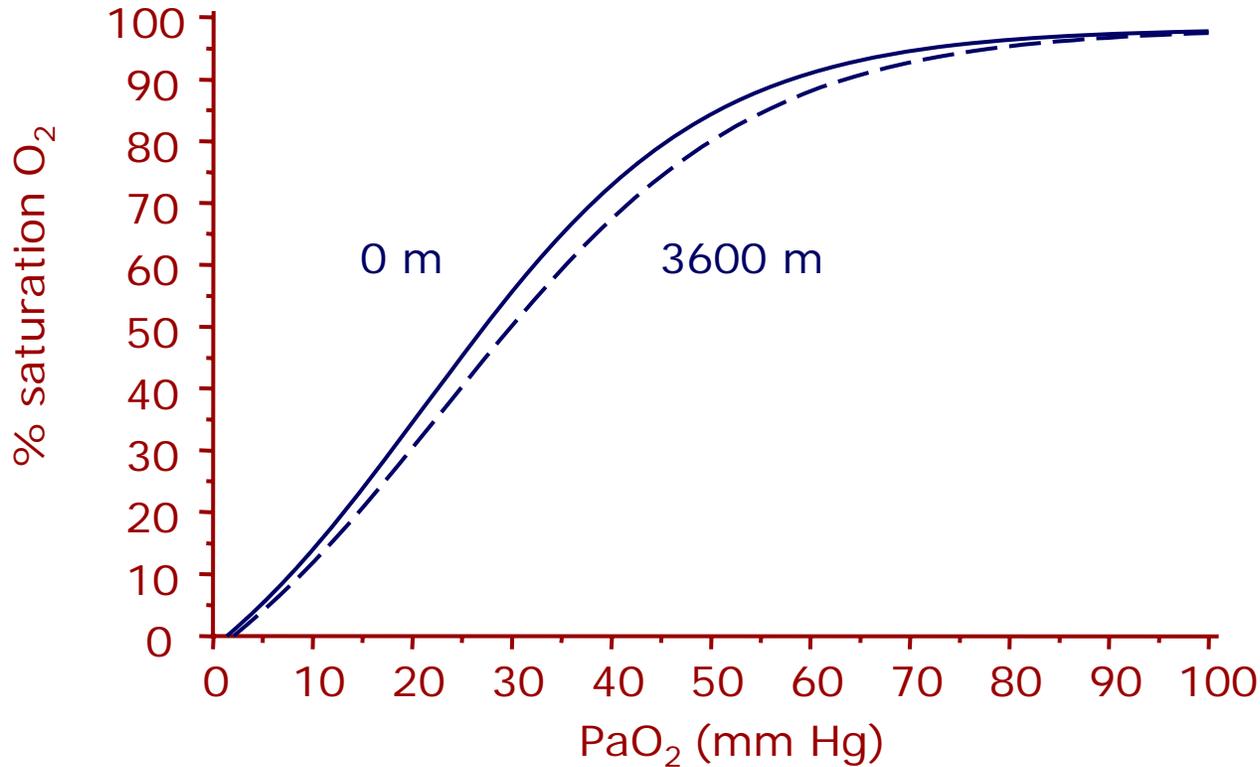
→ hypoventilation

respiration cyclique

sommeil : respiration périodique avec phase d'apnée

effet à court terme (1-3 jours) _____ courbe de dissociation de l'O₂

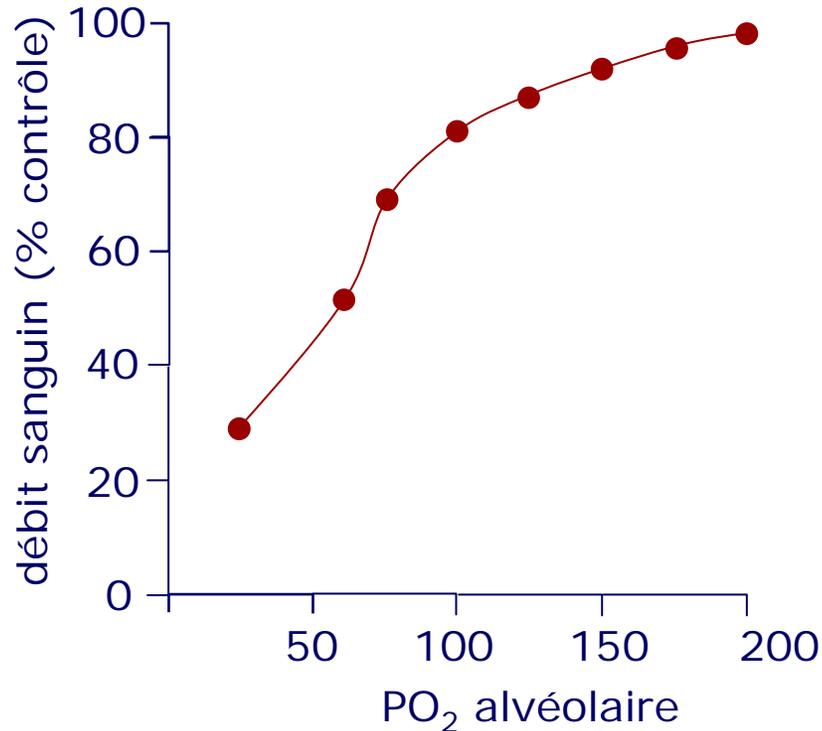
courbe de saturation de l'hémoglobine au niveau de la mer et à La Paz



- 1^{er} temps : déplacement de la courbe de dissociation vers la gauche : effet Bohr
- 2^e temps : déplacement de la courbe de dissociation vers la droite (2,3 DPG)

effet sur la circulation pulmonaire

la vasoconstriction hypoxique



mécanismes :

capteurs

corps neuroépithéliaux (?)

*présents dans les voies aériennes
sensibles à l'hypoxie*

libération de sérotonine

muscle lisse vasculaire (?)

effecteur

muscle lisse vasculaire

altitude → hypoxie alvéolaire → vasoconstriction hypoxique généralisée

hypertension artérielle pulmonaire

pathologies aiguës liées à l'altitude : oedème pulmonaire de haute altitude

mal aigu des montagne (MAM) bénin

oedème localisé de haute altitude (OLHA)

mal aigu des montagnes compliqué :

- oedème pulmonaire de haute altitude (OPHA)
- oedème cérébral de haute latitude (OCHA)

pathologies aiguës liées à l'altitude : oedème pulmonaire de haute altitude

mal aigu des montagne (MAM) bénin

oedème localisé de haute altitude (OLHA)

mal aigu des montagnes compliqué :

- oedème pulmonaire de haute altitude (OPHA)
- oedème cérébral de haute latitude (OCHA)

étiologie de l'OPHA

pathologies aiguës liées à l'altitude : oedème pulmonaire de haute altitude

étiologie de l'OPHA

◆ *vasoconstriction hypoxique*

VCH → augmentation de pression

→ passage du liquide sanguin à travers la paroi endothéliale lésée dans les alvéoles pulmonaires.

pathologies aiguës liées à l'altitude : oedème pulmonaire de haute altitude

étiologie de l'OPHA

- ◆ *vasoconstriction hypoxique*
- ◆ *réétention hydrique*

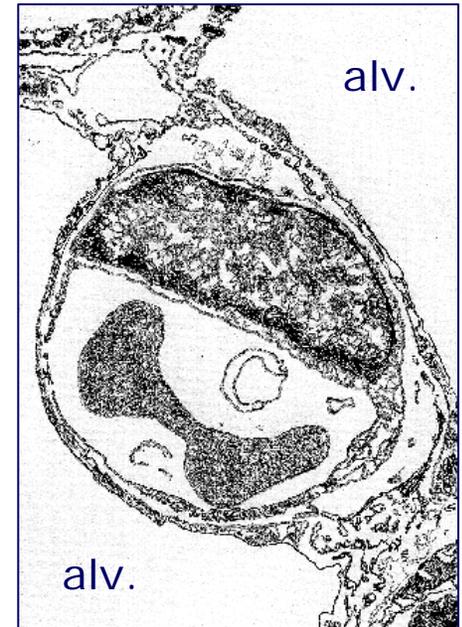
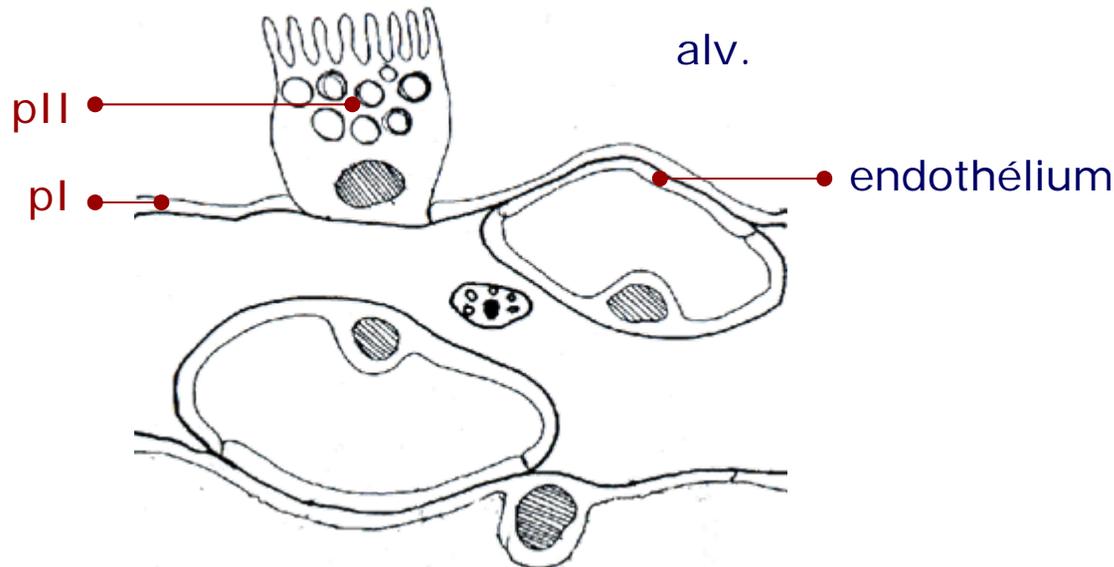
l'altitude → augmentation du volume sanguin total, lié à une diminution de la diurèse et une vasoconstriction périphérique liée au froid.

→ augmentation du volume circulant intra-pulmonaire → passage du liquide hors des vaisseaux sanguins

pathologies aiguës liées à l'altitude : oedème pulmonaire de haute altitude

étiologie de l'OPHA

- ◆ *vasoconstriction hypoxique*
- ◆ *réétention hydrique*
- ◆ *lésion de la membrane alvéolo-capillaire*



pathologies aiguës liées à l'altitude : oedème pulmonaire de haute altitude

étiologie de l'OPHA

- ◆ *vasoconstriction hypoxique*
- ◆ *rétenction hydrique*
- ◆ *lésion de la membrane alvéolo-capillaire*

altitude → modifications de la paroi alvéolo-capillaire au niveau de l'endothélium et de l'épithélium.

- Les lésions endothéliales : effet direct de l'hypoxie et/ou action de médiateurs de l'inflammation.
- les lésions épithéliales : hypoxie → modification des propriétés de réabsorption d'eau de l'espace alvéolaire vers le milieu interstitiel.

pathologies aiguës liées à l'altitude : oedème pulmonaire de haute altitude

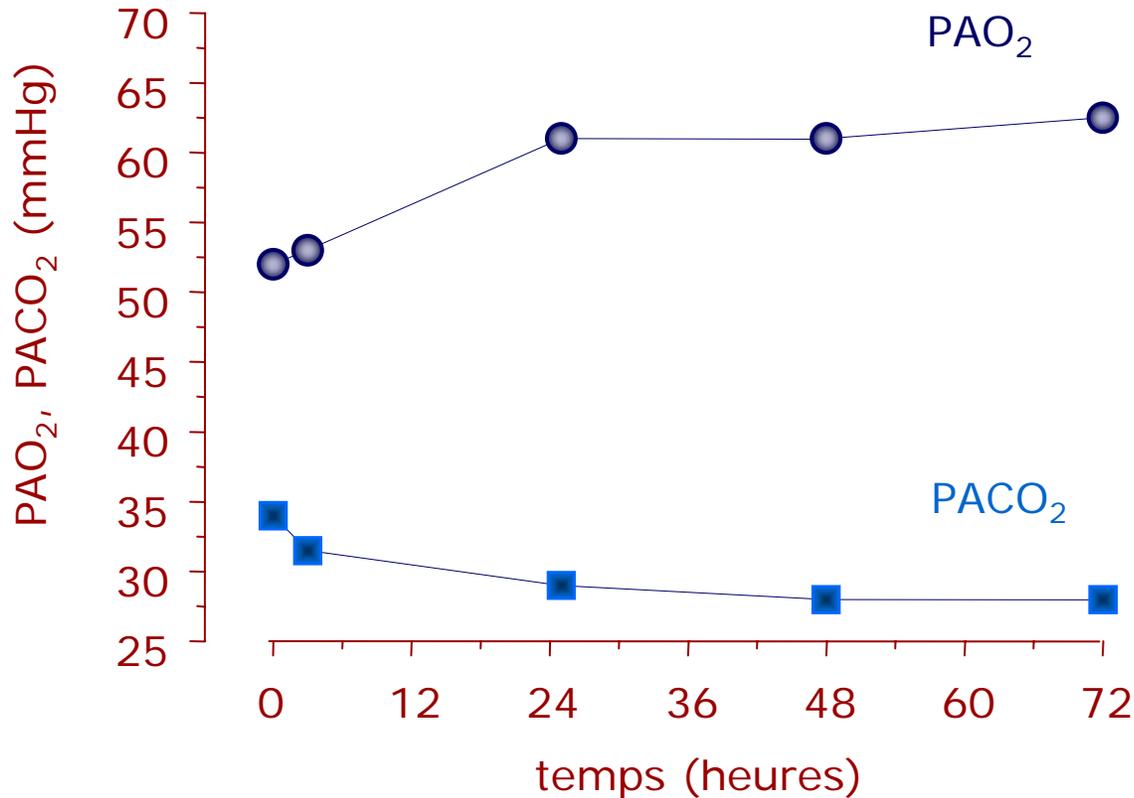
étiologie de l'OPHA

- ◆ *vasoconstriction hypoxique*
- ◆ *rétenion hydrique*
- ◆ *lésion de la membrane alvéolo-capillaire*

altitude → modifications de la paroi alvéolo-capillaire au niveau de l'endothélium et de l'épithélium.

- Les lésions endothéliales : effet direct de l'hypoxie et/ou action de médiateurs de l'inflammation.
- les lésions épithéliales : hypoxie → modification des propriétés de réabsorption d'eau de l'espace alvéolaire vers le milieu interstitiel.
- réabsorption d'eau : activité de la pompe Na-K-ATPase au pôle basal des pneumocytes de type 2
→ activité de la pompe Na-K-ATPase diminuée par l'hypoxie.

effet à moyen et long terme : 2-3 jours à 3-4 semaines

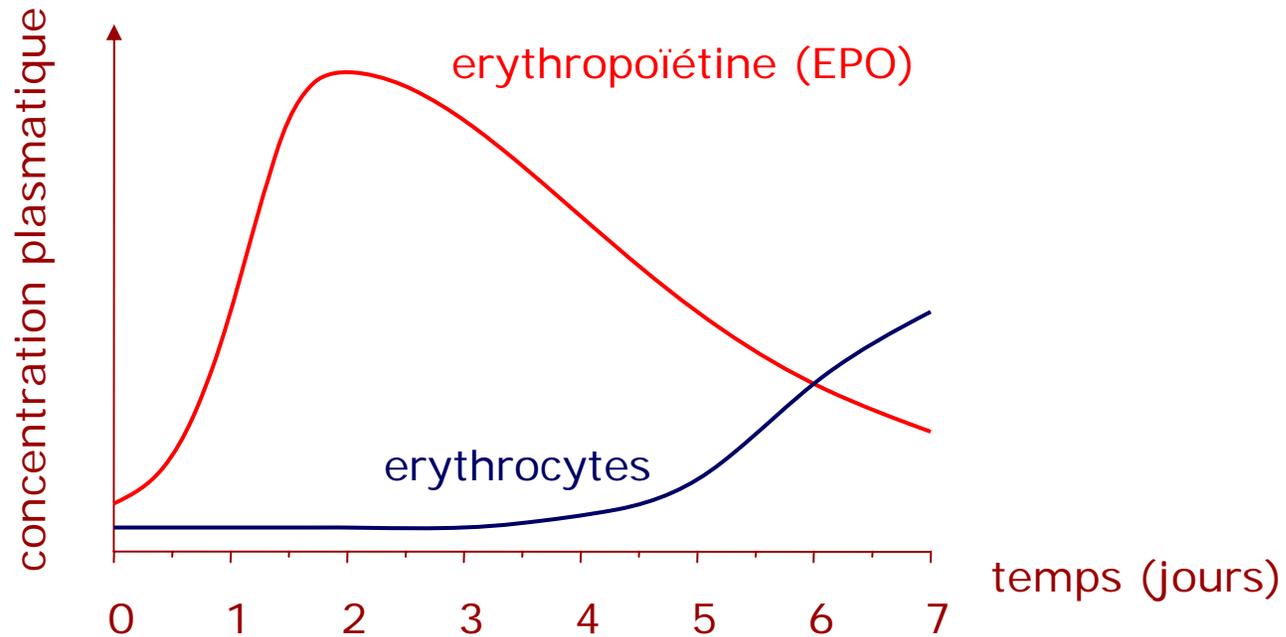


stabilisation de l'hyperventilation

stabilisation du pH

(modulation de l'élimination des bicarbonates)

stimulation de l'érythropoïèse



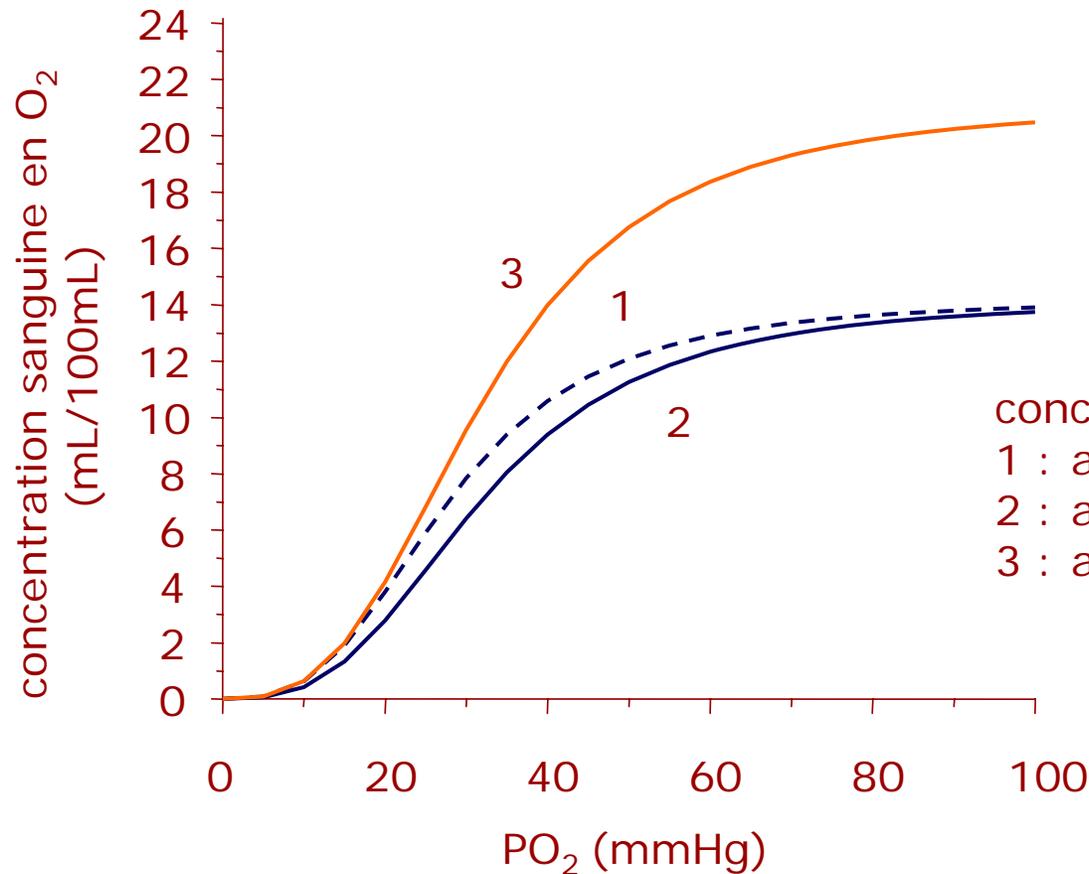
hématocrite

normal : 40-45 %

après 3-4 semaines d'altitude (3500 m) : 55 – 60 %

concentration en oxygène du sang

concentration sanguine en O₂ (ml/ 100 ml) = (1,39 x Hb x (Sat/100)) + 0,003 PO₂



concentration sanguine en O₂ :

- 1 : au niveau de la mer ;
- 2 : après 2 jours à 4000 m ;
- 3 : après 3 semaines à 4000 m.

pression artérielle pulmonaire

- ◆ rat normoxique : 20 mm Hg
- ◆ rat hypoxique (15 jours à 5500 m) : 32 mm Hg

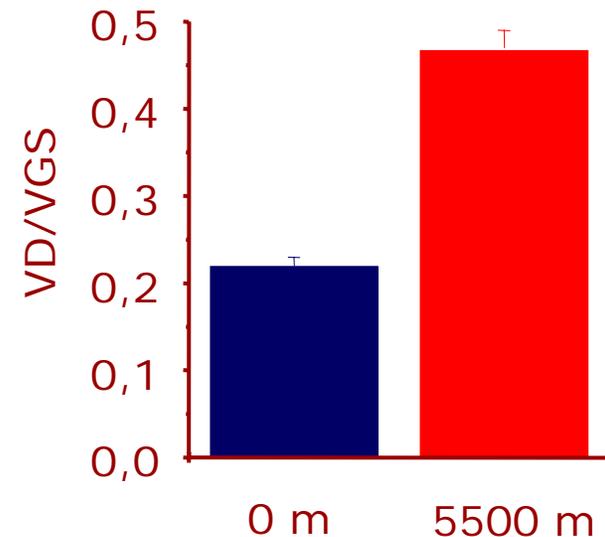
effet cardiaque

conditions	VD (mg)	VGS (mg)	n
normoxique	167 ± 7	965 ± 37	8
hypoxiques	309 ± 9	656 ± 24	16

VD : ventricule droit

VGS : ventricule gauche + septum

→ hypertrophie cardiaque droite



pression artérielle pulmonaire

- ◆ rat normoxique : 20 mm Hg
- ◆ rat hypoxique (15 jours à 5500 m) : 32 mm Hg

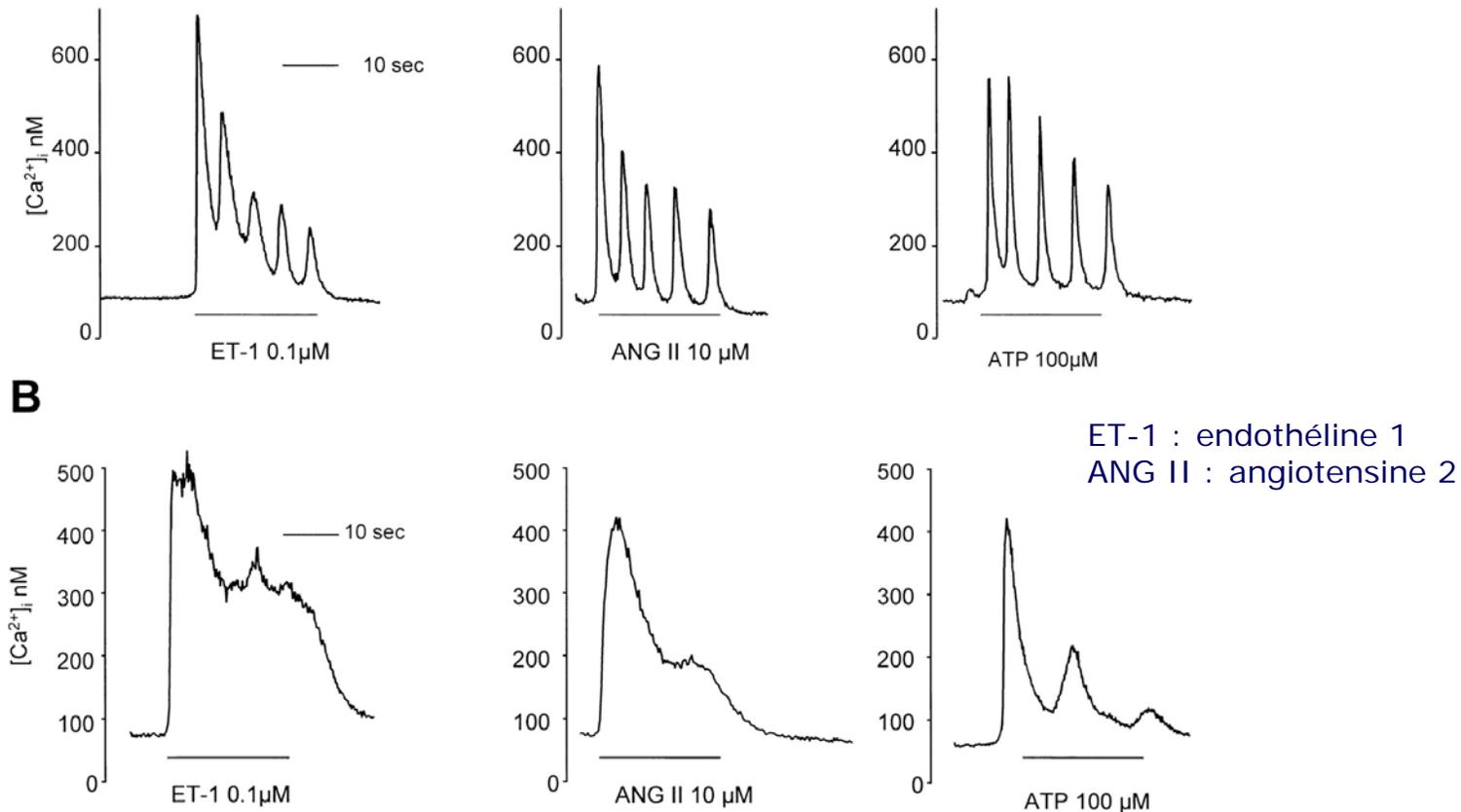
remodelage de la paroi artérielle pulmonaire

conditions	surface de muscle lisse par μm de paroi interne (μm^2)	nombre de noyaux par unité de surface (cell. / mm^2)	épaisseur de la média (μm)
normoxique	167 ± 7	965 ± 37	$0,22 \pm 0,01$
hypoxiques	309 ± 9	656 ± 24	$0,47 \pm 0,02$

- épaissement de la média
- hypertrophie du muscle lisse

effet de l'hypoxie sur le muscle lisse d'artère pulmonaire

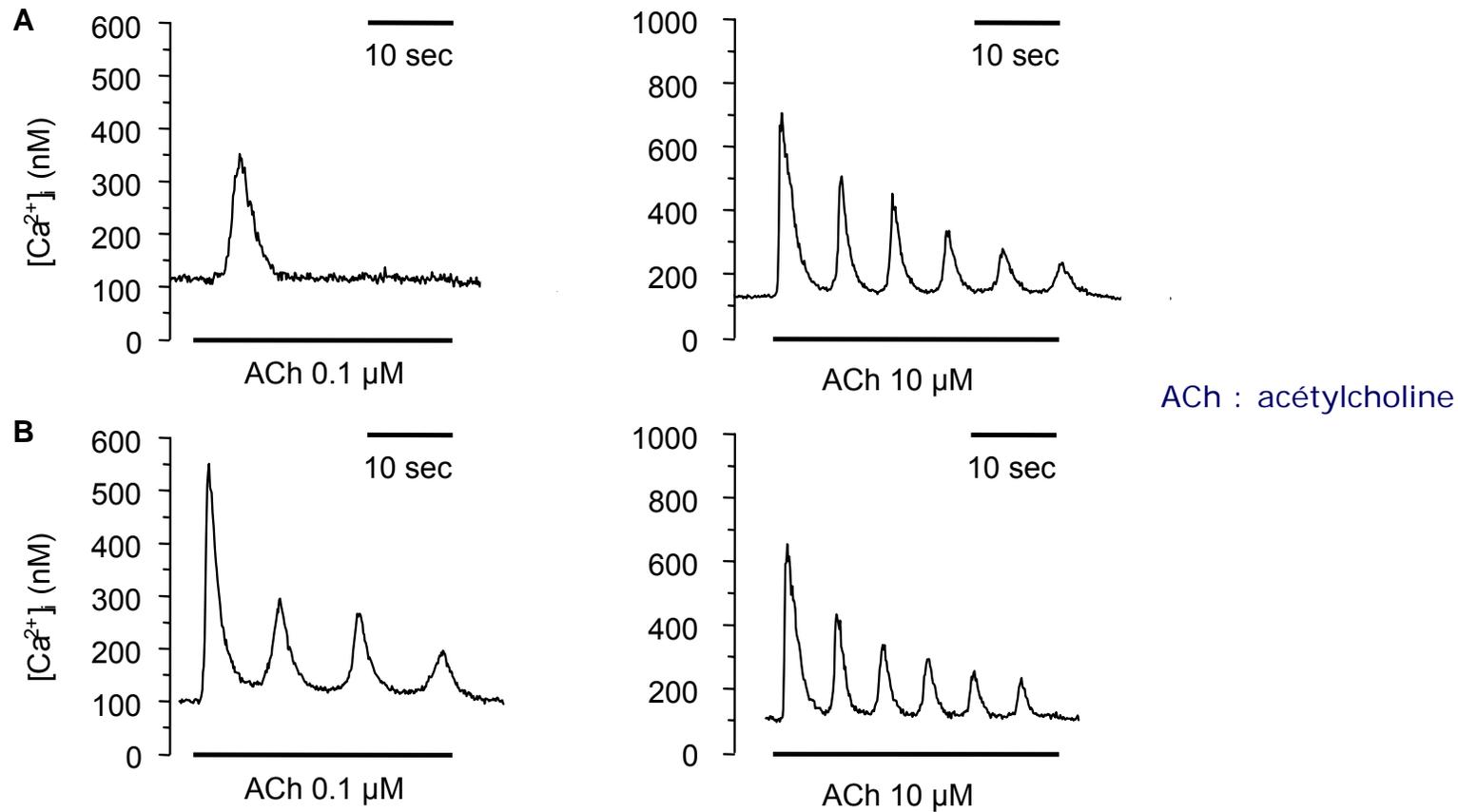
A réponse calcique cytosolique de cellule musculaire lisse d'artère pulmonaire de rat en normoxie (A) et après 15 jours à 5500 m (B)



→ modification du signal calcique de la CML d'artère pulmonaire
perte des oscillations calciques

effet de l'hypoxie sur le muscle lisse des voies aériennes

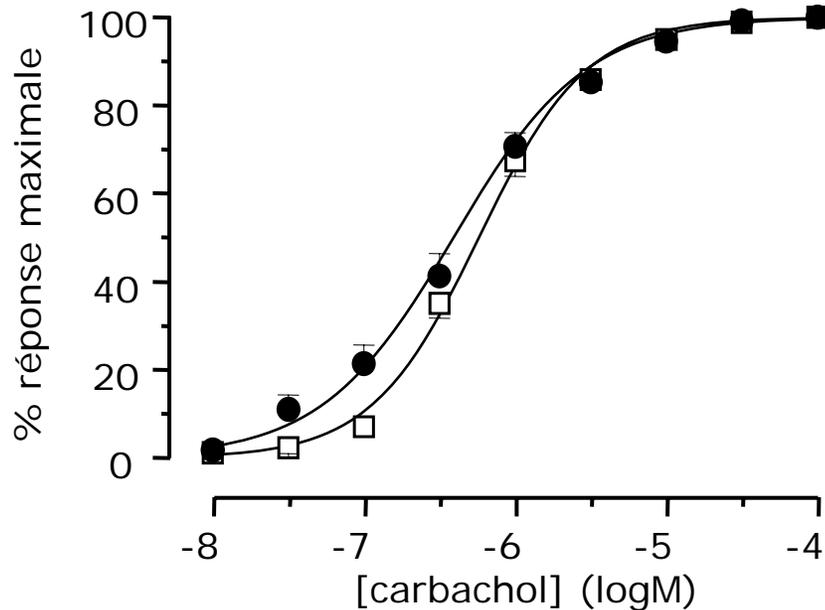
réponse calcique cytosolique de cellule musculaire lisse de trachée de rat en normoxie (A) et après 15 jours à 5500 m (B)



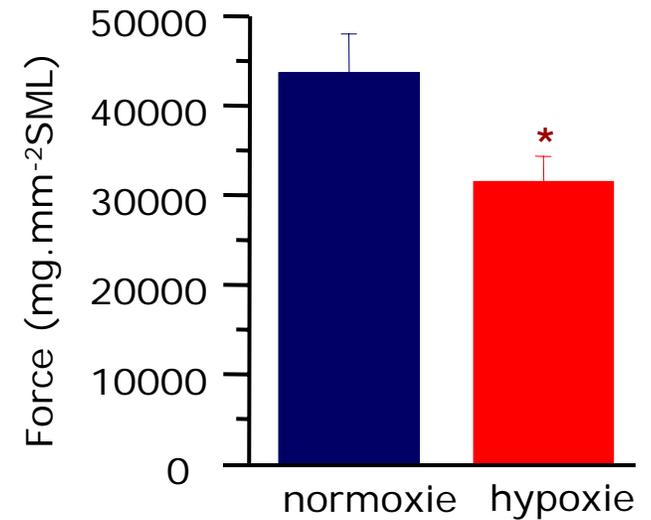
→ modification du signal calcique de la CML de la trachée
oscillations à concentration sous-maximale d'agoniste

effet de l'hypoxie sur le muscle lisse des voies aériennes

réponse contractile de trachée de rat
en normoxie (□)
après 15 jours à 5500 m (●)



réponse contractile de trachée de rat
normalisée / surface de muscle lisse
en normoxie (■)
après 15 jours à 5500 m (■)



→ modification de la réponse contractile de la CML de la trachée
légère hypersensibilité (cf. réponse calcique)
hyporéactivité

néoformation de capillaires sanguins

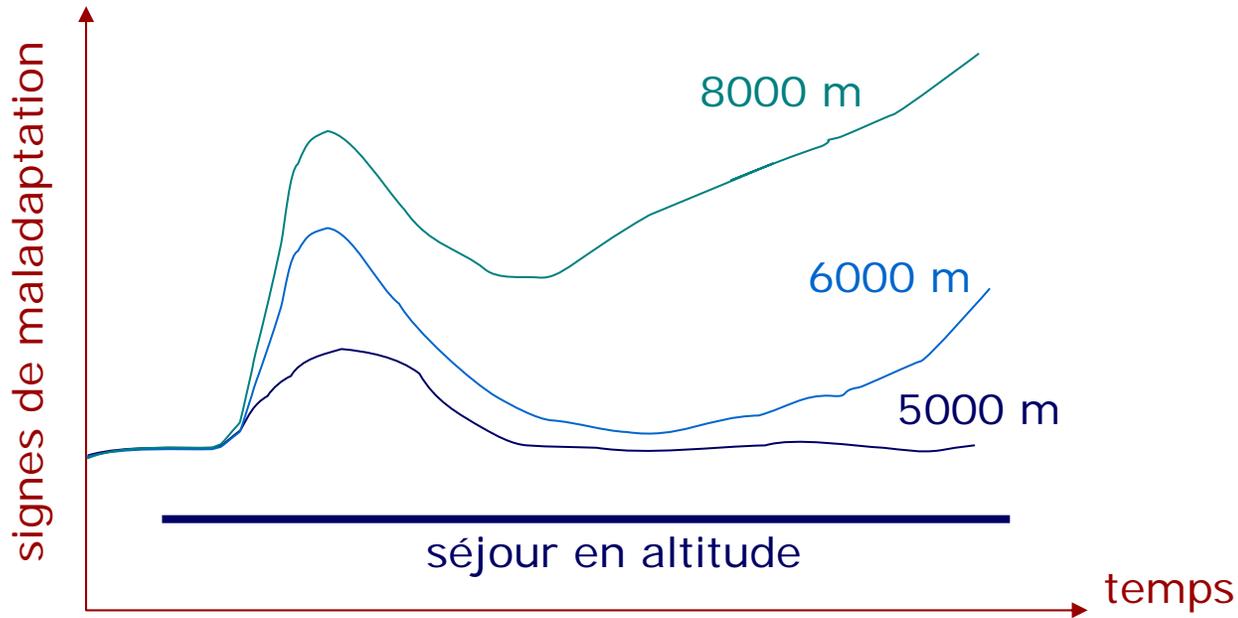
facteurs impliqués

- ◆ VEGF (*vascular endothelial growth factor*)
- ◆ PDGF (*platelet-derived growth factor*)
- ◆ *placental growth factor*
- ◆ *transforming growth factor B-1*

effet à moyen et long terme _____ récepteurs moléculaires à l'oxygène

- ◆ glomus carotidiens et aortique
- ◆ cellules productrices d'EPO
 - rein*
 - foie foetal*
- ◆ corps neuroépithéliaux
- ◆ cellules musculaires lisses
- ◆ cellules endothéliales
- ◆ ...

variations temporelles des signes de maladaptation



5000 m : limite de la vie permanente possible (espèce humaine)

résultats différents selon les populations

Amérique latine : hauts plateaux andins (3500-4000 m)

Asie : hauts plateaux tibétains (3500-4000 m)

Afrique : hauts plateaux éthiopiens (3500 m)

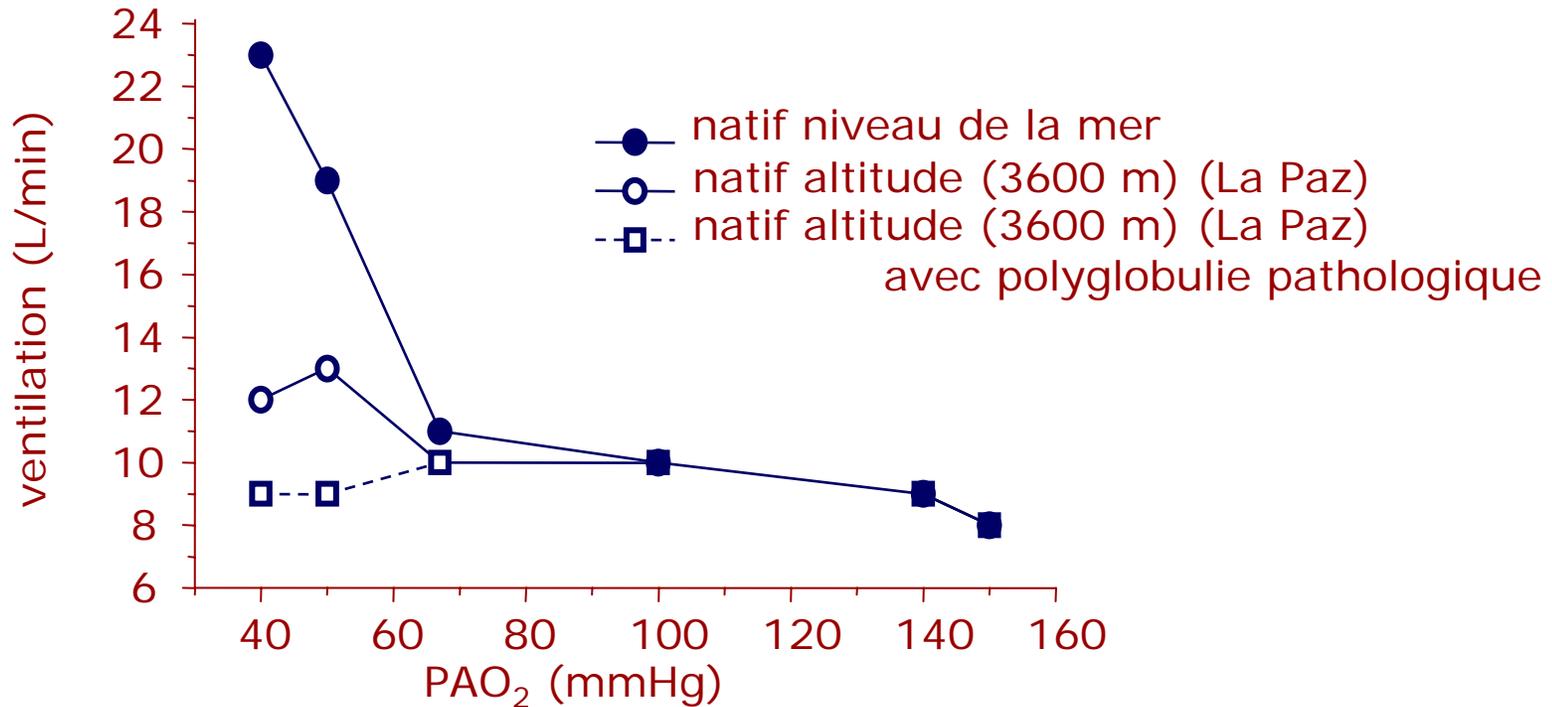
études : en général, populations andines

PO₂ et PCO₂ dans le sang

pression atmosphérique (PB), PO₂ artérielle (PaO₂) et PCO₂ artérielle (PaCO₂) moyennes à La Paz, en fonction de l'altitude

altitude	PB (mm Hg)	PaO ₂ (mm Hg)	PaCO ₂ (mm Hg)
3244 m	520	65	32
3600 m	495	60	30
4000 m	462	52	27

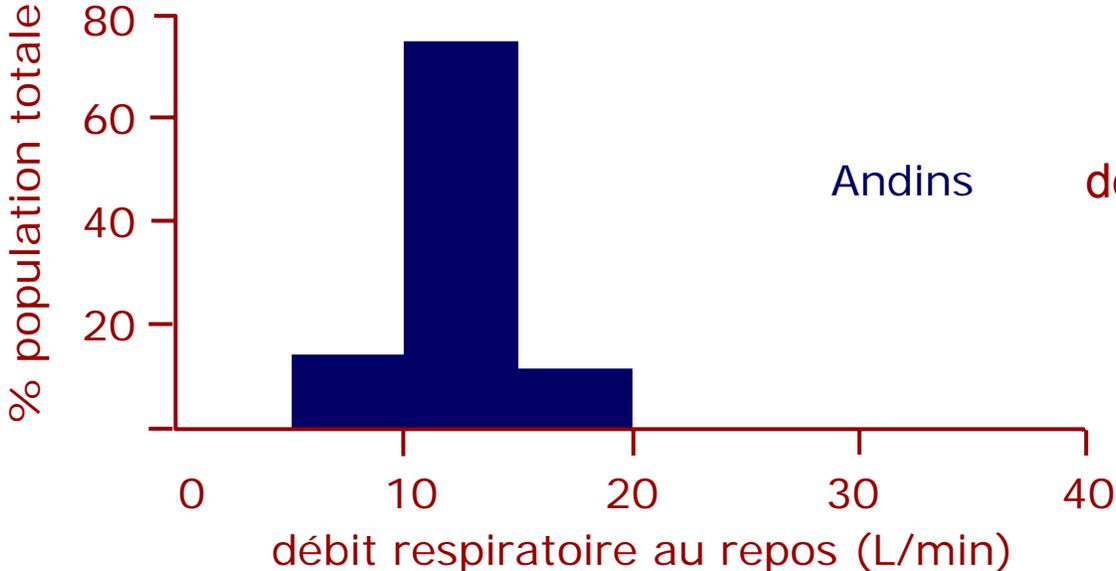
→ diminution des pressions partielles dans le sang en O₂ et en CO₂

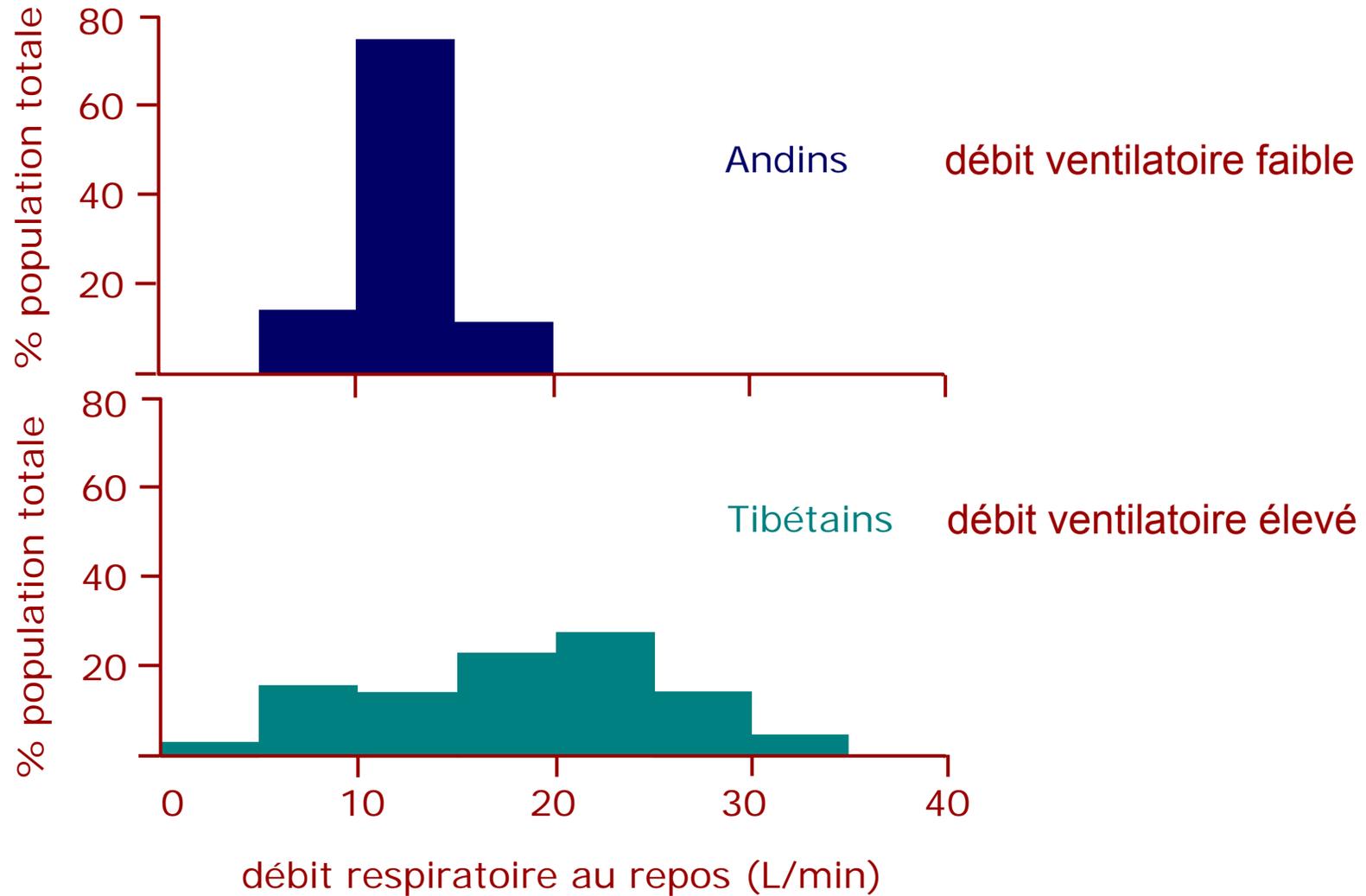
réponse à l'O₂ au CO₂

populations andines :

- ◆ hyperventilation moins marquée que chez les sujets acclimatés
- ◆ faible réponse ventilatoire à l'hypoxie

réponse à l'O₂ au CO₂



réponse à l'O₂ au CO₂

hématocrite

normal, niveau de la mer :40 à 45 %

normal, habitants de La Paz : jusqu'à 57 %

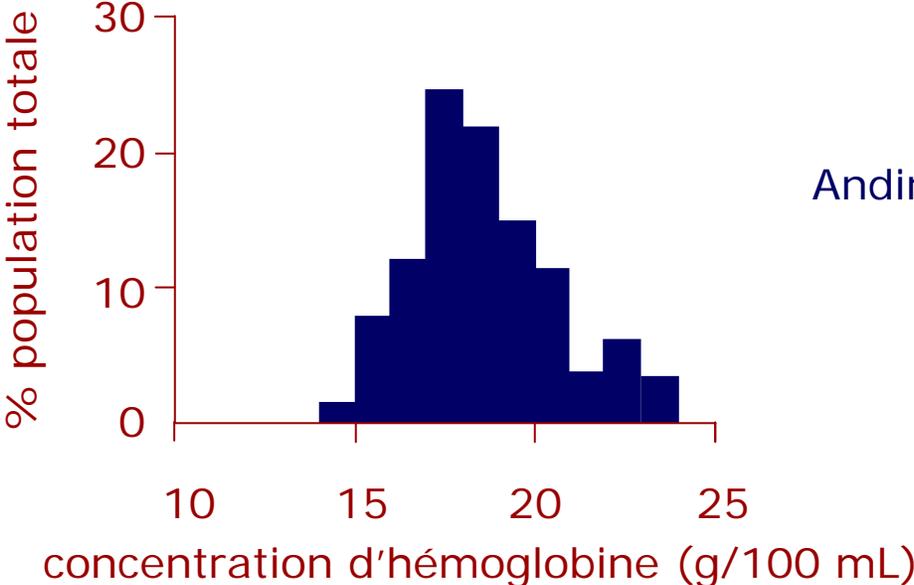
polyglobulie pathologique (polycythémie) : jusqu'à 80 %

polyglobulie pathologique d'altitude

populations andines :

- ◆ polyglobulie « normale »
- ◆ + cas de polyglobulie pathologique

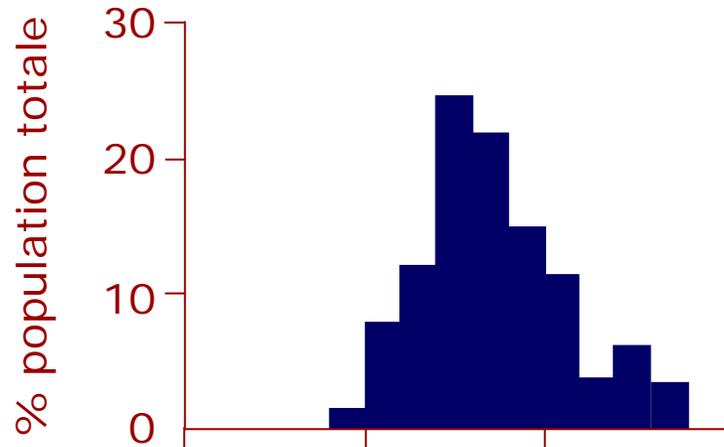
concentration en hémoglobine



Andins

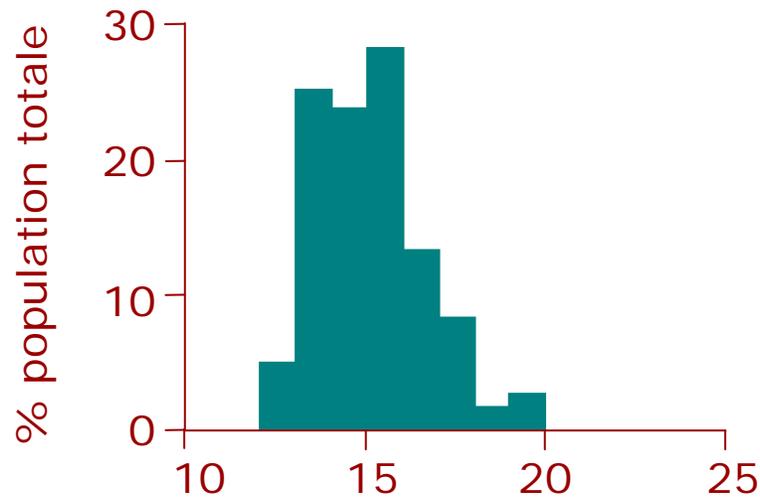
polycythémie

concentration en hémoglobine



Andins

polycythémie

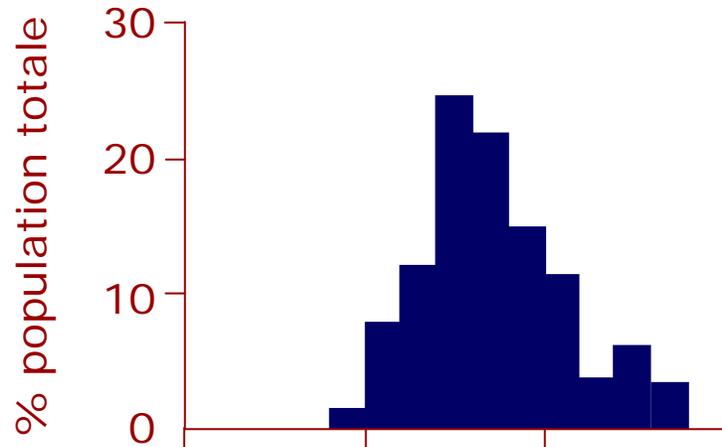


Tibétains

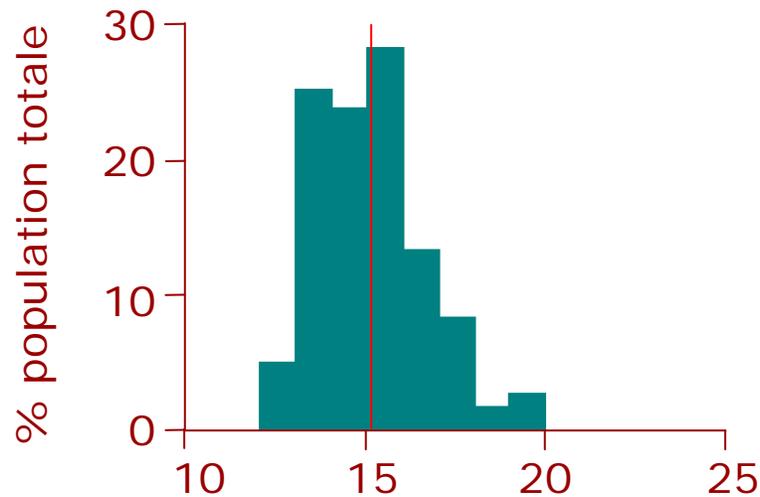
pas de polycythémie

concentration d'hémoglobine (g/100 mL)

concentration en hémoglobine



Andins polycythémie



Tibétains pas de polycythémie

Éthiopiens pas de polycythémie

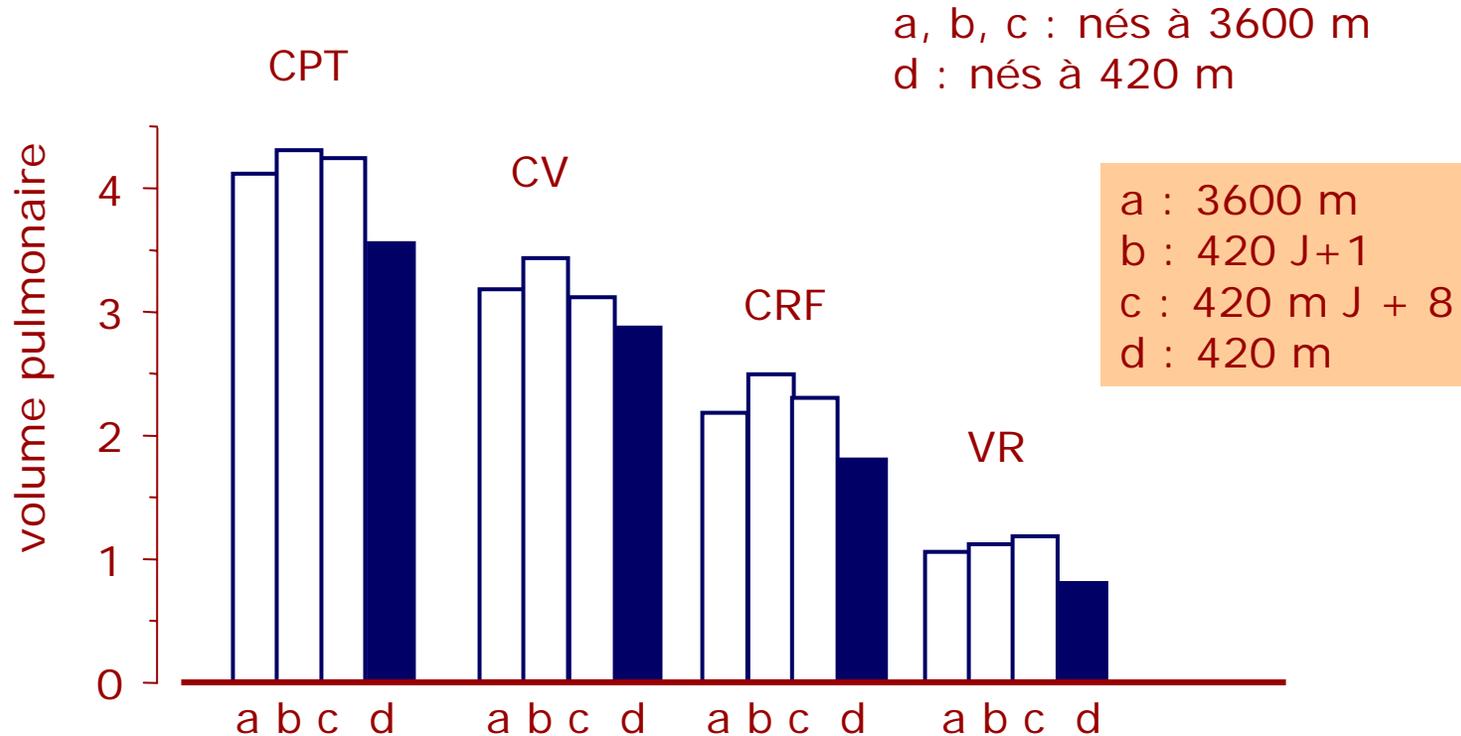
concentration d'hémoglobine (g/10 mL)

populations vivant en altitude _____ diffusion alvéolo-capillaire

diffusion alvéolo-capillaire (DL^{CO} , ml/min/mmHg) corrigées en fonction de la concentration en hémoglobine chez les enfants au niveau de la mer et en altitude (La Paz)

	filles	garçons
niveau de la mer	$7,7 \pm 2,0$	$7,1 \pm 1,9$
La Paz	$13,1 \pm 2,7$	$14,2 \pm 1,9$

populations andines :
augmentation de la diffusion alvéolo-capillaire



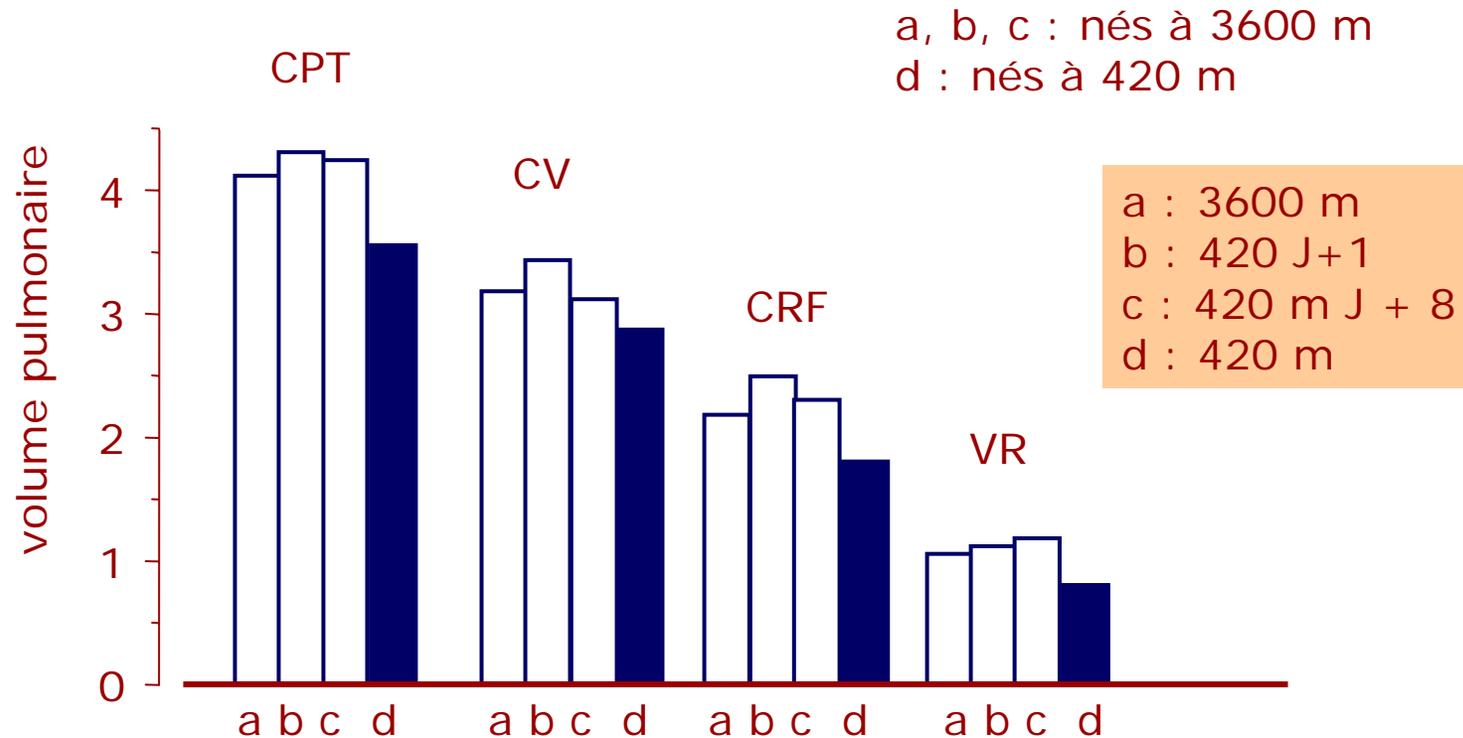
capacité pulmonaire totale (CPT)

capacité vitale (CV)

capacité résiduelle fonctionnelle (CRF)

volume résiduel (VR)

mesurés chez des personnes nées en haute et basse altitude



populations andines :

augmentation irréversible des volumes pulmonaires

différents types de réponses à l'altitude

1. les réponses à court terme
 2. les réponses à moyen terme
 3. les réponses des natifs
(variables selon les populations)
- ◆ réponses « physiologiques/physiopathologiques » : réversibles
(ajustements)
→ analyse fonctionnelle
 - ◆ réponses « développementales » : irréversibles, mais non héréditaires
 - ◆ réponses « génétiques » : héréditaires (adaptations *senso strictu*)

différents types de réponses à l'altitude

1. les réponses à court terme
2. les réponses à moyen terme
3. les réponses des natifs
variables selon les populations

◆ réponses « physiologiques/physiopathologiques » : réversibles
(ajustements)

→ analyse fonctionnelle

◆ réponses « développementales » : irréversibles, mais non héréditaires

◆ réponses « génétiques » : héréditaires (adaptations *senso strictu*)

explications :

début de réponses génétiques ?

variabilités aléatoires ? (effet Sewall Wright)

différents types de réponses à l'altitude

1. les réponses à court terme
 2. les réponses à moyen terme
 3. les réponses des natifs
(variables selon les populations)
- ◆ réponses « physiologiques/physiopathologiques » : réversibles
(ajustements)
→ analyse fonctionnelle
 - ◆ réponses « développementales » : irréversibles, mais non héréditaires
 - ◆ réponses « génétiques » : héréditaires (adaptations *senso strictu*)

NB :

réponses comportementales

génétiques

culturelles

Mammifères

transport de l'oxygène dans le sang

*courbe de dissociation de l'hémoglobine
érythrocytes*

- hématocrite
- forme des globules rouges
- déformation des globules rouges

appareil circulatoire

- circulation systémique
- circulation pulmonaire
- particularités physiologiques du fœtus

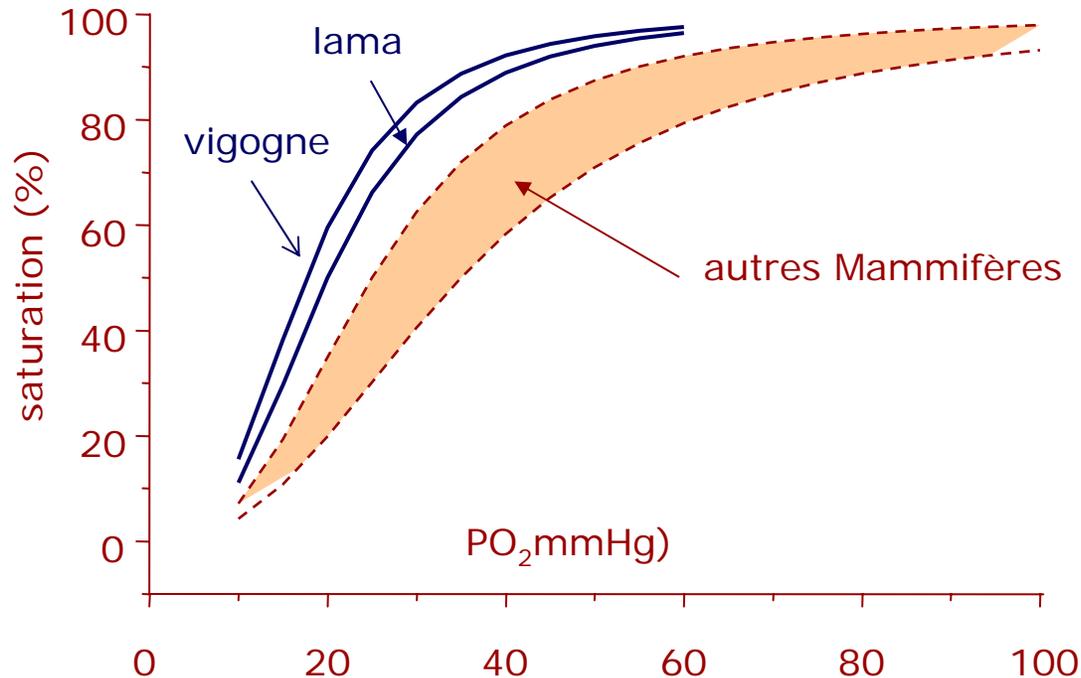
oiseaux

fonctionnement de l'appareil respiratoire des oiseaux
adaptations spécifiques à l'altitude

conclusion

courbe de saturation de l'hémoglobine

Mammifères



espèces	P50 (Torr)
vigogne	17,6
autres espèces	20 – 30

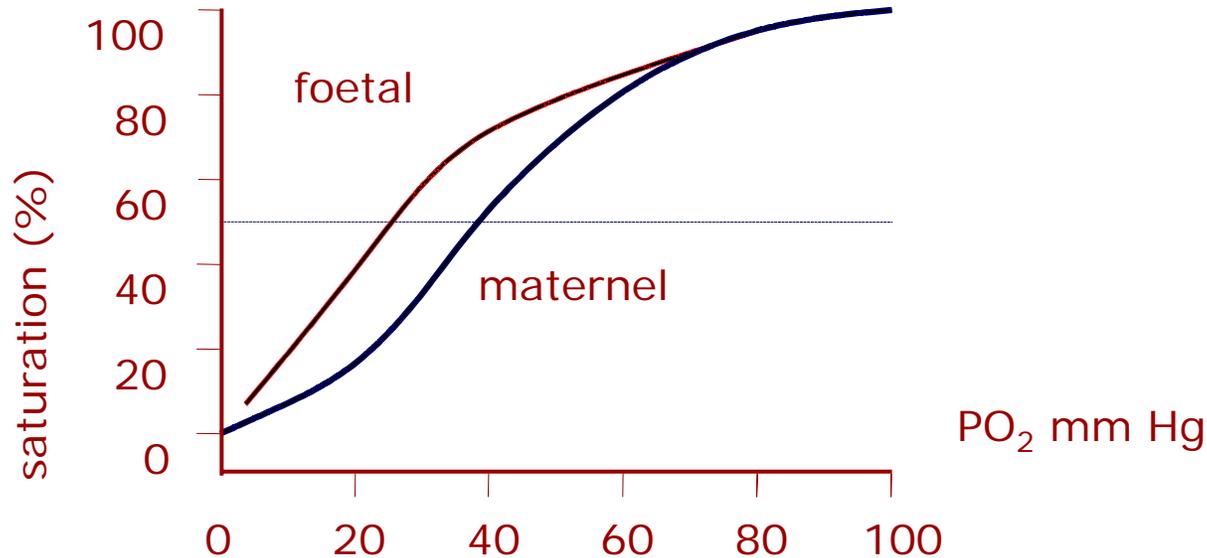
déplacement de la courbe vers la gauche
→ captation d'O₂ au niveau des poumons

courbe de saturation de l'hémoglobine

Mammifères

cas du fœtus

courbes de dissociation maternelle et foetale d'animaux de plaine



foetus de chèvre : courbe déplacée vers la gauche/courbe de la mère

foetus de lama : pas de déplacement/courbe de la mère
augmentation de la [hémoglobine]

érythrocytes

Mammifères

hématocrite

Lamas : 23-34 %

caractéristiques des hématies

caractéristiques des hématies	Lama	autres espèces
forme	ellipsoïde	circulaire
nombre	10 – 17 10^6	5-10 10^6
volume	22-29 μm^3	60-80 μm^3
HCM*	9-12 pg	25-30 pg
CHCM**	39-46 g/dl	30-35 g/dl

*HCM : hémoglobine corpusculaire moyenne : concentration moyenne en hémoglobine par hématie

**CHCM : concentration en hémoglobine corpusculaire moyenne (calculé par rapport à l'hématocrite)

érythrocytes

Mammifères

déformation des globules rouges

espèces	dimension des érythrocytes (en μm)		
	normal	déformés à 590 dyn/cm^2	
		minimum	maximum
chèvre	3,3	2,5	5,5
porc	7,0	2,6	12,0
homme	8,0	2,9	16,0
phoque	11,4	3,5	25,0
lama	2,8 x 7,8	pas de déformation ; orientation	
chameau	3,5 x 6,8		

Camélidés : forme ovoïde ; pas de déformation ; orientation

interprétation ?

pression artérielle pulmonaire

Mammifères

pression artérielle pulmonaire mesurée chez des lamas

conditions	pression artérielle <i>systolique/diastolique (moyenne)</i>
haute latitude <i>(La Raya : 4200 m)</i>	20/9 (14) mmHg
basse altitude <i>(Londres)</i>	13/6 (10) mmHg

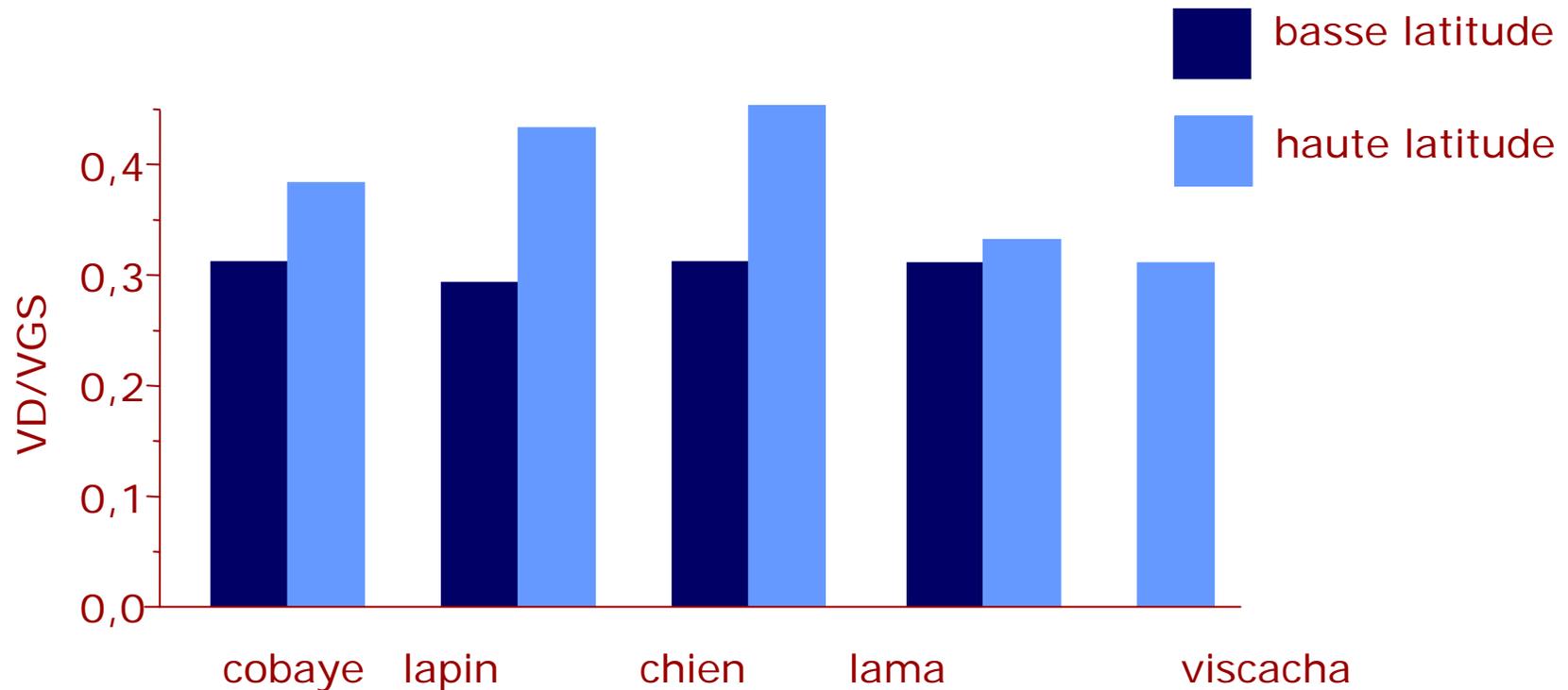
pas d'hypertension artérielle pulmonaire hypoxique

volumes cardiaques

rapport VGS/VD

Mammifères

rapport du poids du ventricule droit sur le poids du ventricule gauche et du septum (VD/VGS) chez différents animaux de basse et haute altitude.

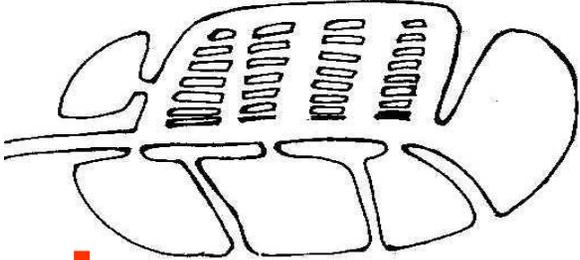


animaux de plaine : altitude → hypertrophie cardiaque droite

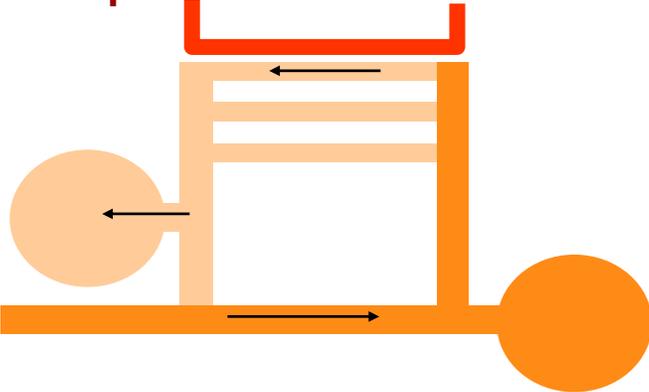
animaux d'altitude : altitude → pas d'hypertrophie cardiaque droite

ventilation unidirectionnelle des Oiseaux

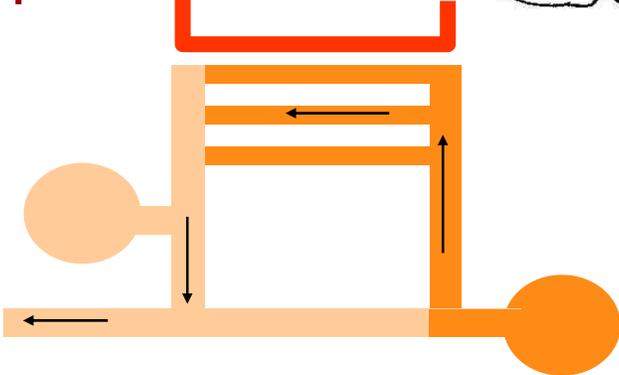
Oiseaux



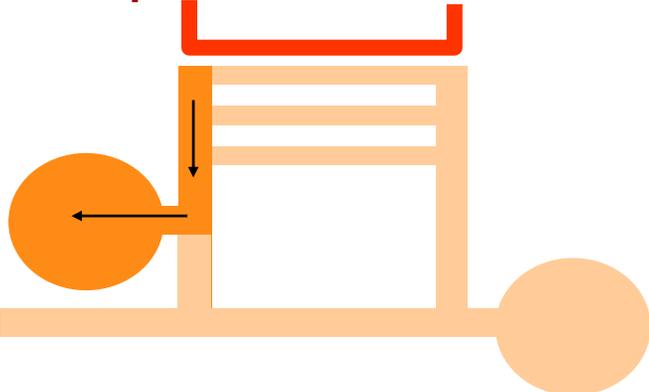
A inspiration



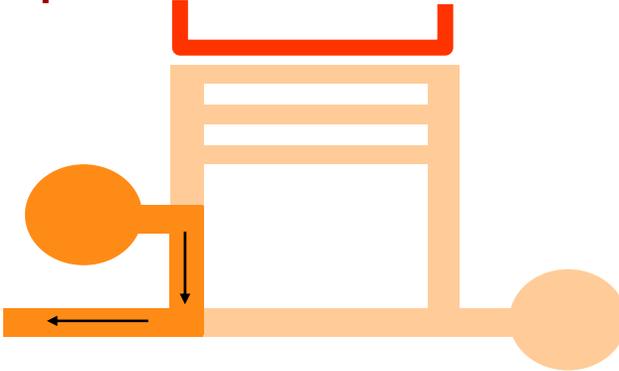
B expiration



C inspiration



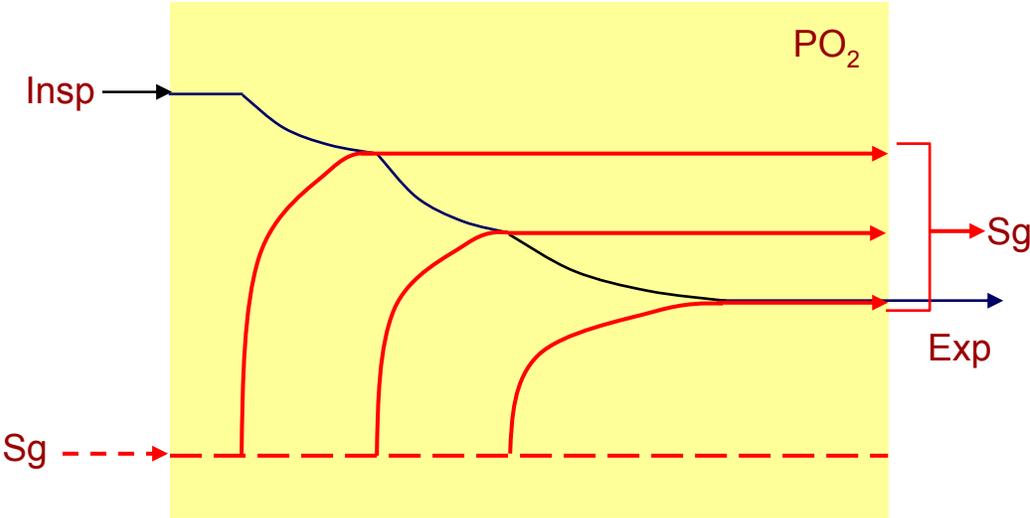
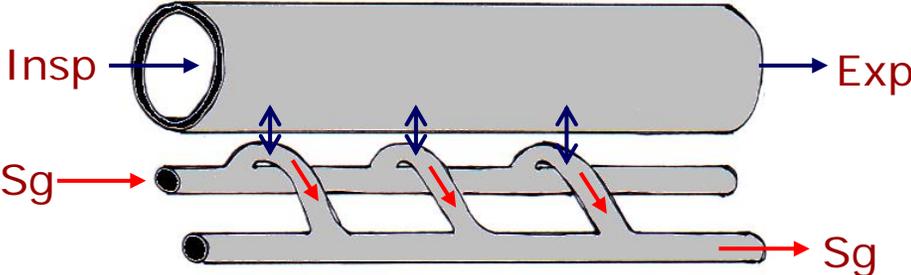
D expiration



ventilation unidirectionnelle des Oiseaux

Oiseaux

principe du système concourant multiple



$PaO_2 > PO_2$ de l'air expiré

adaptations spécifiques des oiseaux à l'altitude

Oiseaux

◆ courbe de dissociation de l'oxygène

modification de la P50

Oie à tête barrée : P50 = 10 mm Hg

◆ bonne tolérance à l'alcalose

alcalose → effet Bohr = déplacement de la courbe de dissociation vers la gauche

◆ débit sanguin cérébral

débit sanguin cérébral normal lors d'hypocapnie

- oiseaux : meilleure tolérance à l'altitude que les Mammifères
- oiseaux de plaine
- oiseaux d'altitude
- pré-adaptation des oiseaux à une bonne tolérance à l'altitude

- ◆ **notion de fonction**
- ◆ **notion de réponse / d'adaptation / d'ajustement**

◆ **notion de réponse / d'adaptation / d'ajustement**

altitude = conditions « non standard »

réponses « physiologiques » (ajustements) :
réversibles (court terme/long terme)
adaptées/ non adaptées/ hyperexis

réponses « développementales » :
irréversibles, mais non héréditaires (long terme)
adaptées/ non adaptées/ hyperexis

◆ notion de réponse / d'adaptation / d'ajustement**altitude = conditions « non standard »**

réponses « physiologiques » (ajustements) :
réversibles (court terme/long terme)
adaptées/ non adaptées/ hyperexis

réponses « développementales » :
irréversibles, mais non héréditaires (long terme)
adaptées/ non adaptées/ hyperexis

altitude = conditions « standard »

réponses « génétiques » : héréditaires
adaptation / histoire évolutive
ex : Camélidés
variations aléatoires

limites :

contraintes extérieures

contraintes intérieures : « choix adaptatif » préexistant
(Oiseaux / Mammifères)

◆ notion de fonction

◆ notion de réponse / d'adaptation / d'ajustement

« The result is that the phenotype is often a patchwork of features that were specifically selected for a particular function (or as the answer to a particular selection pressure) and others are the by-product of the phenotype as a whole and are simply tolerated by selection ».

E. Mayr, The Growth of biological thought