

Physiologie de l'apnée

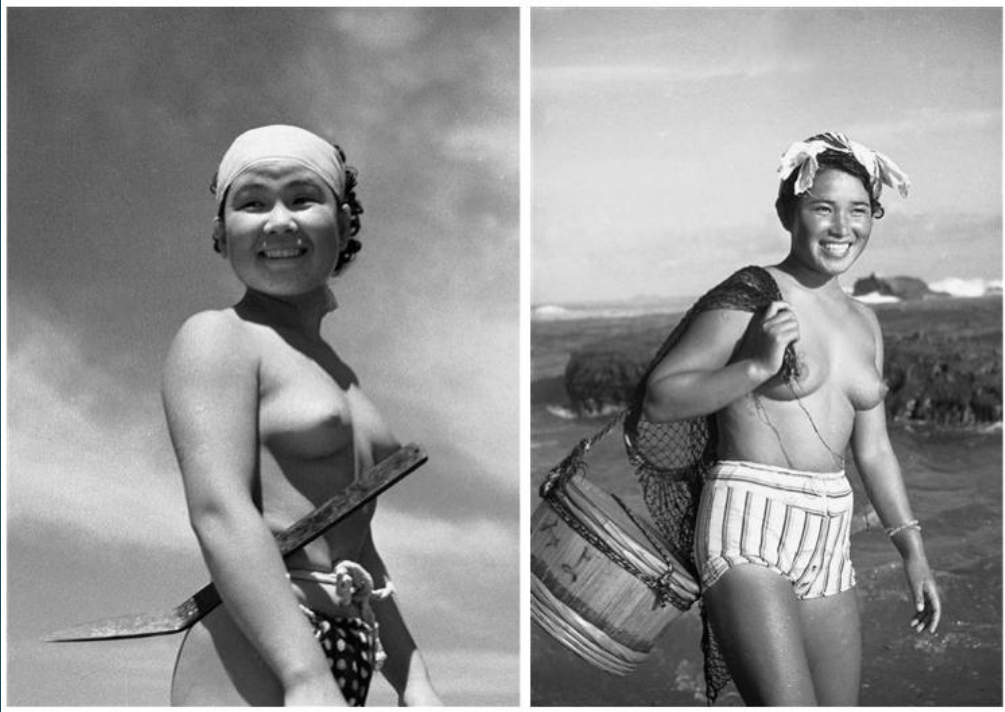
Fabrice Joulia,
C2VN (AMU, INRAE 1260, INSERM 1263), Université de Toulon
JAP2S (UFR STAPS TOULON)

Historique

- Preuves les plus anciennes entre 7 et 10 000 ans (mésolithique, tumulus constitués de tonnes de coquillages)
- 4500 Mésopotamie (Irak actuel), preuves de plongées en apnée (perles provenant d'huitres perlières vivant en profondeur)
- Iles Salomon preuves de plongée depuis des millénaires (lunettes en bois avec hublot en écaille de tortue)
- 500 ans avant JC premier exploit de plongeurs décrits par Hérodote . Scyllias de Scione et sa fille Cyana
- 415 avant JC Aristote décrit l'action des plongeurs grecs sciant les pieux anti-débarquements
- Héraclite appela les plongeurs en apnée homme-barque en grec « SKAPHE ANDROS » à l'origine du terme scaphandre pour la plongée en bouteille.
- Alexandre le Grand avait des régiments de nageurs plongeurs dès le 4^{ème} siècle avant JC (les urinatores) ancêtres des nageurs de combat et plongeurs démineurs

Historique de la plongée en apnée contemporaine

- Les Amas du Japon sont mentionnées dès 268 avant JC tout comme les Haenyo de Corée.



Historique de la plongée en apnée contemporaine



Nomades Bajau d'Indonésie



Moken de Birmanie



Urak Lawoi (Orang Laut) de Thaïlande

Les principales disciplines d'apnée

- L'apnée statique se pratique en piscine.
- L'apnée dynamique avec ou sans palme (en piscine distance)
- L'immersion libre
- Le poids constant
- Le poids variable
- L'apnée « no limit » est la pratique la plus décrite car elle est à l'origine de trois accidents dont deux ayant entraînés le décès. Les records mondiaux sont donc anciens puisque le masculin date de 2007 tandis que le féminin est encore plus ancien puisqu'il date de 2002





Disciplines	Sexe	Nom	Nationalité	Performance	Année du record
Poids constant	F	Alenka ARTNIK	Slovénie	122m	2021
Avec Mono palmes	M	Alexei Molchanov	Russie	131m	2021
Poids constant	F	Alessia ZECCHINI	Italie	74m	2021
Sans palme	M	William Trubridge	Nlle Zélande	102m	2017
Poids variable	F	Nanja VAN DEN BROEK	Pays bas	130m	2015
	M	Walid Boudhief	Tunisie	150m	2021
No Limit	F	Streeter	USA	160m	2002
	M	Nitsch	Autriche	214m	2007
Apnée Statique	F	Molchanova	Russie	9min02s	2013
	M	Mifsud	France	11min35s	2009

01/10/2022

Dynamique	F	Zecchini	Italie	250m	2016
Avec Mono palme	M	Mateusz Malina	Pologne	316m	2022
Dynamique	F	Julia Kozerka	Pologne	209m	2022
sans palme	M	Mateusz	Pologne	250m	2022
Poids constant	F	Alenka ARTNIK	Slovénie	106m	2021
Bi palmes	M	Arnaud Jerald	France	120m	2022
Immersion	F	Grasmeijer	Pays Bas	92m	2016
Libre	M	Trubridge	Nlle Zélande	124m	2016

01/10/2022

- Apneas are caused by the effect of thoracic plating against the bodywork or the steering wheel and by the driver's concentration in certain Race Phases (qualifying lap, start)
- These episodes are brief but repetitive, and represent up to 1/4 of the total time of the race increasing the hypoventilation.



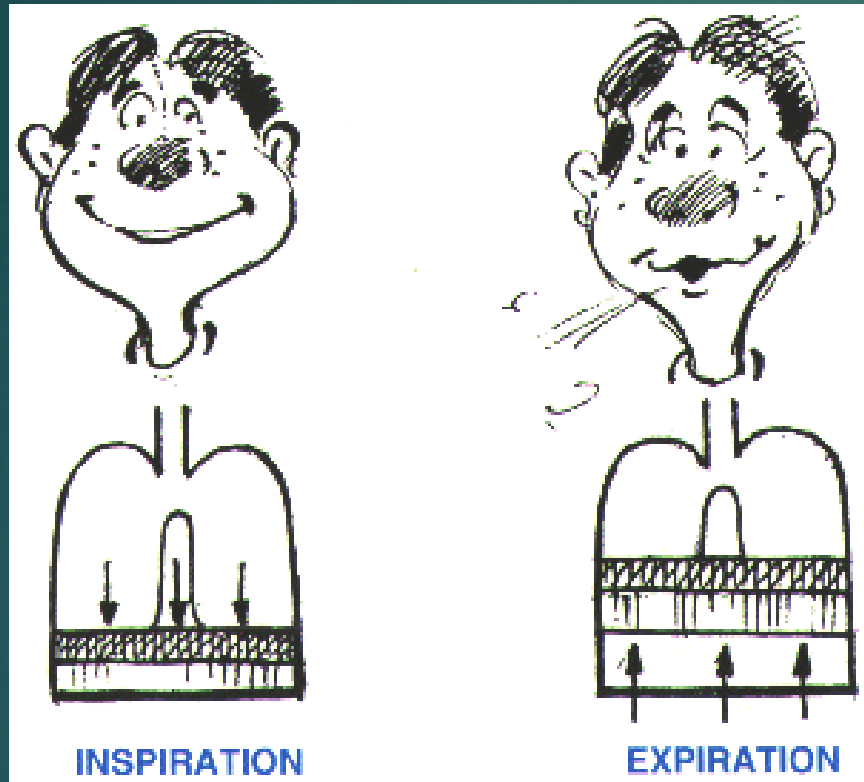
Breath-hold



Stop breathing

Cellular respiration

breathing



Cellular respiration



factors determining the duration of apnea

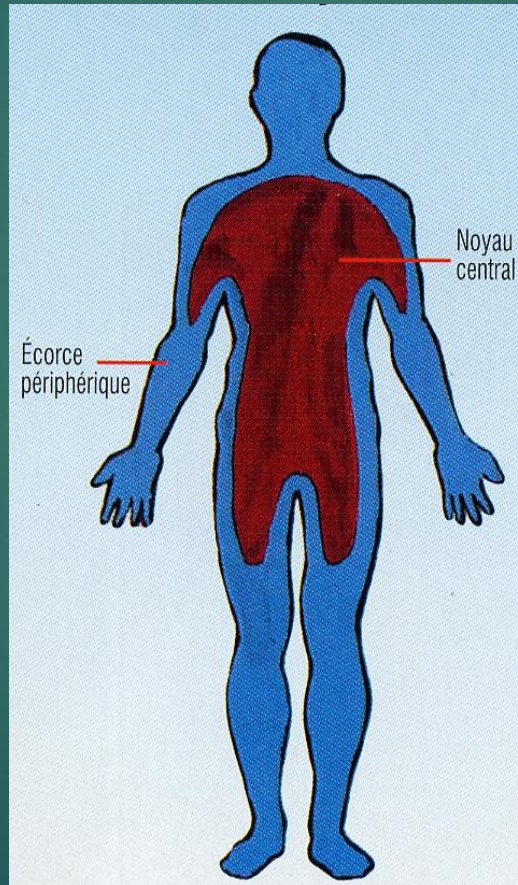
- O₂ reserves
 - Lungs
 - Blood (hemoglobin)
 - Cells (myoglobin, cytoglobin...)
 - Spleen
- O₂ uptake
- CO₂ production
- Chemo-sensitivity
- buffer system efficacy

- Lack of rib cage movement
- Ability to deal with unpleasant feelings
- Intensity of physical activity
- Environmental conditions (pressure, temperature,....)
- Training
- Genetic

Core and peel

core

- brain eyes, ears)
- thoracic and abdominal organs
- 8 % body weight



peel

- skin
- Adipose tissue
- Skeletal muscles
- Buffer zone between the core and the environment

The diving reflex

- The diving reflex is a protective, multifaceted physiologic reaction that occurs in mammals including humans in response to water submersion. Aspects of the dive reflex were first described in 1786 by Edmund Goodwyn
- Edmund Goodwyn, a British physician who studied medicine at the University of Edinburgh, had described this reflex in his doctoral thesis, which was originally published in Latin in 1786 and in English in 1788.
- It would take until an 1870 publication by Paul Bert for the physiologic adaptations to be recognized.
- The diving response exists in all mammals including humans, and it helps in the preservation of oxygen stores for key organ systems during times of asphyxia.

- Fabrice Jefferia, C2VN (AMU, INRAE1260, INSEE1263),
Université de Toulon

Diving reflex

- Its main mechanisms involve peripheral receptors, neuronal pathways, and chemoreceptors. Once a mammal holds its breath and submerges under water two things occur: the face gets wet and the oxygen content in the lungs becomes fixed.
- When mammals dive under water, sensory information from the nasal region is relayed to the brainstem, making up the afferent tract of the diving reflex neural pathway. (McCulloch PF. Animal models for investigating the central control of the Mammalian diving response. Front Physiol. 2012;3:169)
- Specifically, the afferent neuronal pathway involved is the trigeminal nerve relaying sensory information back to the brainstem. The brainstem then sends efferent signals via the vagus nerve to specific target organs. The vagus nerve primarily associates with the parasympathetic nervous system, and the result of this neuronal pathway is **bradycardia**. The brainstem also sends out efferent signals to the peripheral vascular musculature which **increases peripheral vascular resistance** and results **in blood shunting toward more vital organs**.

Facteurs déterminants

- ▶ Réserves en O_2
 - ▶ Dans les poumons (Oxygène de l'air contenu dans la cage thoracique)
 - ▶ Dans le sang et les muscles (Myoglobine, hémoglobine et rate)
- ▶ Consommation O_2 et production de CO_2
- ▶ Seuils de tolérance à l'hypoxie et l'hypercapnie

Facteurs déterminants

- ▶ Présence ou absence de mouvements de la cage thoracique
- ▶ Volonté (capacité de lutte)
- ▶ Intensité de l'effort
- ▶ Conditions environnementales (température, profondeur....)
- ▶ Entraînement

The diving reflex

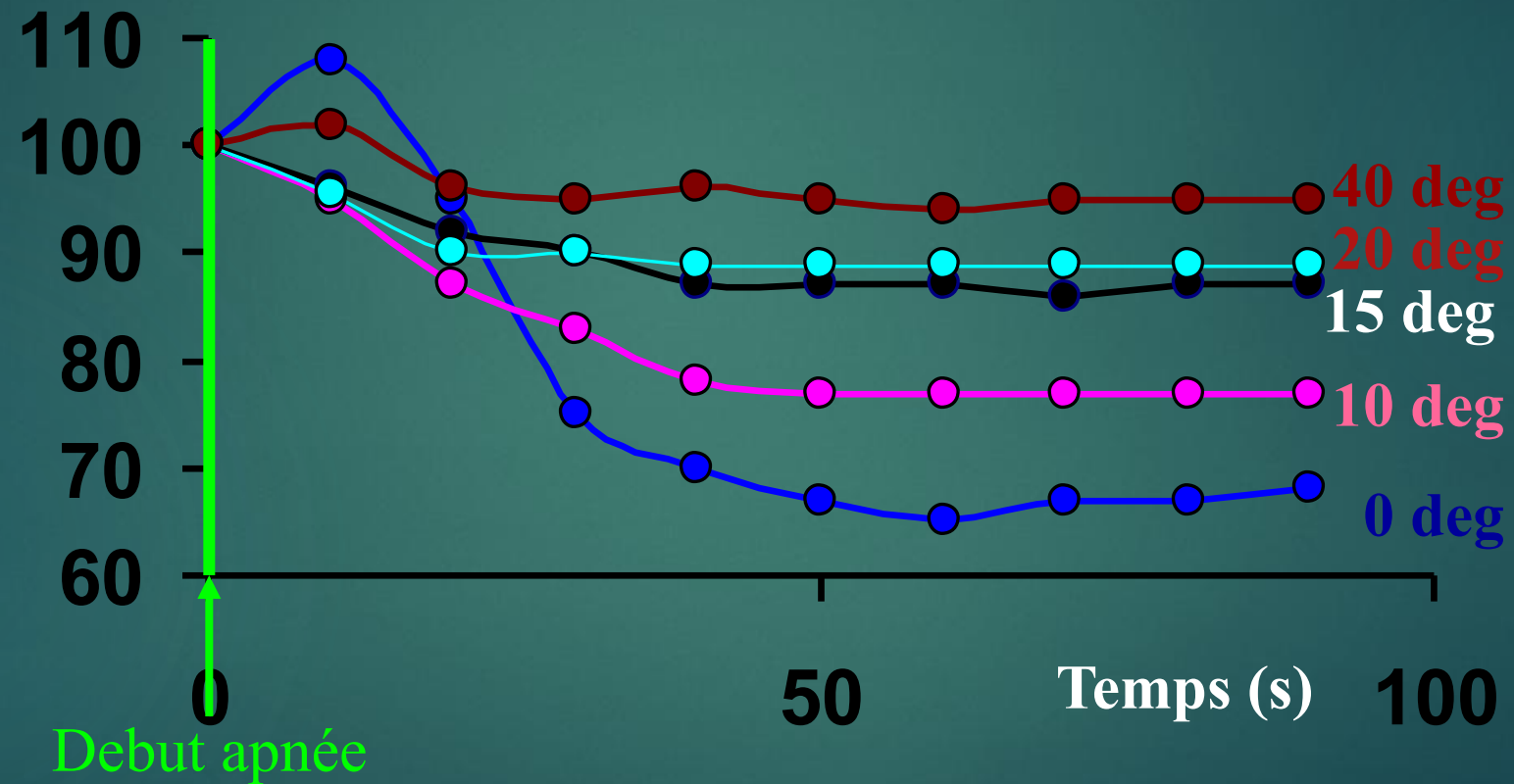
- ▶ Il s'agit principalement d'ajustements cardio-vasculaires.
- ▶ Ces mécanismes apparaissent hors de l'eau mais sont accentués avec l'immersion.
- ▶ Buts: protection du cœur et du cerveau même si cette protection se fait au détriment d'autres organes ou tissus.

The diving reflex

- ▶ Bradycardie (baisse de la fréquence cardiaque)
- ▶ Vasoconstriction périphérique (diminution de la circulation dans les muscles, la peau?...)
- ▶ Augmentation de la circulation cérébrale et de la perfusion coronaire
- ▶ Splénocontraction (contraction de la rate)
 - ▶ Augmentation du nombre de globules rouges circulants

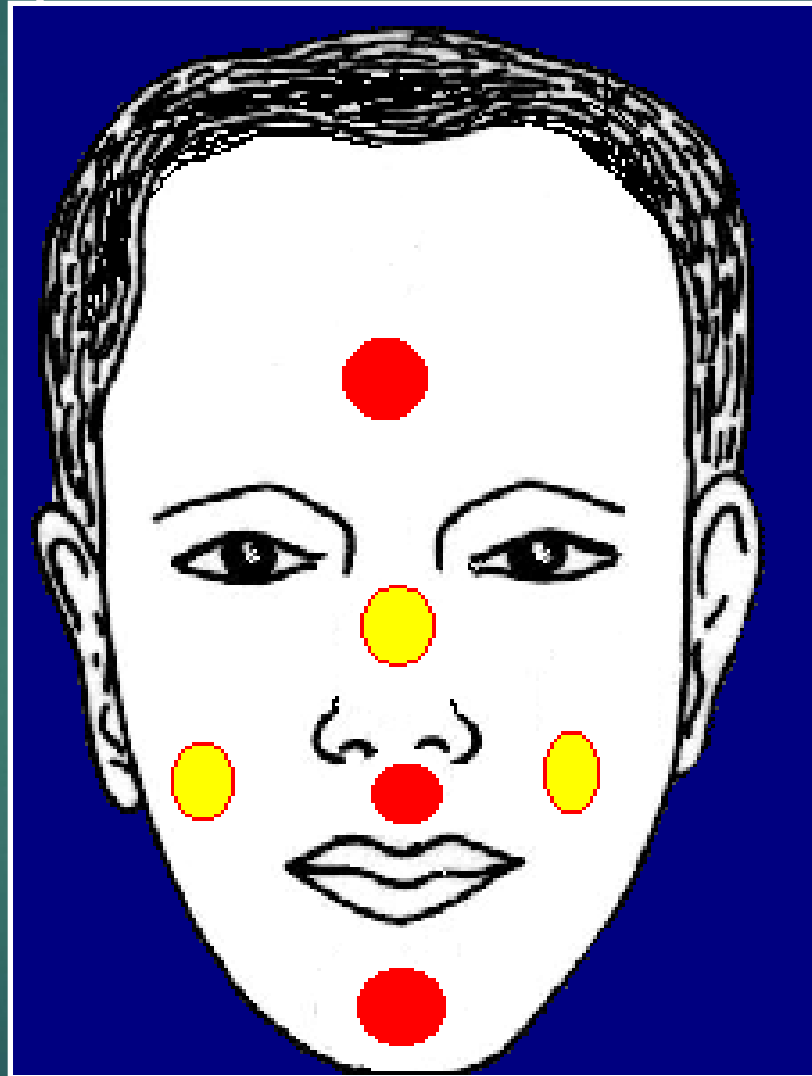
Fréquence Cardiaque

Var FC en %

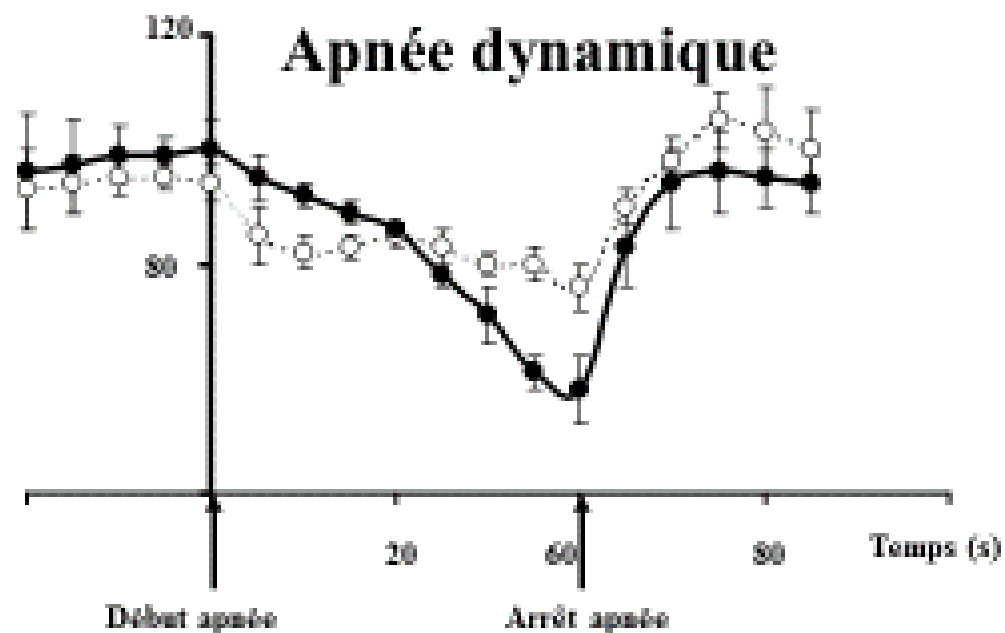
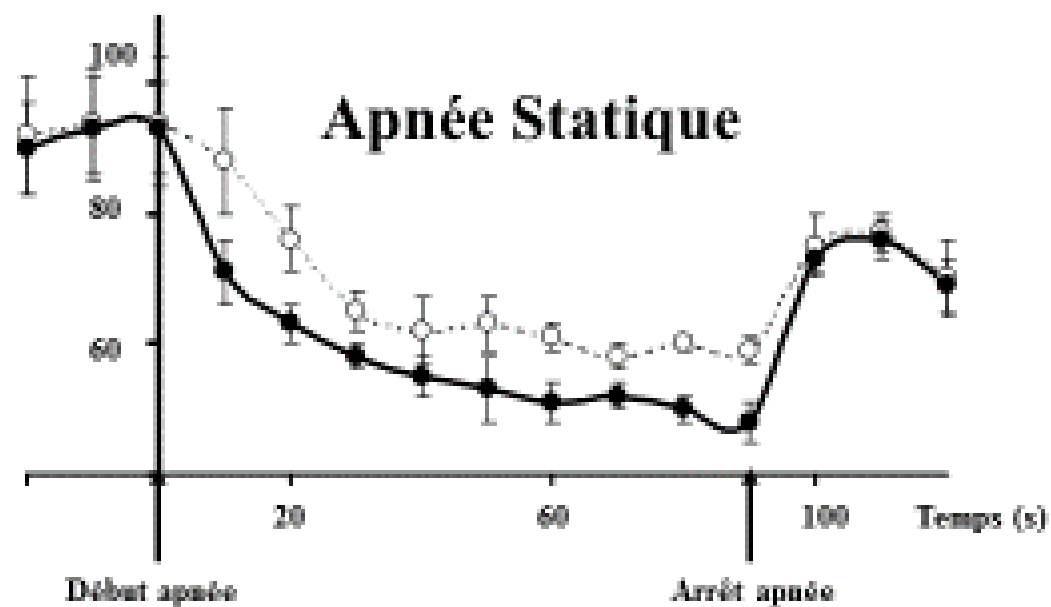


Thermorécepteurs

Nerfs Trijumeaux



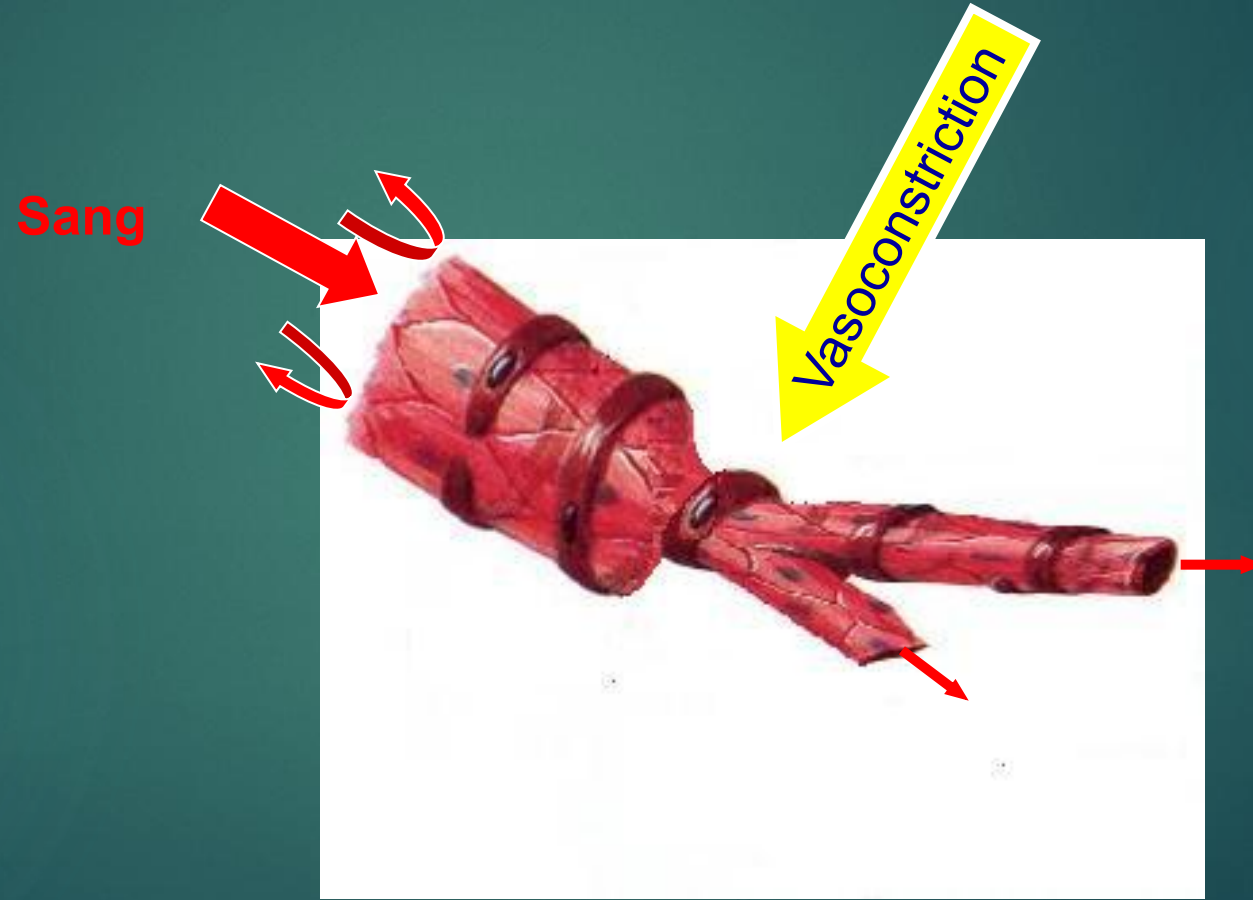
Fréquence Cardiaque (bpm)



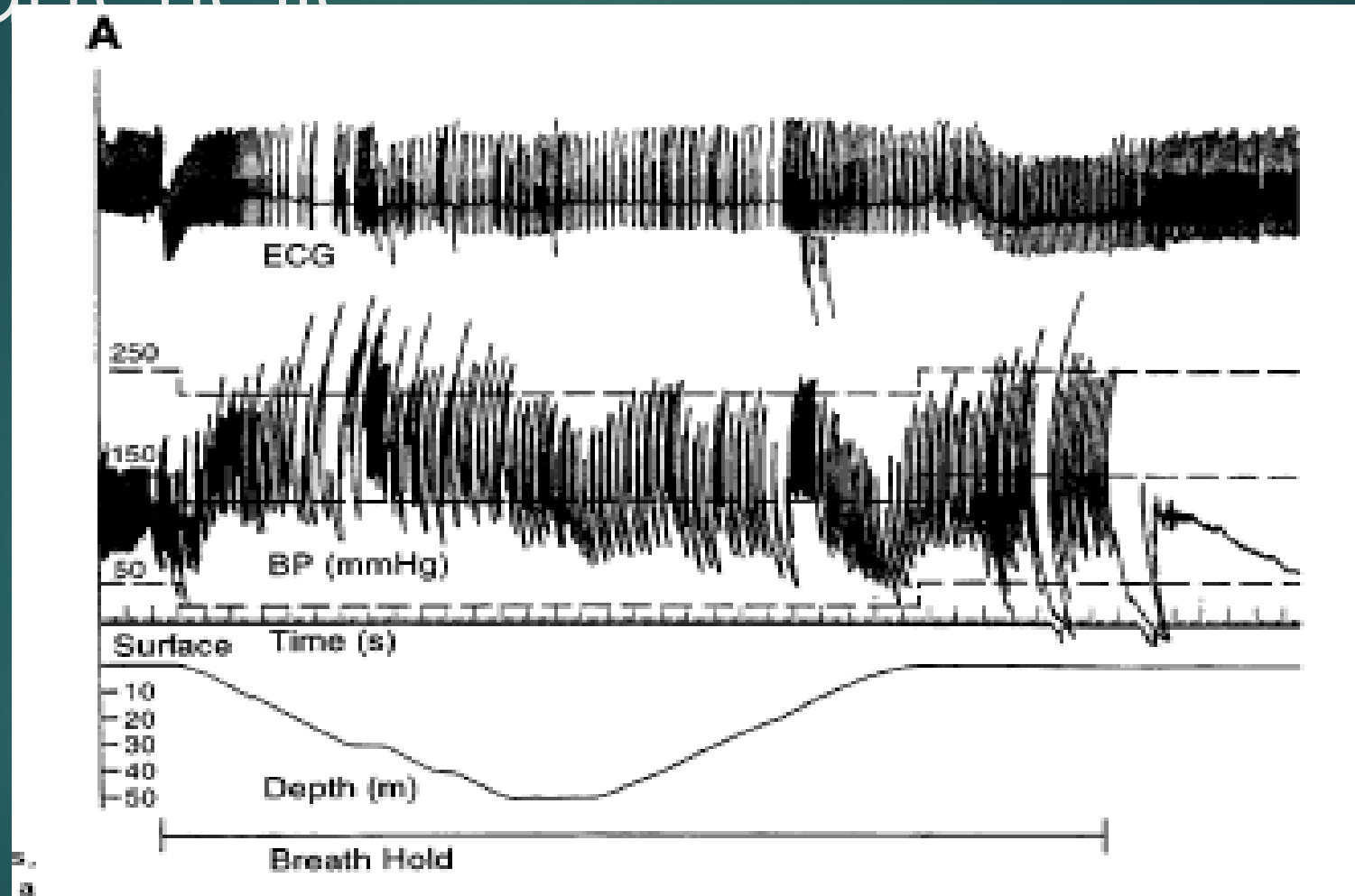
Vasoconstriction périphérique



Vasoconstriction périphérique



Variations de la pression artérielle



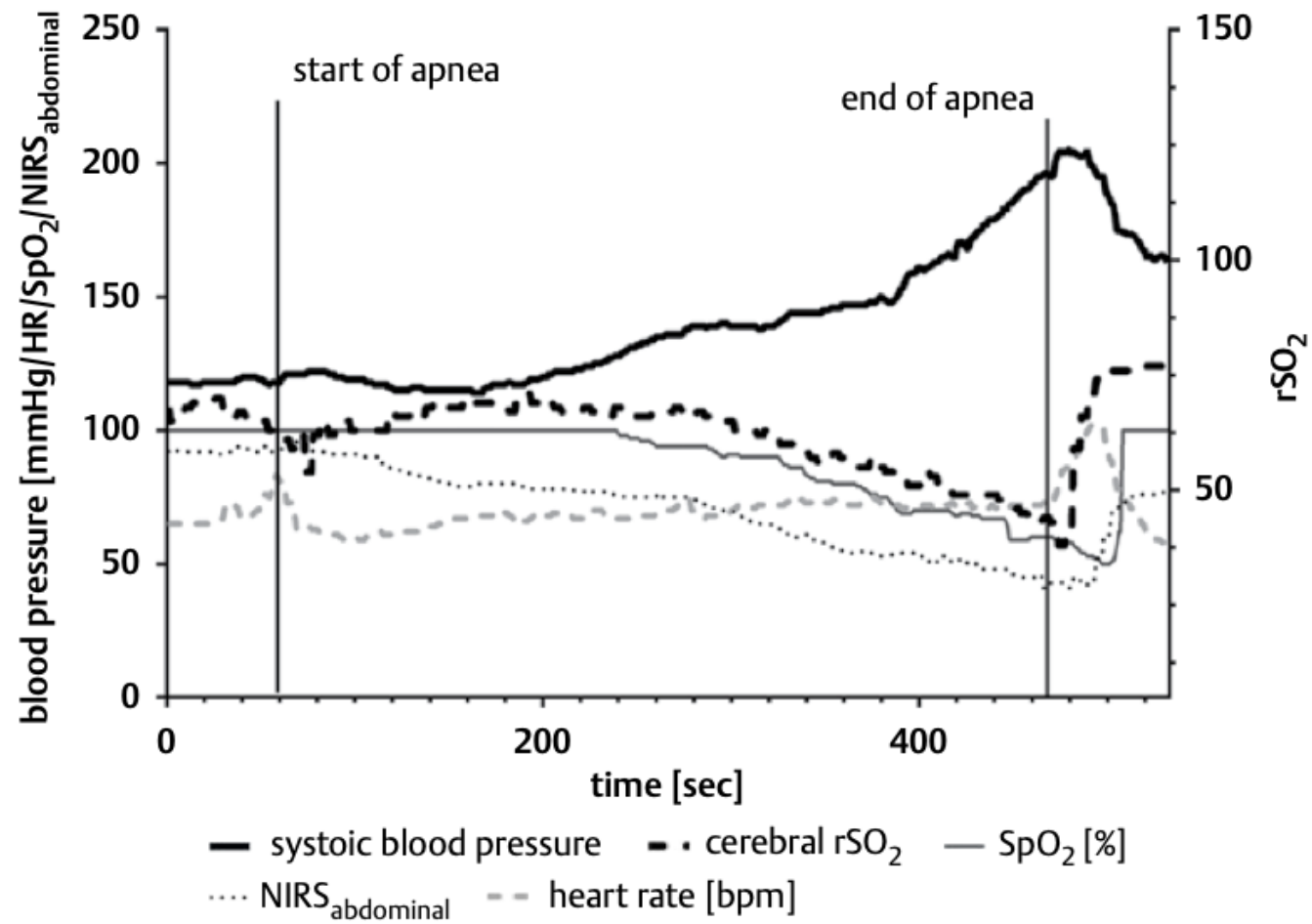
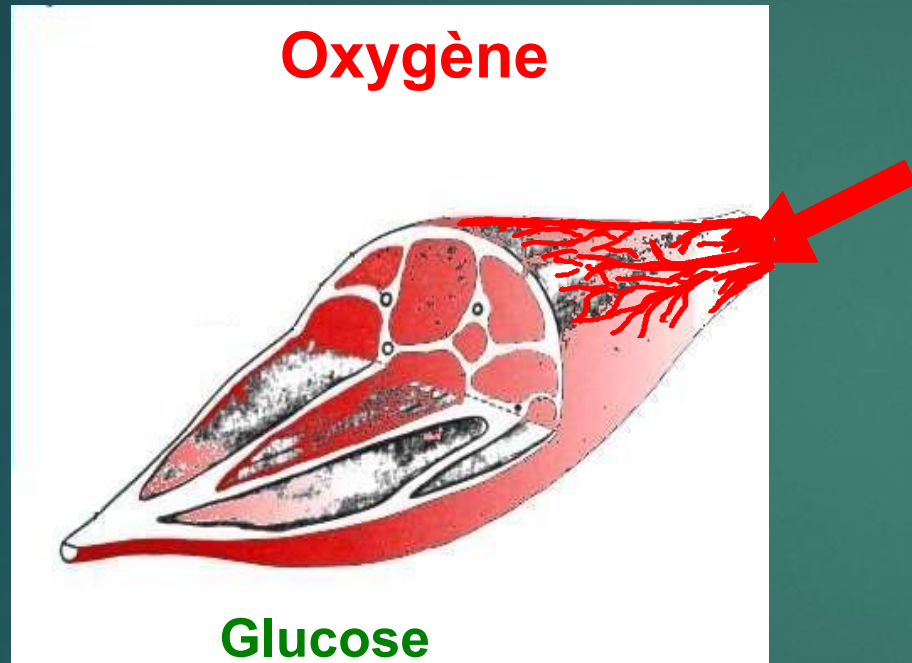


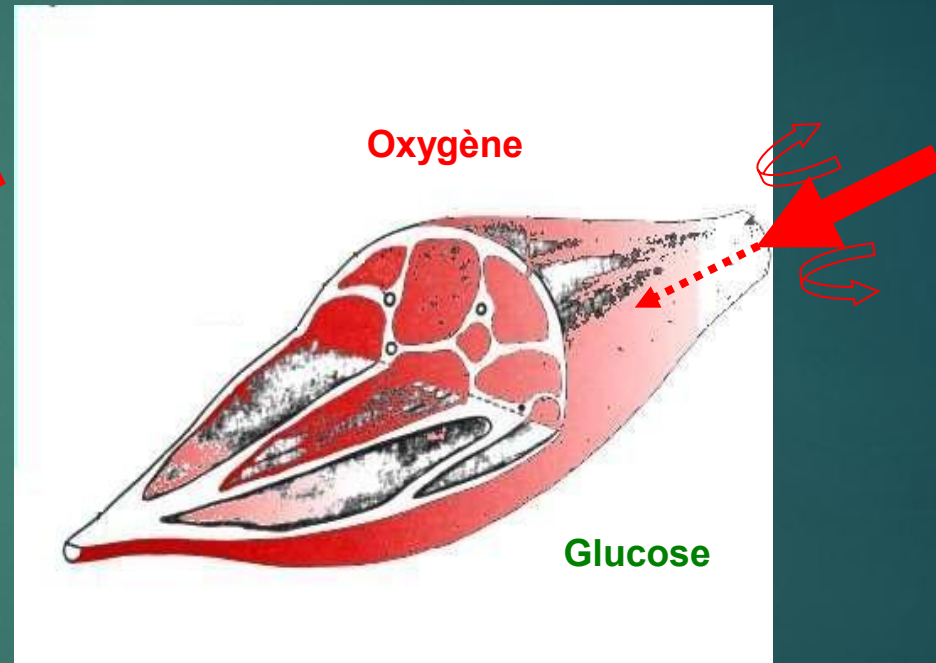
Fig. 1 Raw data of one subject. Total apnea time was 411 s. Subject exhibited an earlier decrease in NIRS_{abdominal} and SpO₂ than in cerebral rSO₂. This subject desaturated steadily (defined as fall > 2 % of baseline-level) in SpO₂ after 181 s and in rSO₂ after 240 s. Desaturation of NIRS_{abdominal} started after 21 s. Re-saturation was observed in NIRS_{abdominal} after 19 s, in rSO₂ after 5 s and in SpO₂ after 29 s.

Perfusion musculaire

Exercice



Exercice + Apnée

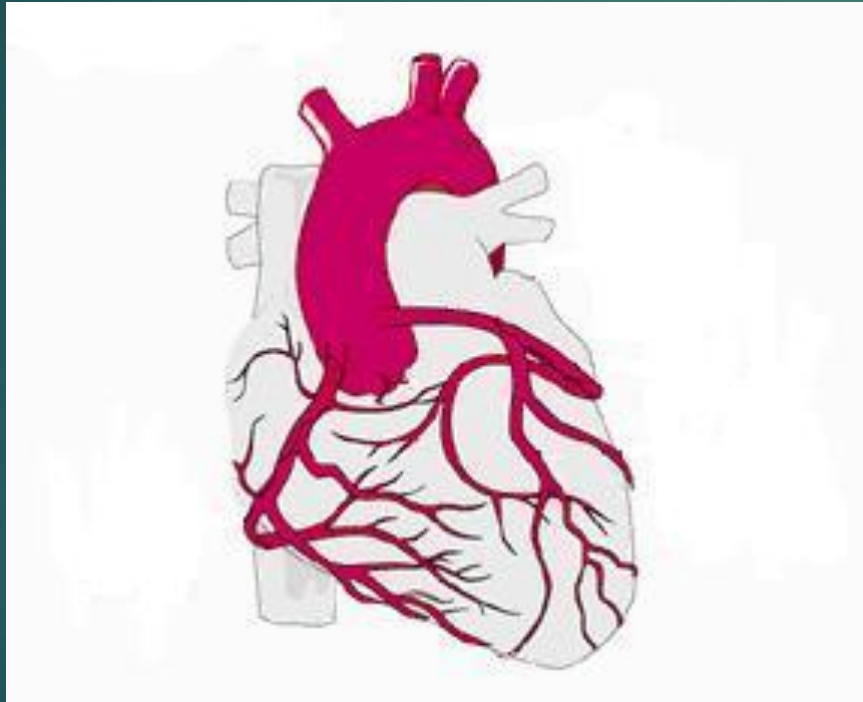


Lactates

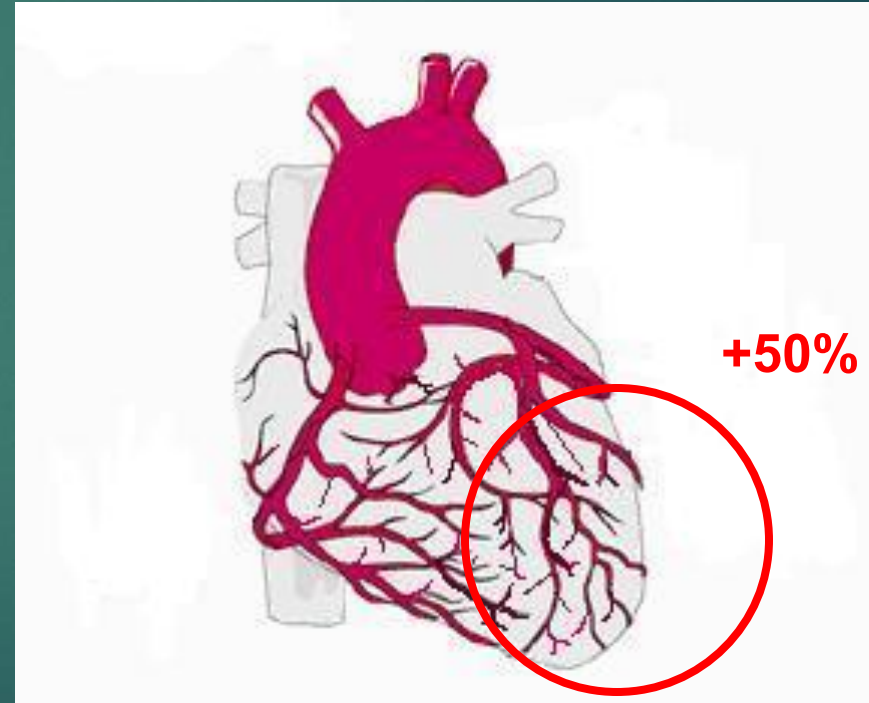


Circulation coronarienne

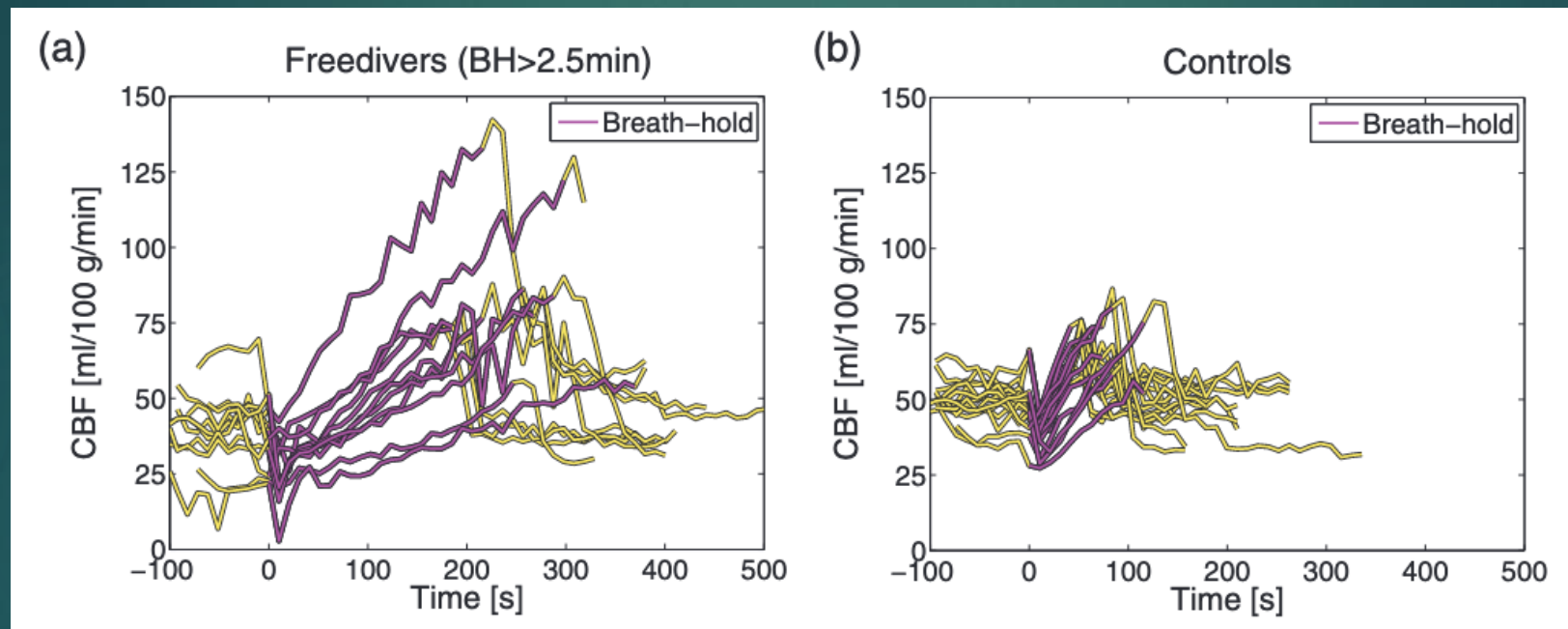
REPOS



APNEE

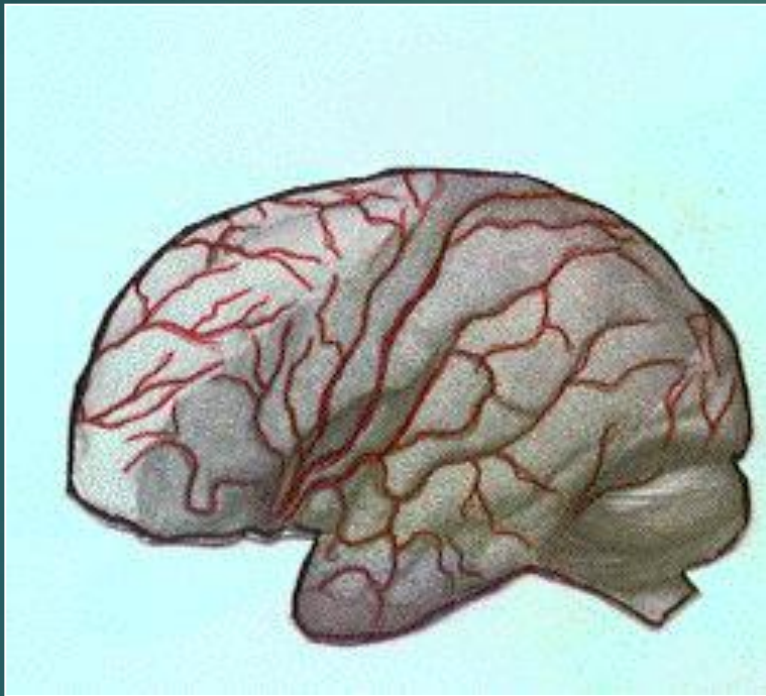


CBF during apnea



Circulation cérébrale

Apnée Statique de 2 minutes



Avant apnée



+20%

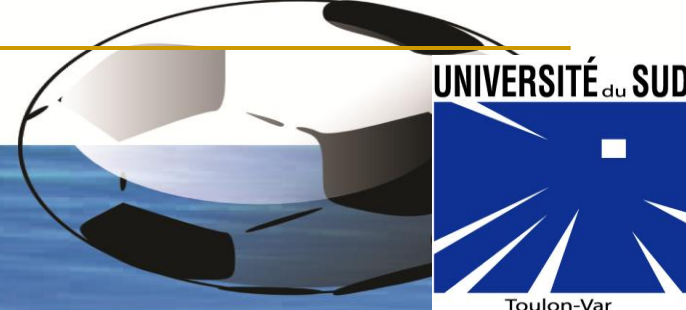
Pendant apnée

Effets de la Pression



Surface

1 bar



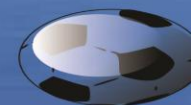
-10 m

2 bars



-20 m

3 bars

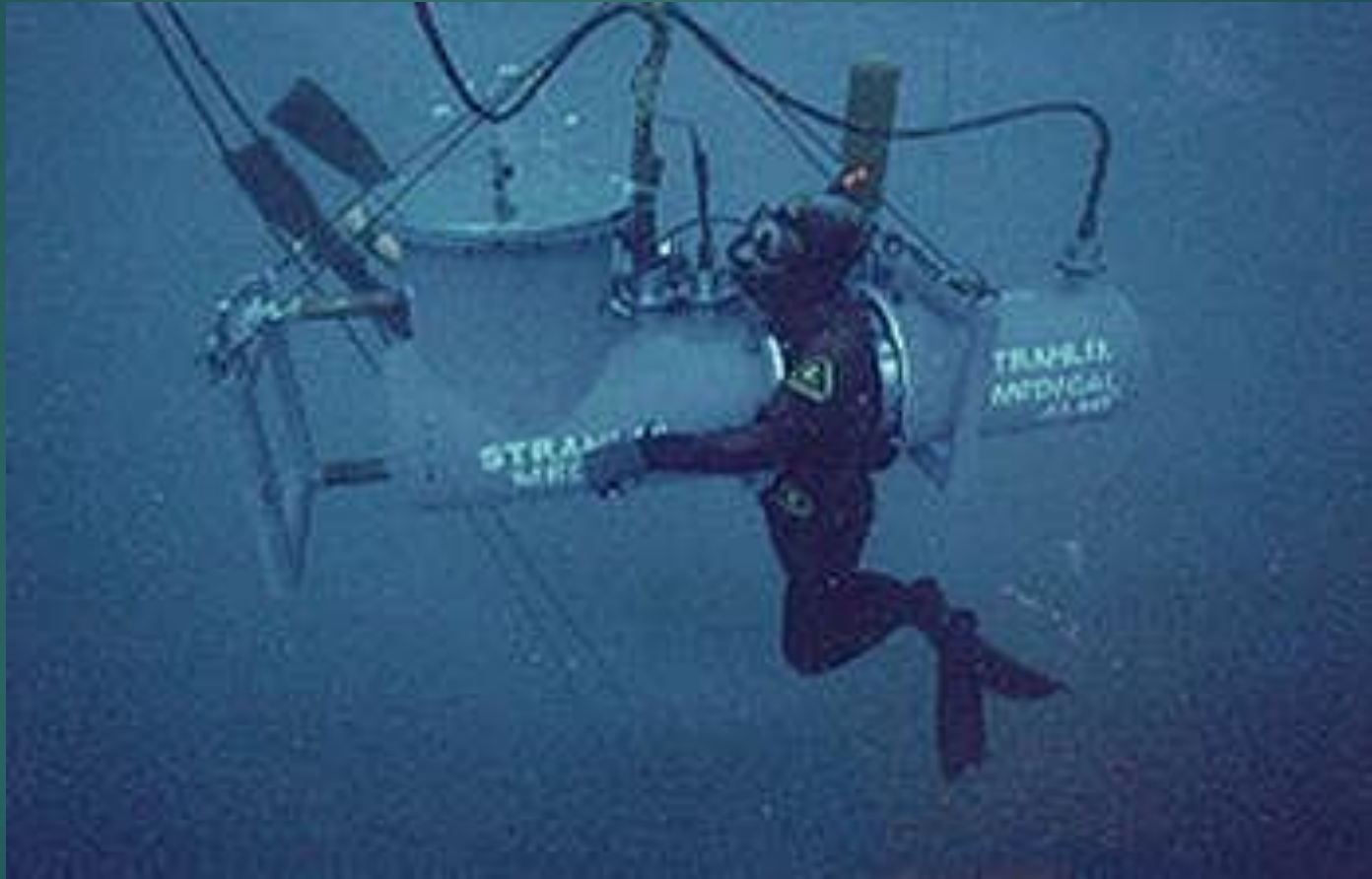


-30 m

4 bars

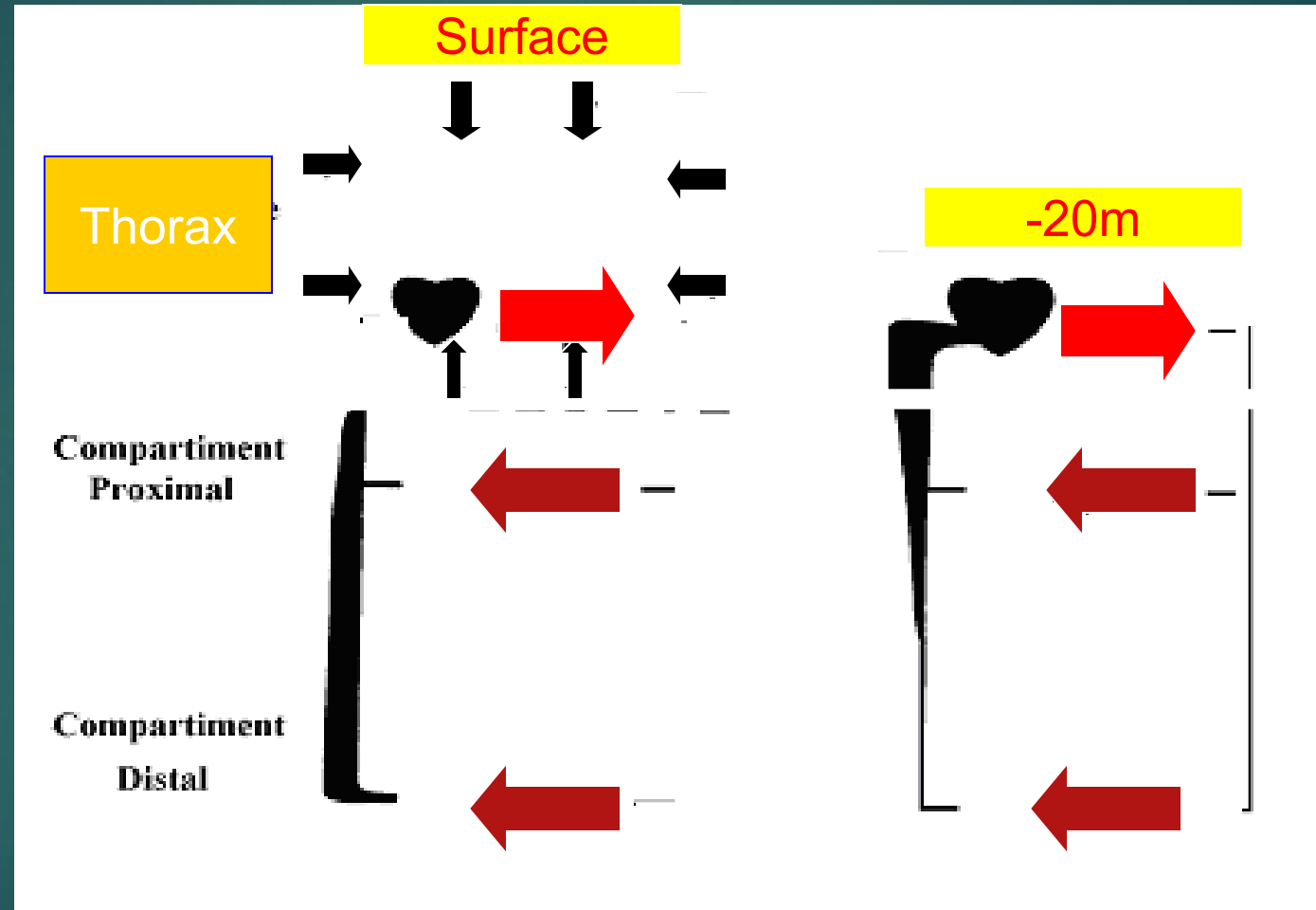


blood shift



Hypoxie M1
santé 2018

blood shift



(Liner, 1994)

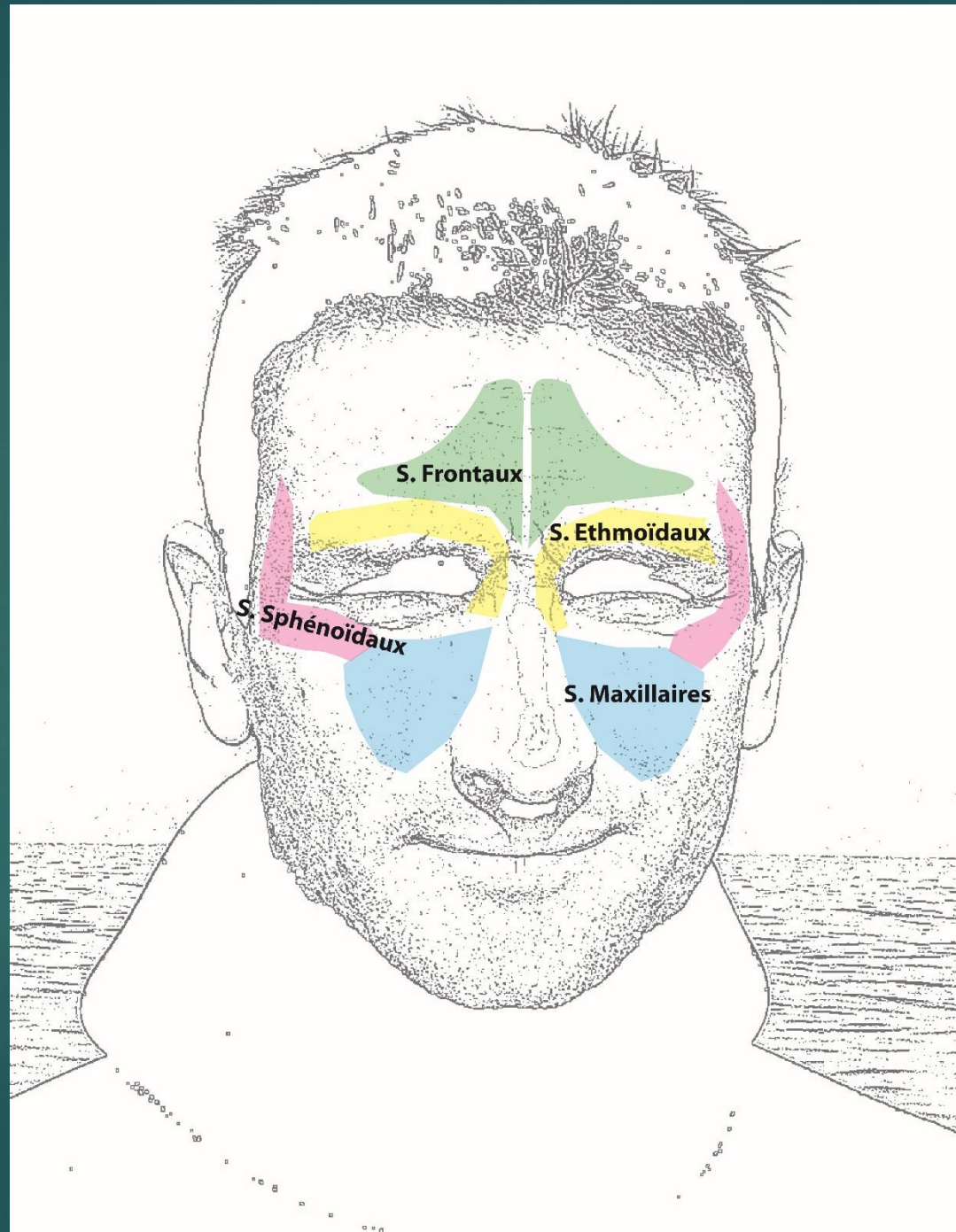


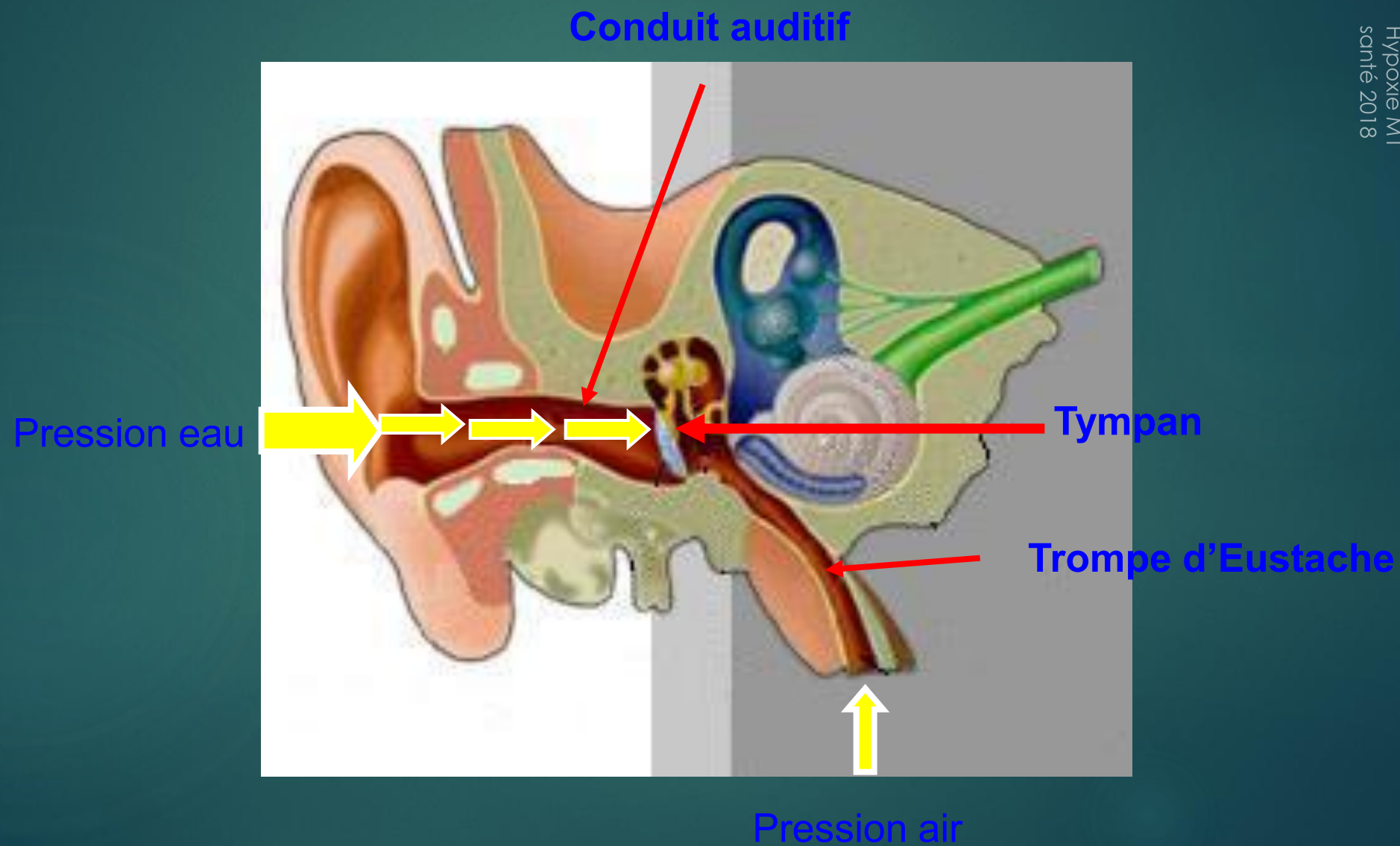
Fabrice Joulia, C2VN (AMU, INRAE 1260, INSERM 1263),
Université de Toulon

Fabrice Joulia, C2VN (AMU, INRAE 1260, INSERM 1263),
Université de Toulon



Sinus





Sea mammals

- The diving physiology of aquatic animals at sea began 50 years ago with studies of the Weddell seal. Even today with the advancements in marine recording and tracking technology, only a few species are suitable for investigation. The first experiments were in McMurdo Sound, Antarctica.
- Some dives were longer than an hour and as deep as 600 m

Antarctic Weddell seals (Zapol, Sci Am 1987;256:100)



Hypoxie M1
santé 2018

Performances

Nom commun	Profondeur (m)	Temps apnée (minutes)
Phoque de Wedell	600	73
Baleine bleue	355	20
Cachalot	2250	90
Dauphin commun	215	60
Homme	200	3'30

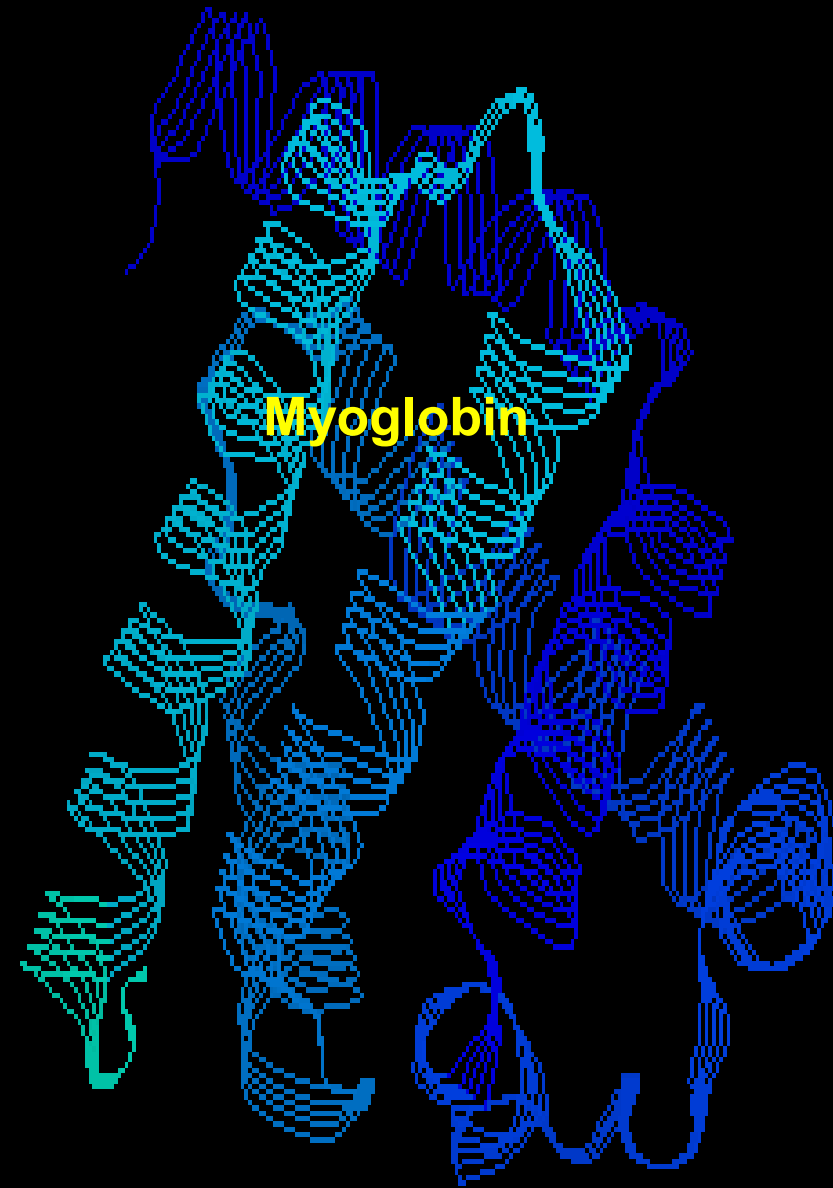
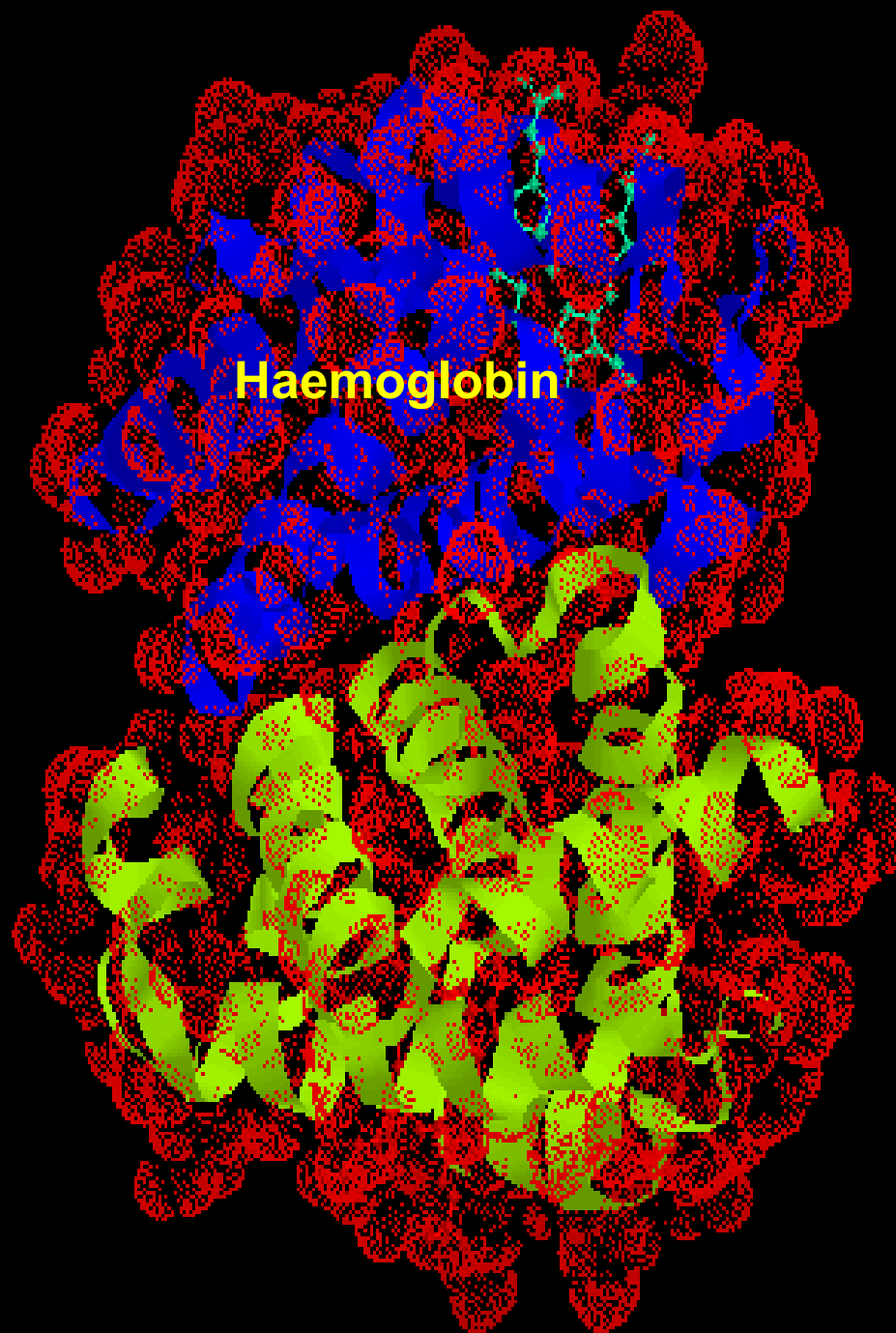
Capacités et volumes pulmonaires

Hypoxie M1
santé 2018

	Dauphin	Homme
CPT	10 l	6l
VR	0,5l	1,5l
CV	9,5l	4,5l
VT	9l	0,5
Coeff de ventilation	90%	18%

Oxygen storage

Fabrice Joulié, C2VN (AMU, INRAE 1260, INSERM 1263),
Université de Toulon

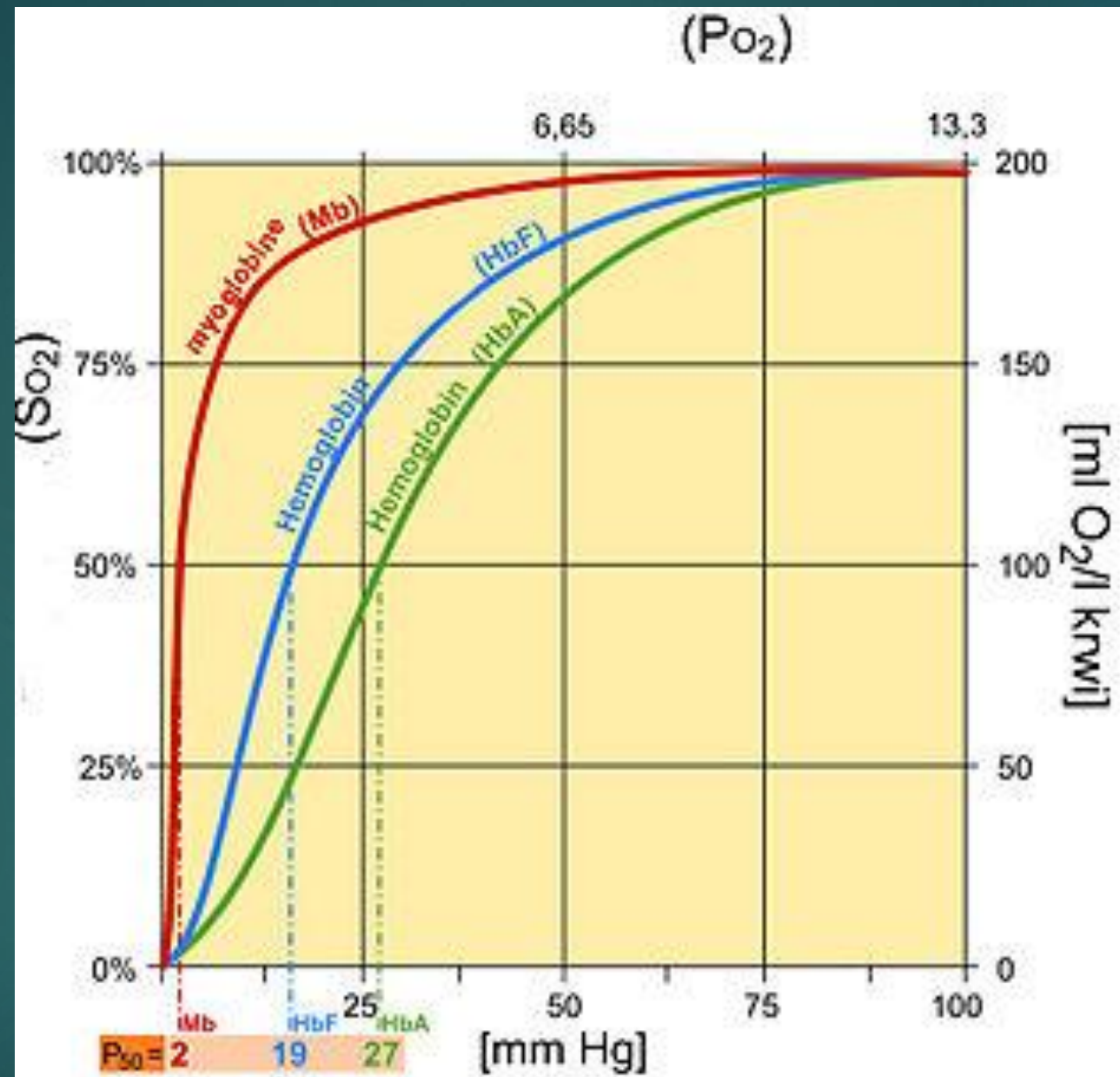


Oxygen transport and storage

- Hemoglobin and myoglobin are widely responsible for oxygen transport and storage
- The ability of diving mammals to obtain enough oxygen to support extended dives and foraging is largely dependent on muscle myoglobin (Mb) content

L'hémoglobine est une métalloprotéine contenant du fer, présente essentiellement dans le sang des vertébrés au sein de leurs globules rouges. Elle a pour fonction de transporter l'oxygène O_2 depuis les poumons vers le reste de l'organisme. Elle libère l'oxygène dans les tissus afin d'y permettre la respiration cellulaire aérobie, laquelle, à travers le métabolisme, fournit l'ATP des processus biologiques essentiels à la vie

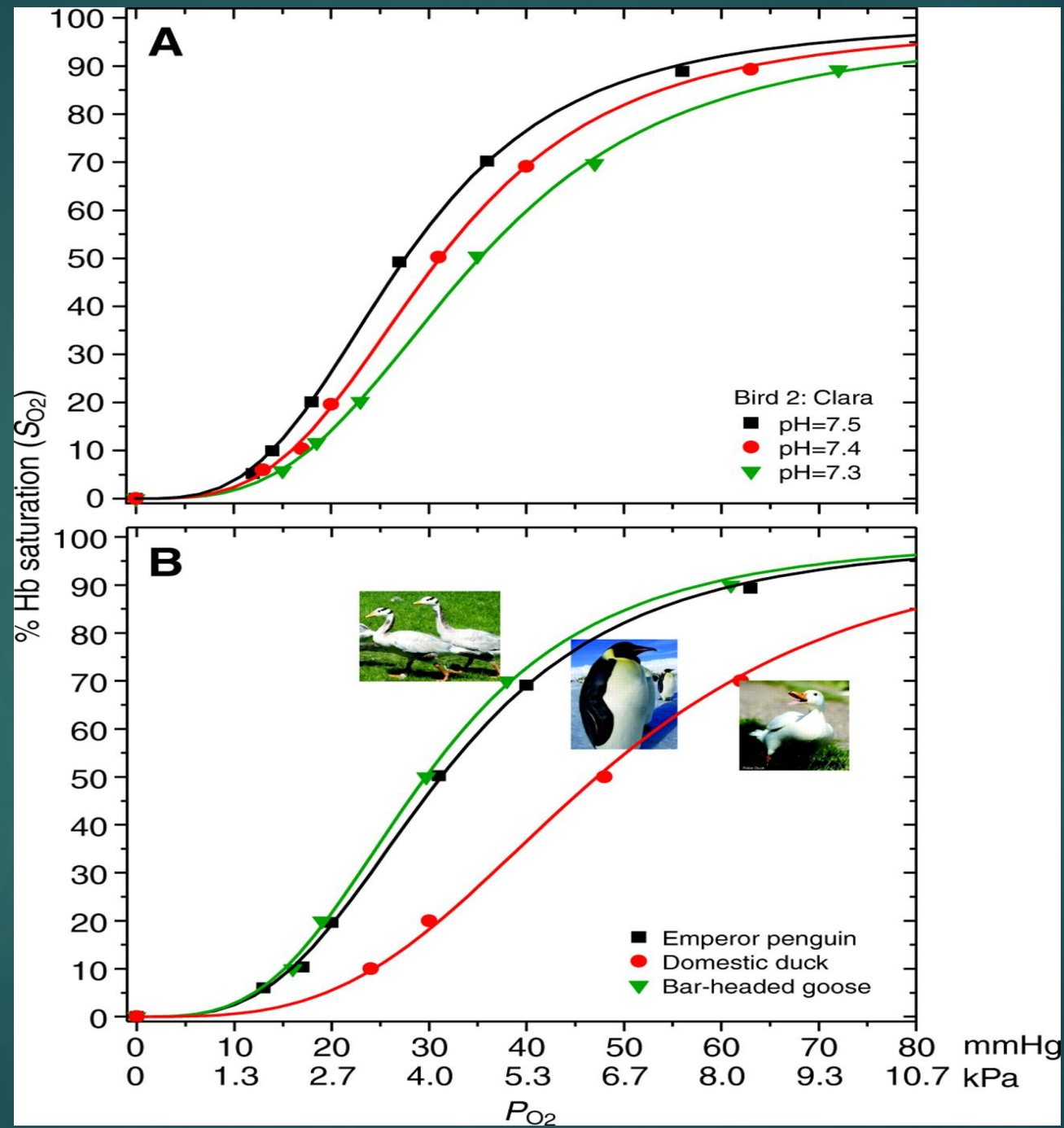
Toute l'hémoglobine n'est pas concentrée dans les globules rouges. On en trouve ainsi par exemple dans des neurones dopaminergiques dans les macrophages, dans les cellules alvéolaires et au niveau des reins. Dans ces tissus, l'hémoglobine joue un rôle d'antioxydant et de régulateur du métabolisme du fer



Plusieurs facteurs augmentent la $p50$ et font donc glisser cette courbe vers la droite :

- une baisse du pH, qui devient acide : c'est l'effet Bohr ;
- une augmentation du taux de dioxyde de carbone CO_2 : c'est l'effet Haldane ;
- une augmentation du taux de 2,3-bisphosphoglycérate (2,3-BPG) (plus élevé chez les Mm marins)
- une élévation de la température, avec cependant un effet relativement faible.

Ces effets sont réversibles, et l'inversion du sens de variation de ces facteurs fait glisser la courbe vers la gauche.



	Ht (%)	Hb (g/100ml)	Blood volume(ml/ kg)
Phoque de Weddell	60	20	160
Otarie	45	16	120
Dauphin	45	15	71
Homme	45	15	70

Arenicola marina vs Human Hb

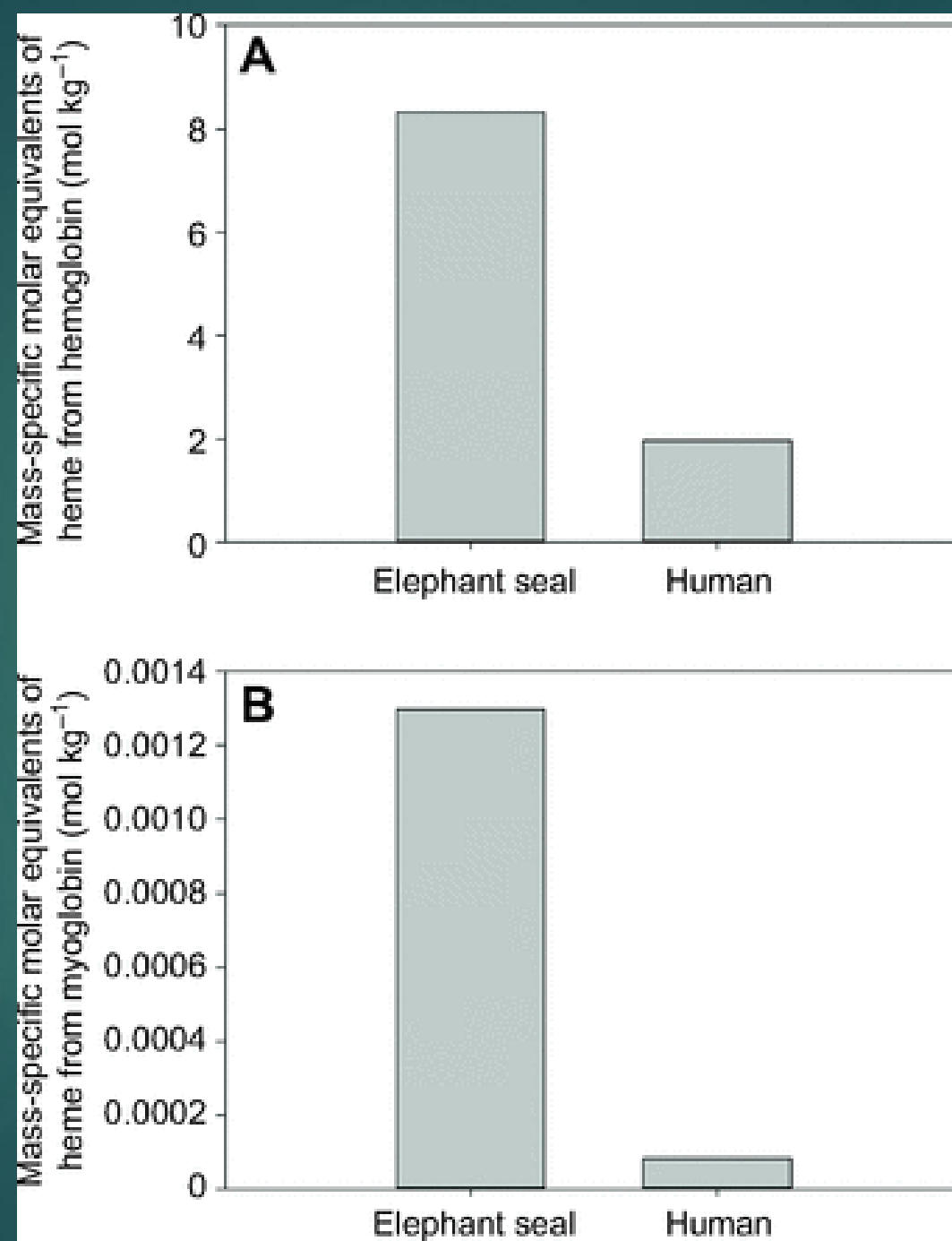
Arenicola marina	Homme
156 globin	4 globin
No co-factors	Effects of pH, T°, 2,3 PG
molecule capable of storing 40 times more oxygen than human hemoglobin	
molecule 250 times smaller than human hemoglobin	

Myoglobin

- High myoglobin net surface charge in mammalian divers increases intermolecular electrostatic repulsion, permitting higher muscle oxygen storage capacities

Myoglobin

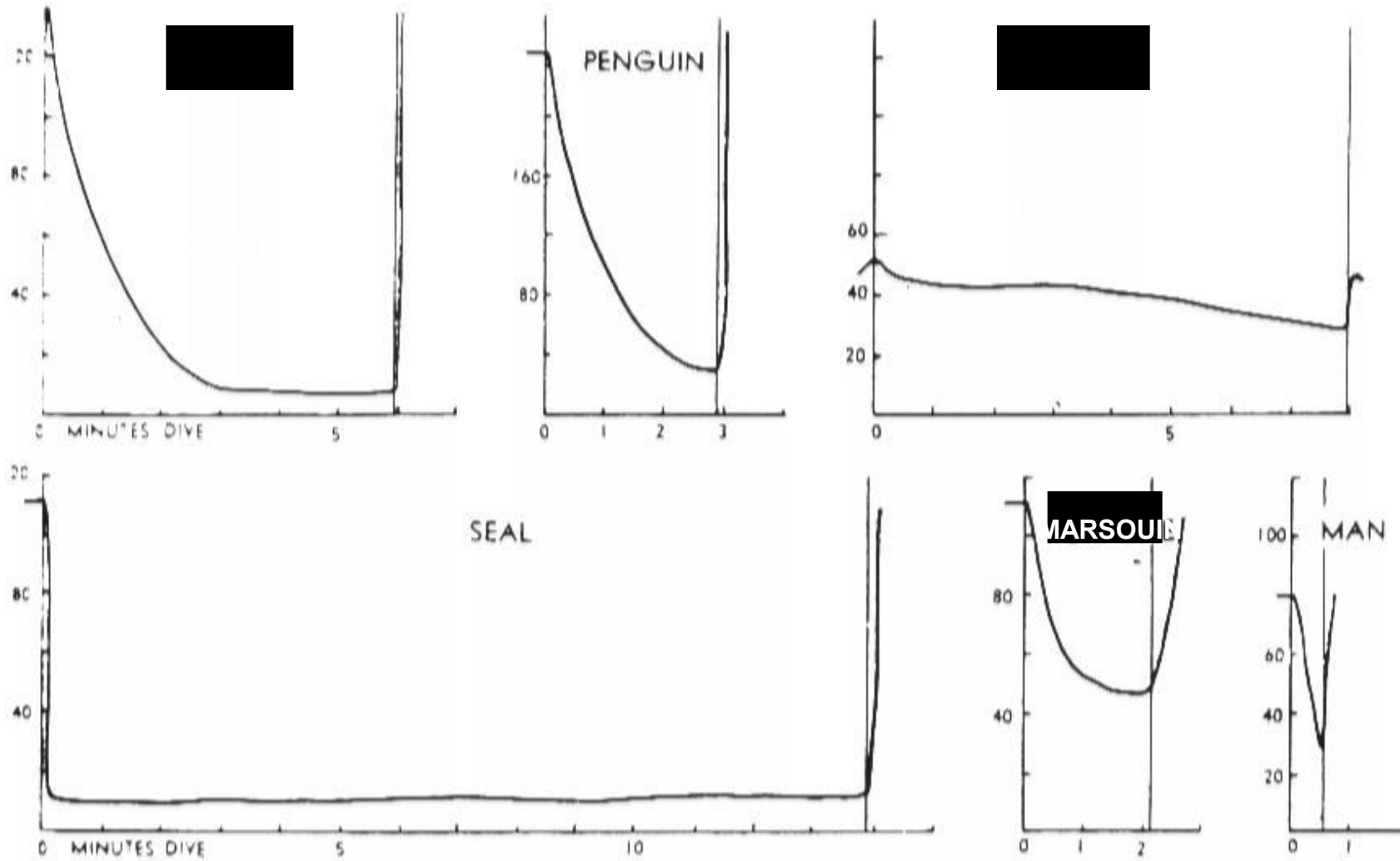
	Myoglobin (g/100g de muscle)
Phoque de Weddell	4,5
Otarie	3,2
Dauphin	3,3
Homme	0,5



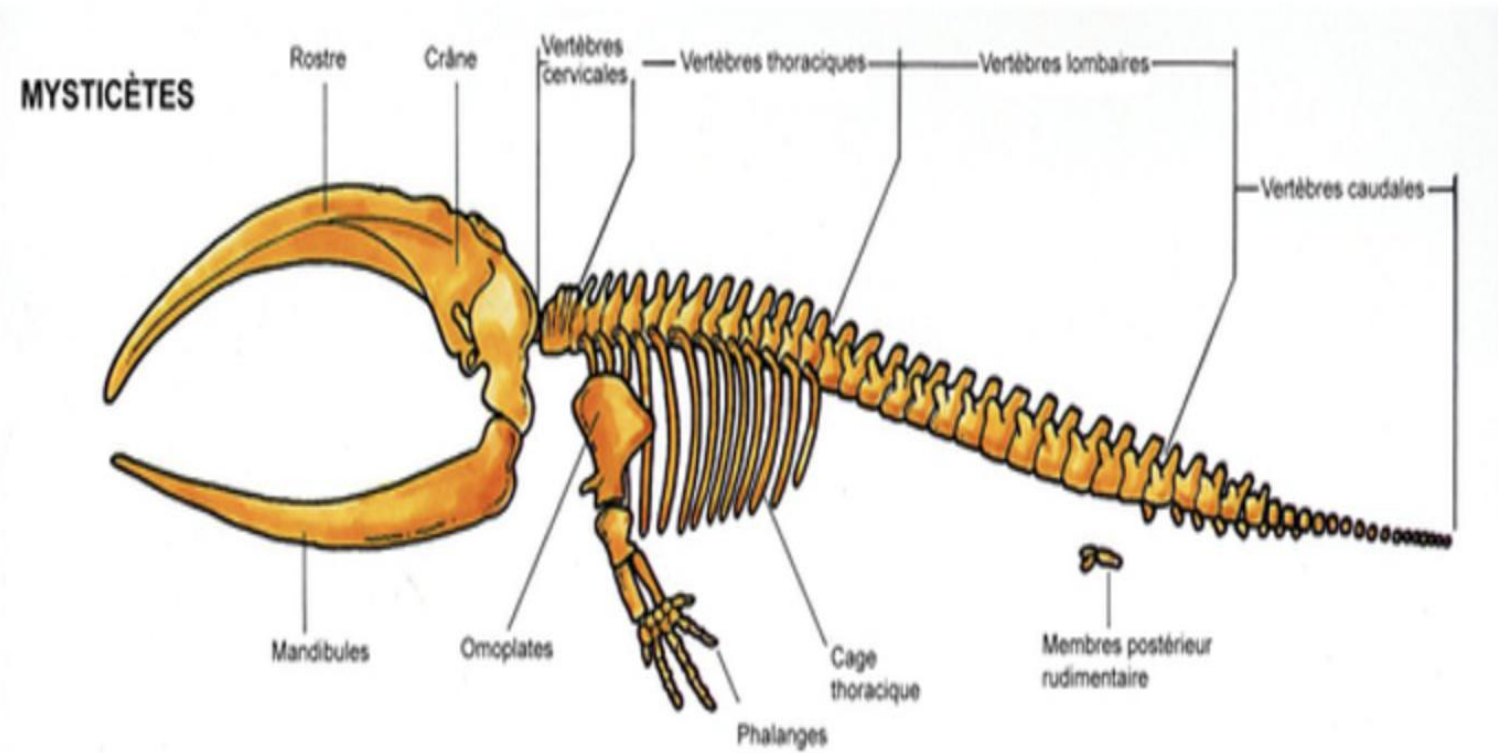
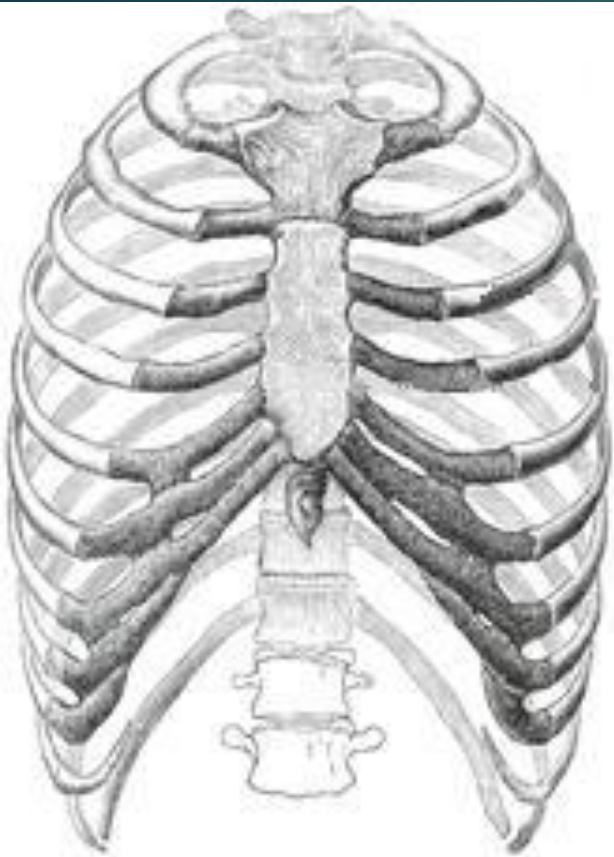
Heart rate

	FC surface (bpm)	FC immersion (bpm)
Phoque gris	120	10
Otarie	95	20
Dauphin	90	20
Homme	70	45

Heart rate



Rib cage



Comparaison Homme vs Mammifères marins

- Cage thoracique peu déformable : peu de cotes flottantes
- Poumons non compressibles
- 2 ou 3 paires de cotes seulement rattachées au sternum
- Voies aériennes renforcées (anneaux cartilagineux jusqu'aux bronchioles empêchant les collapsus)
- Réseaux admirables
- Double extraction alvéolaire de l'oxygène (10% Oxygène extrait)
- Poumons compressibles par la présence de sphincters alvéolaires (pas de collapsus)
- Effet Bohr plus important
- Taux de myoglobine jusqu'à 10 fois supérieur
- Sang = 10% du poids du corps

training



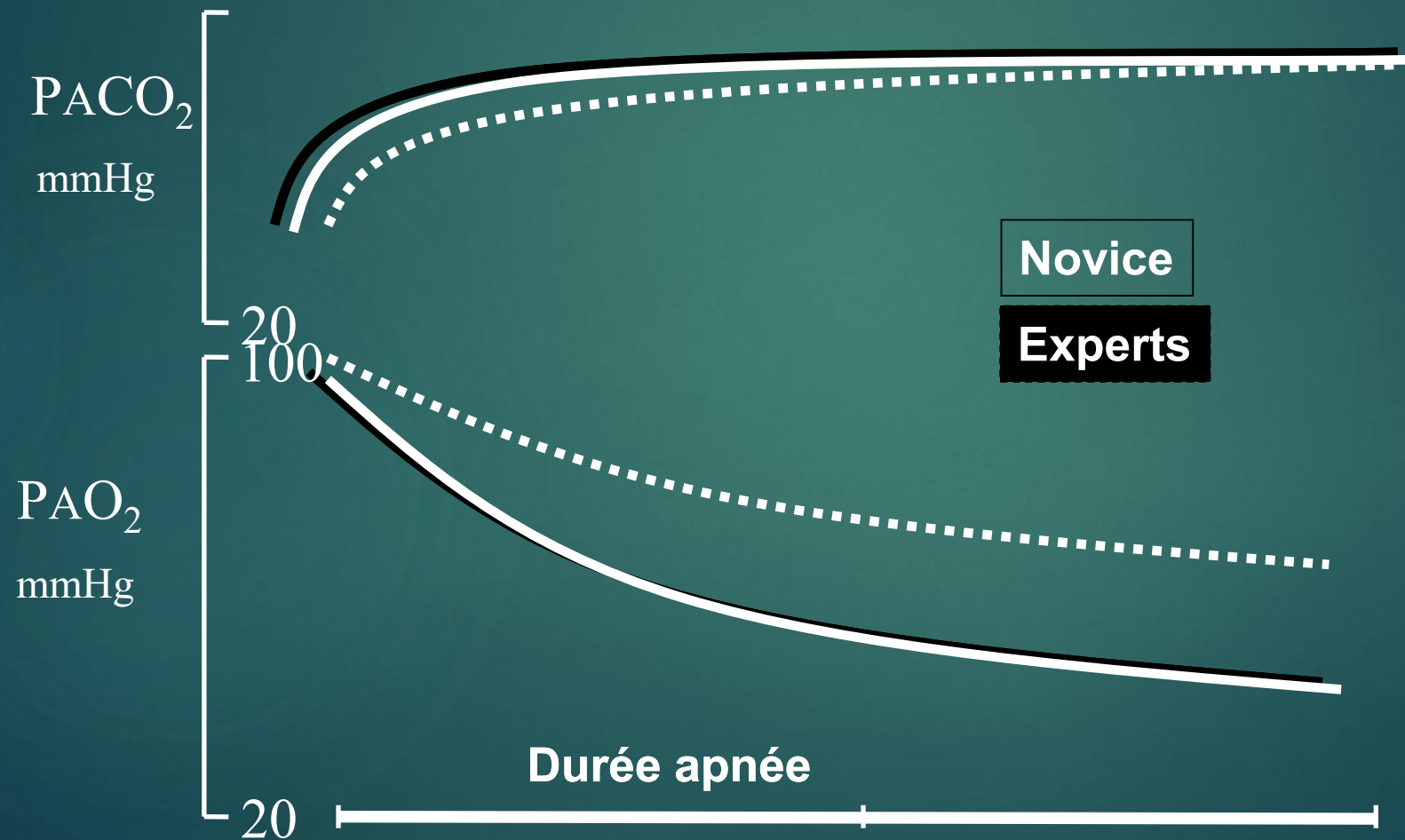
Hypoxie M1
santé 2018



Prédisposition ou entraînement

- ▶ Bajau ont une rate plus grosse (*Ilardo et al. 2019*)
- ▶ Les Amas y compris les non plongeurs présentent un diving reflex plus marqué que les autres ethnies vivant à proximité
- ▶ Les meilleurs apnéistes mondiaux sont issus de tous les continents suggérant qu'il y a un effet de l'entraînement.

Evolutions des PACO_2 et des PAO_2



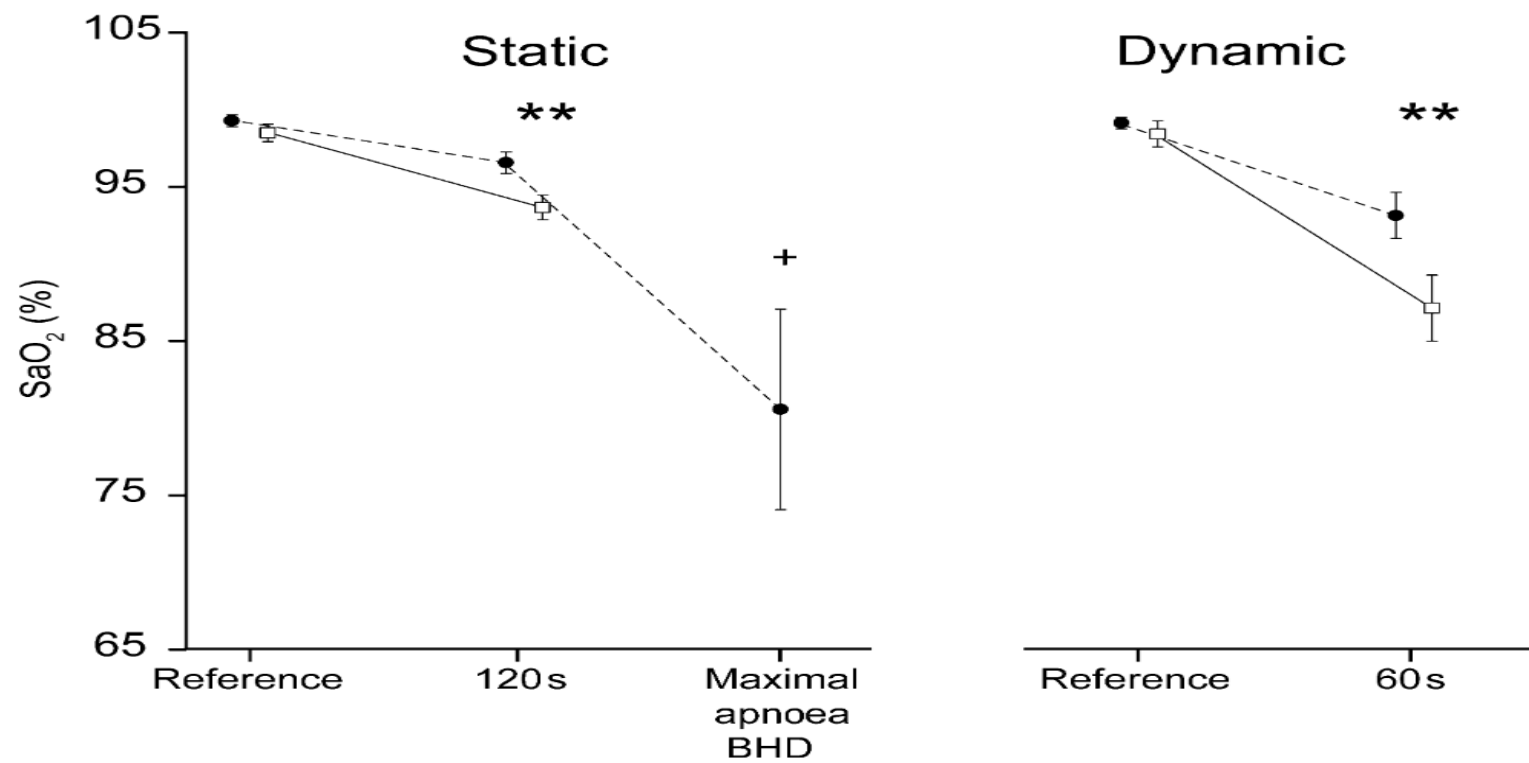
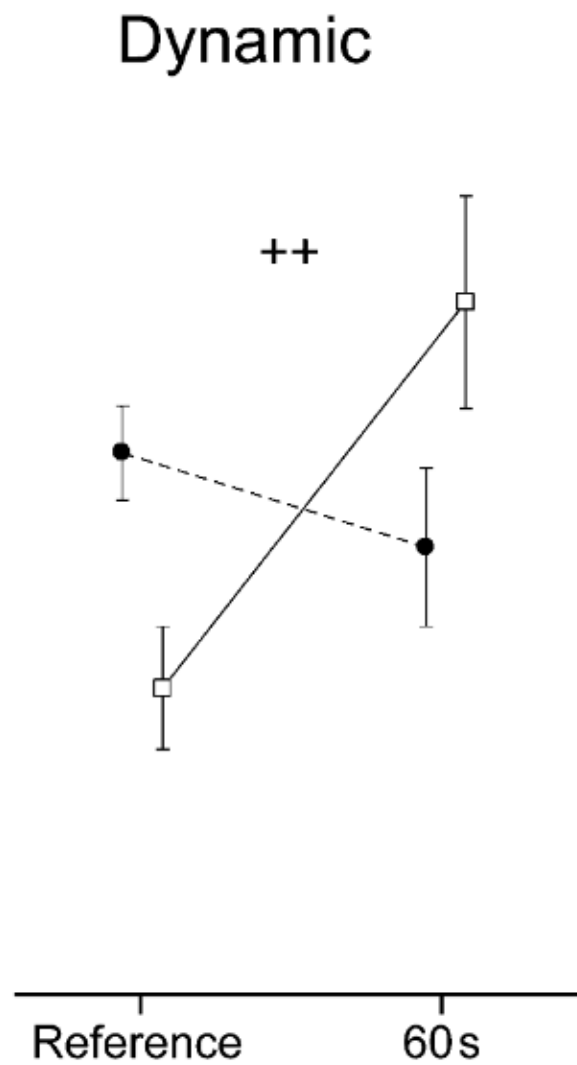
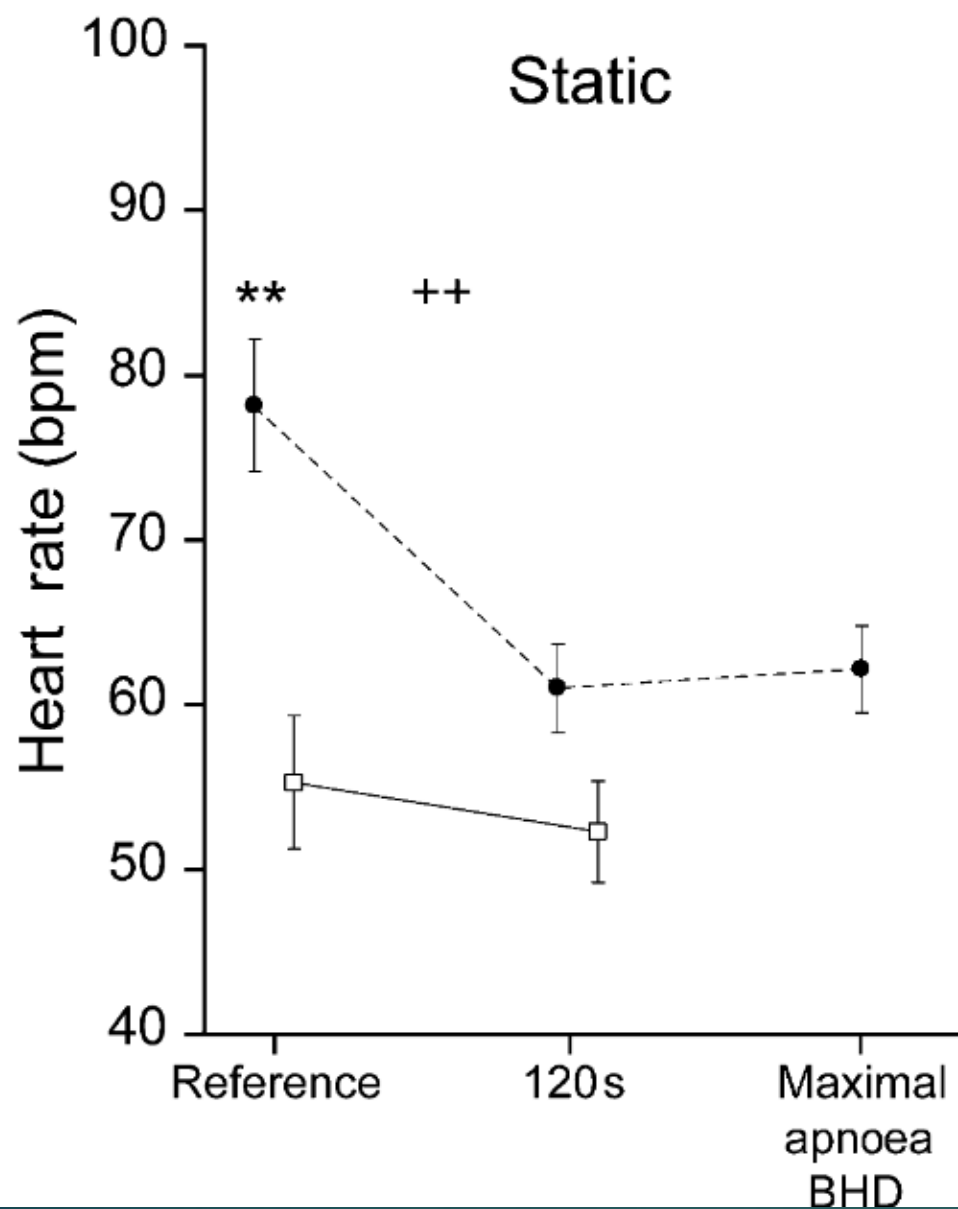
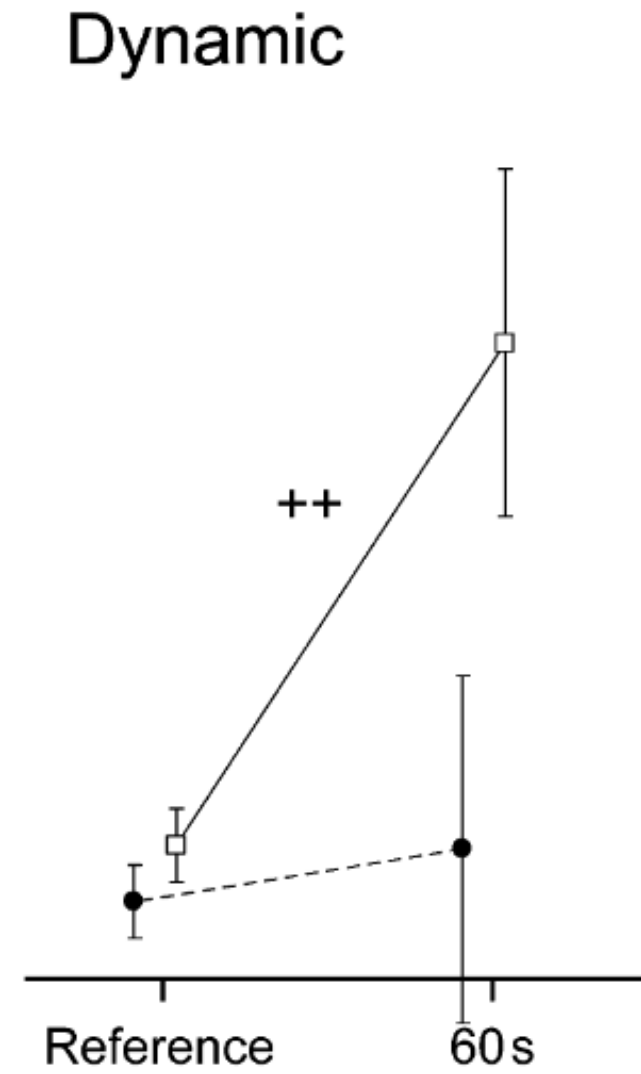
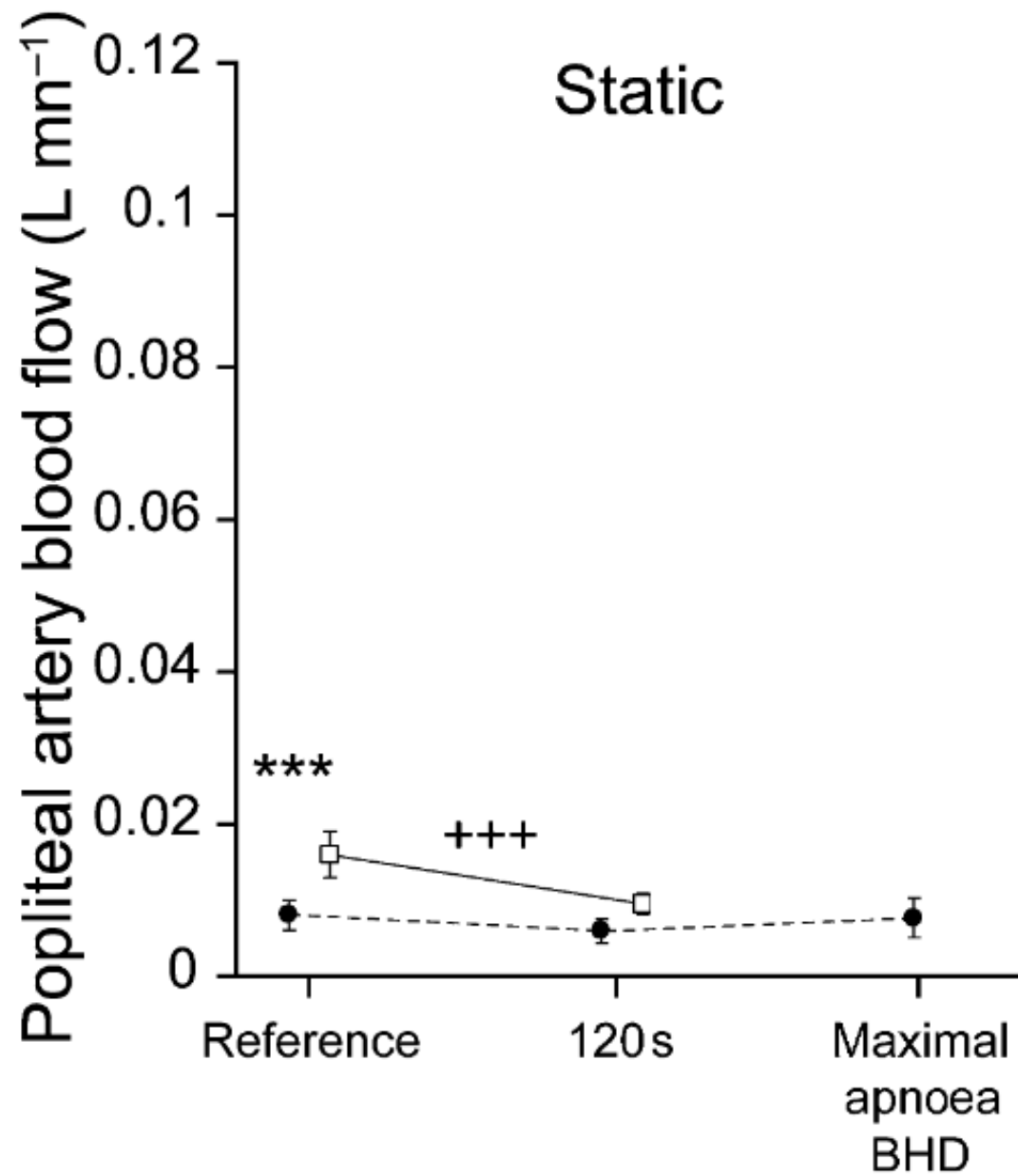
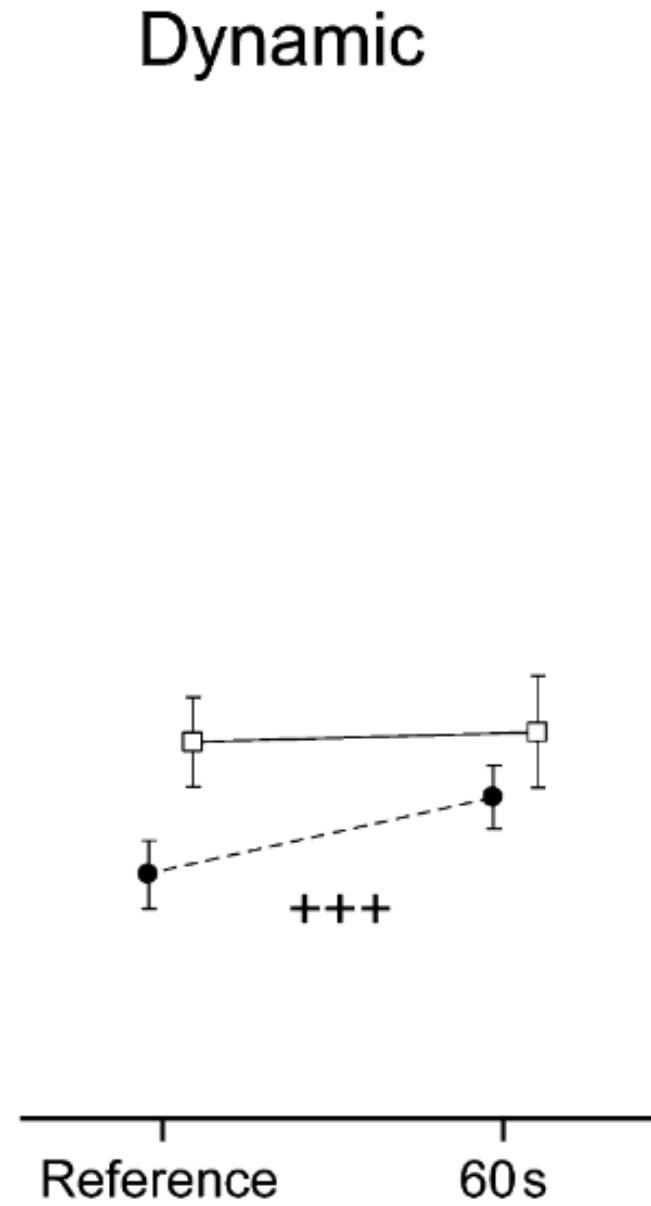
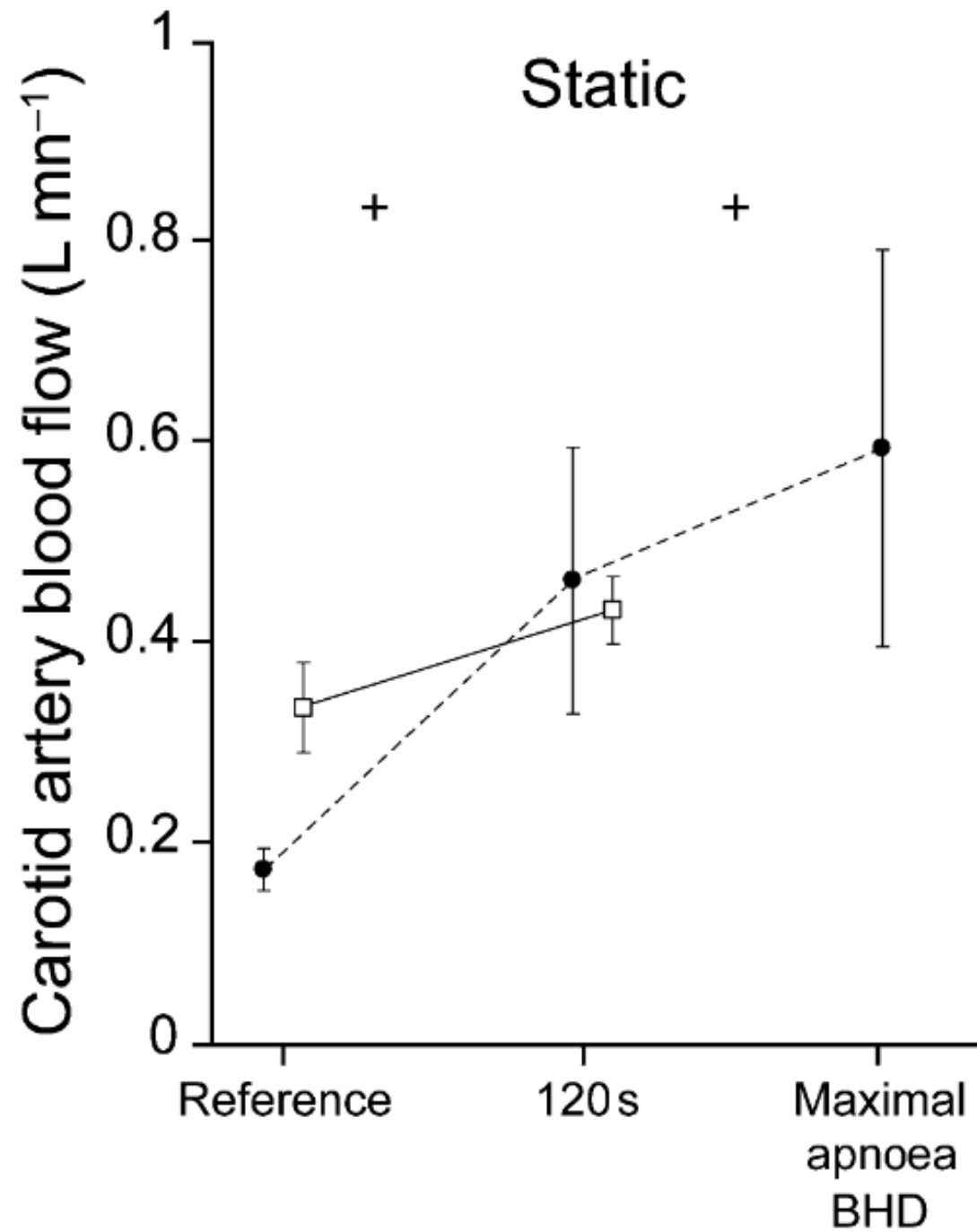


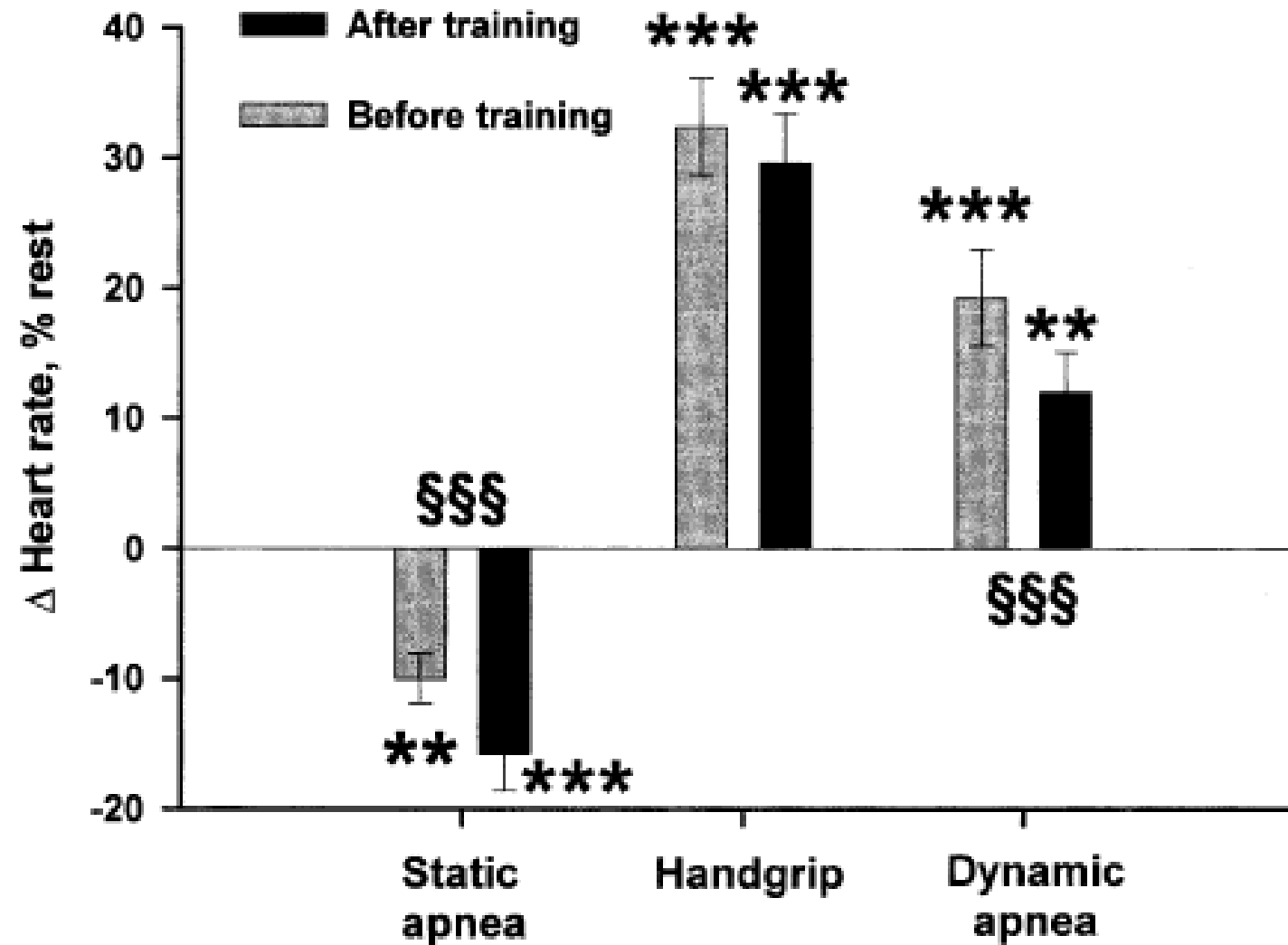
Figure 1 Mean (+SEM) SaO₂ values for breath-hold divers (BHD, black circles) and non-divers (ND, white squares). Left: values recorded at rest (reference), after 2 min (120 s) of static apnoea and at the end of maximal static apnoea for BHD. ** indicates a difference between BHD and ND after 2 min of static apnoea ($P < 0.01$). + indicates a difference between values at 120 s and at maximal static apnoea in BHDs ($P < 0.05$). Right: values recorded at rest and after 60 s of exercise in apnoea. ** indicates a difference between BHD and ND after dynamic apnoea ($P < 0.01$).



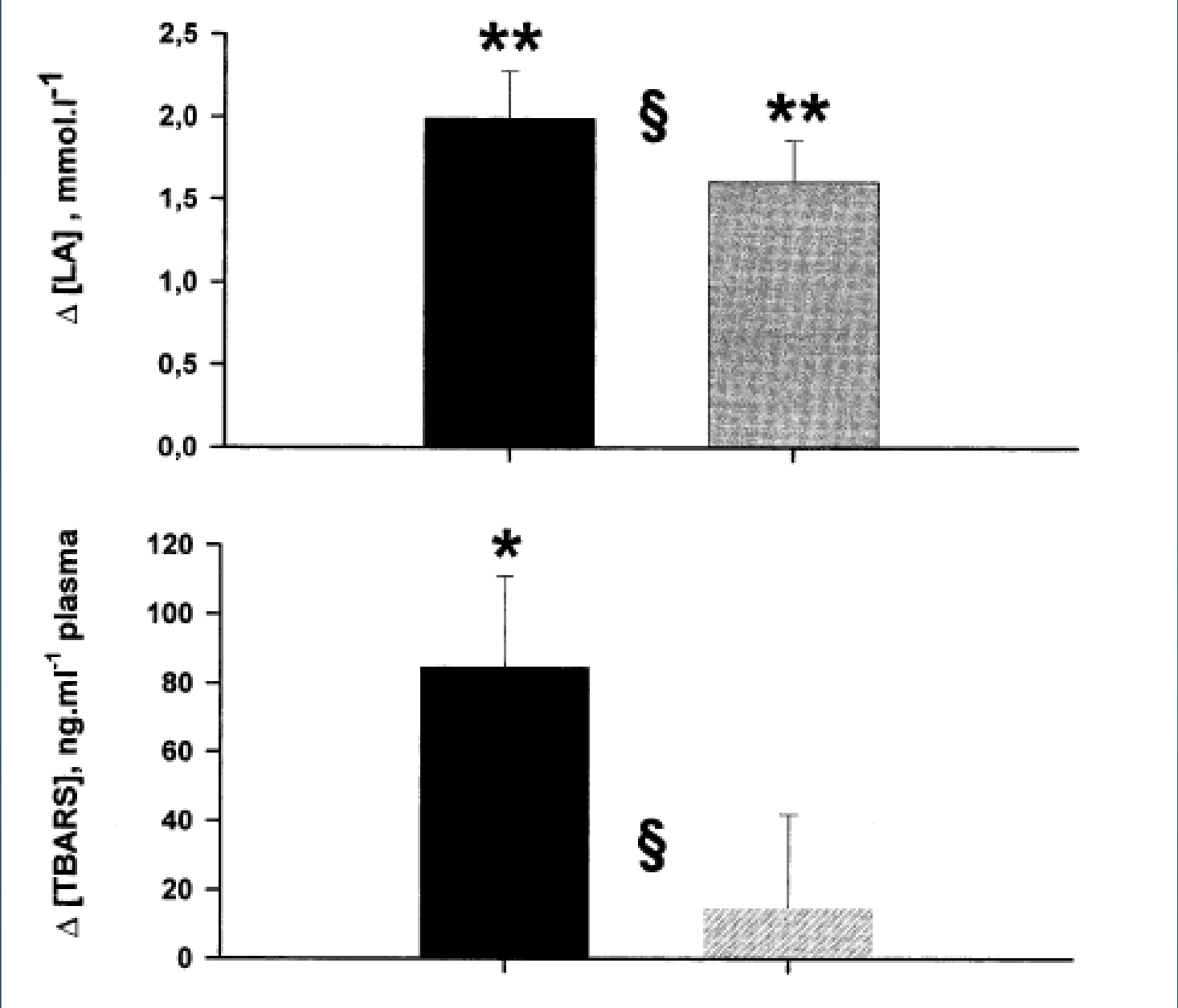




Bradycardic apnea and training

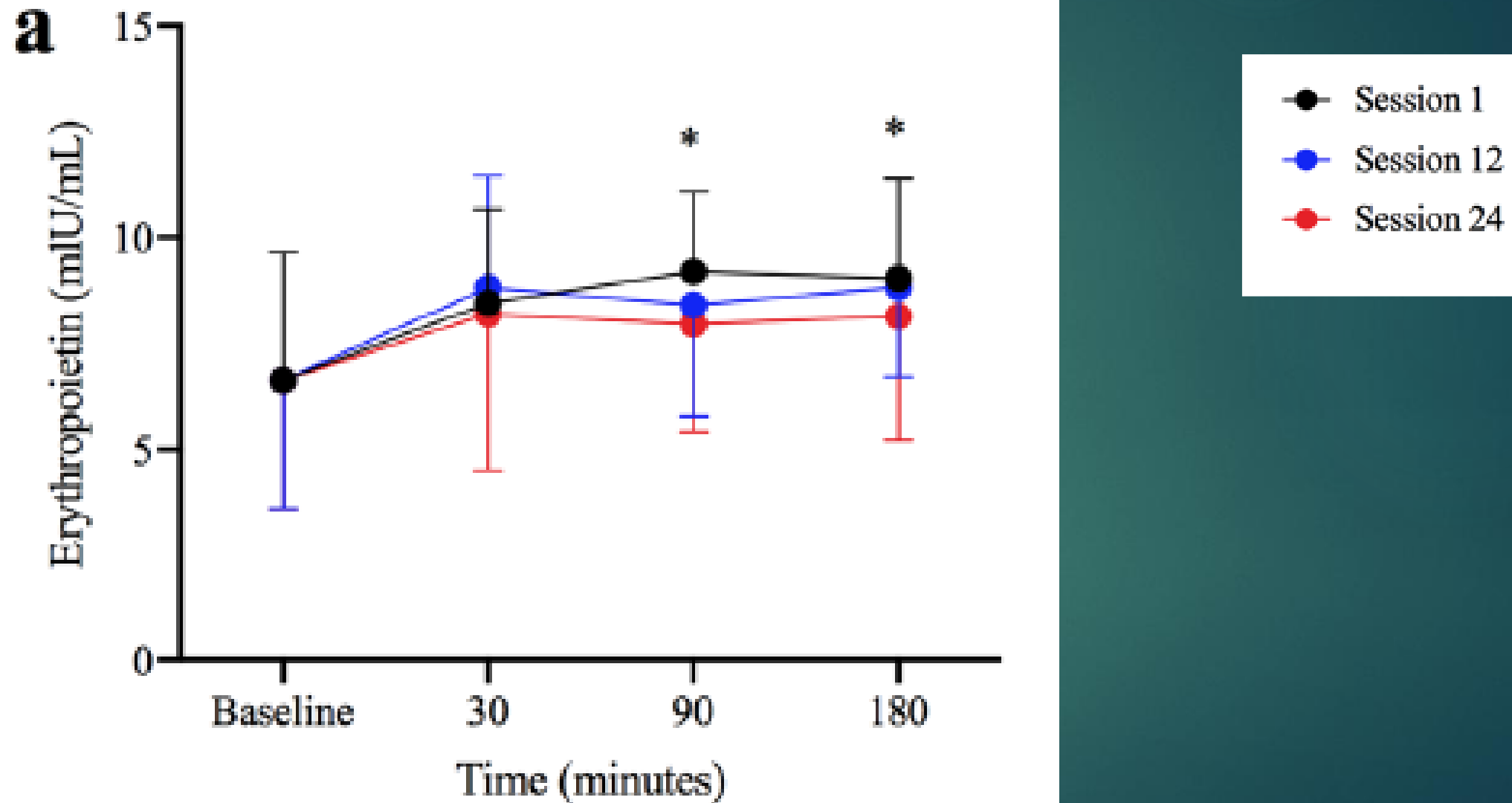


Effects of training on blood lactate concentration and free radicals

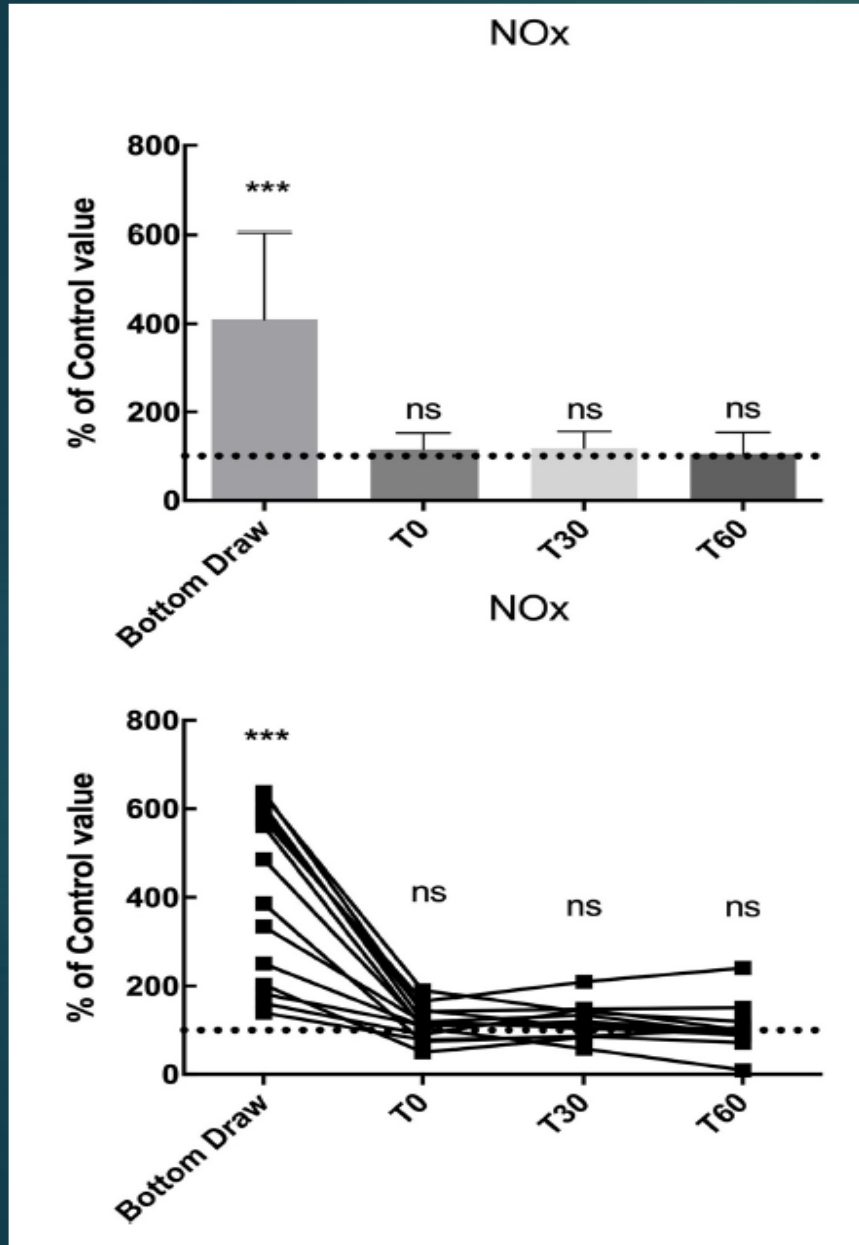


D'après Joulia et al., Respir Physiol 2003

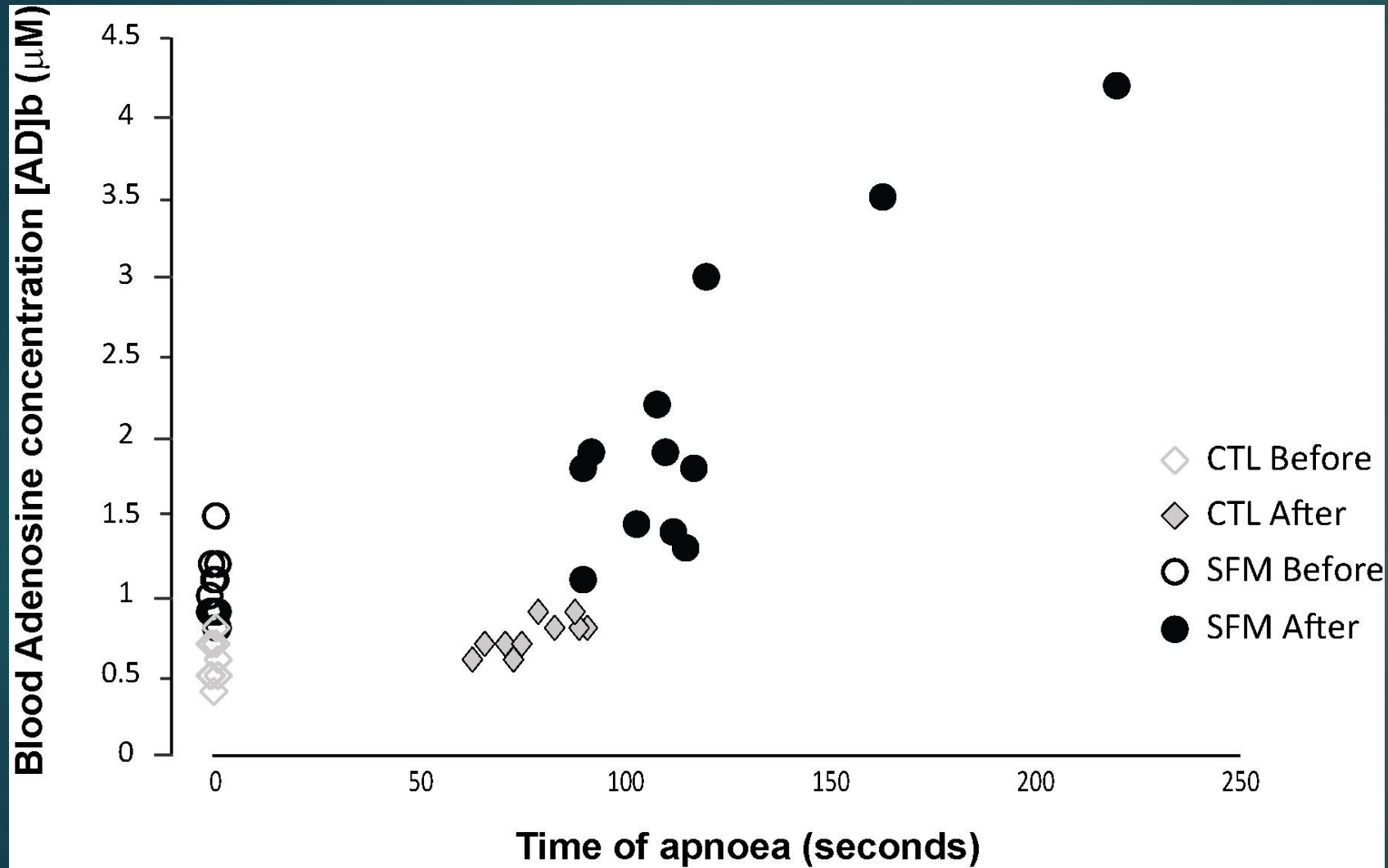
Apnea training and Erythropoietin



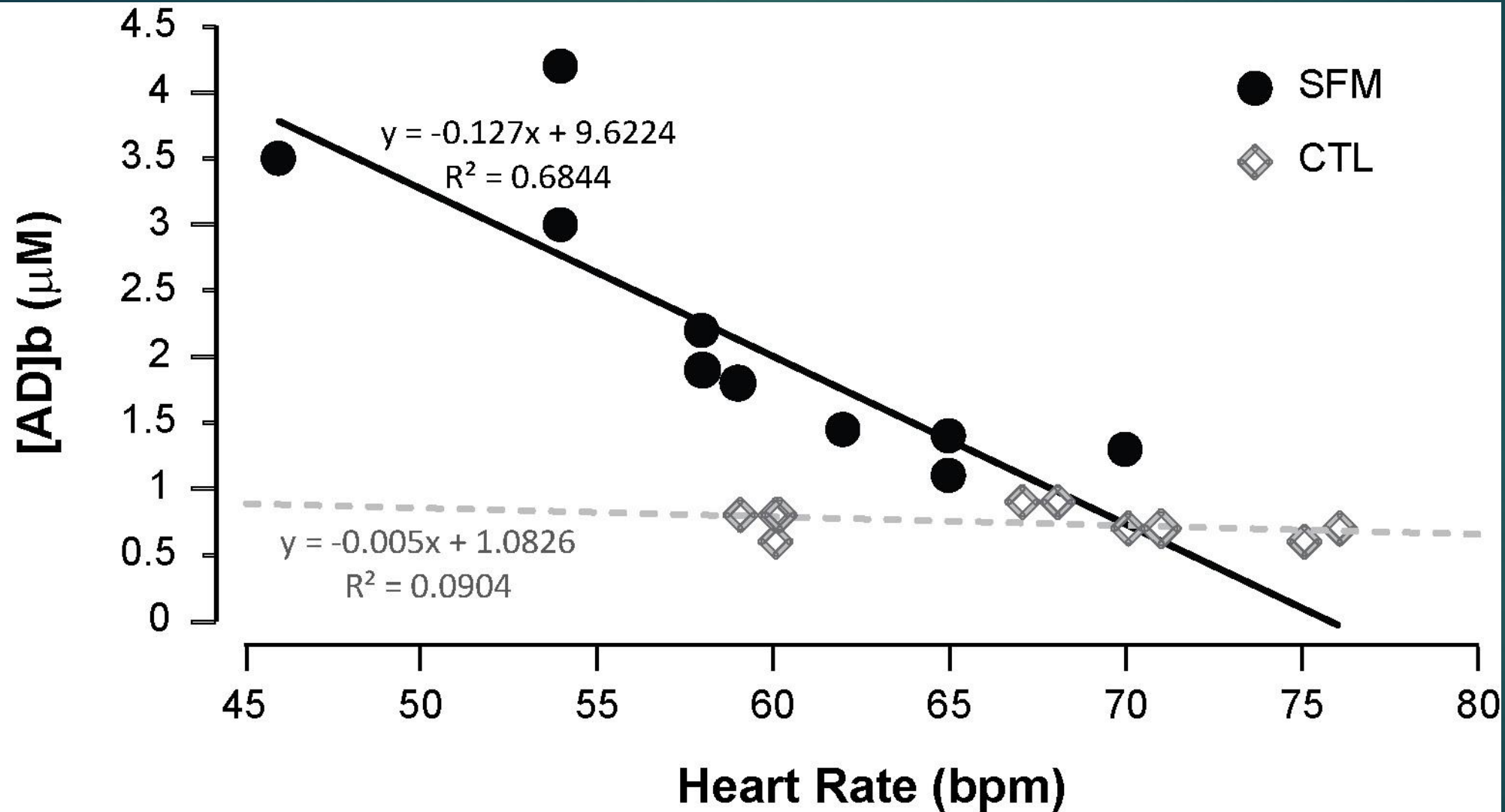
Free radicals and free dive



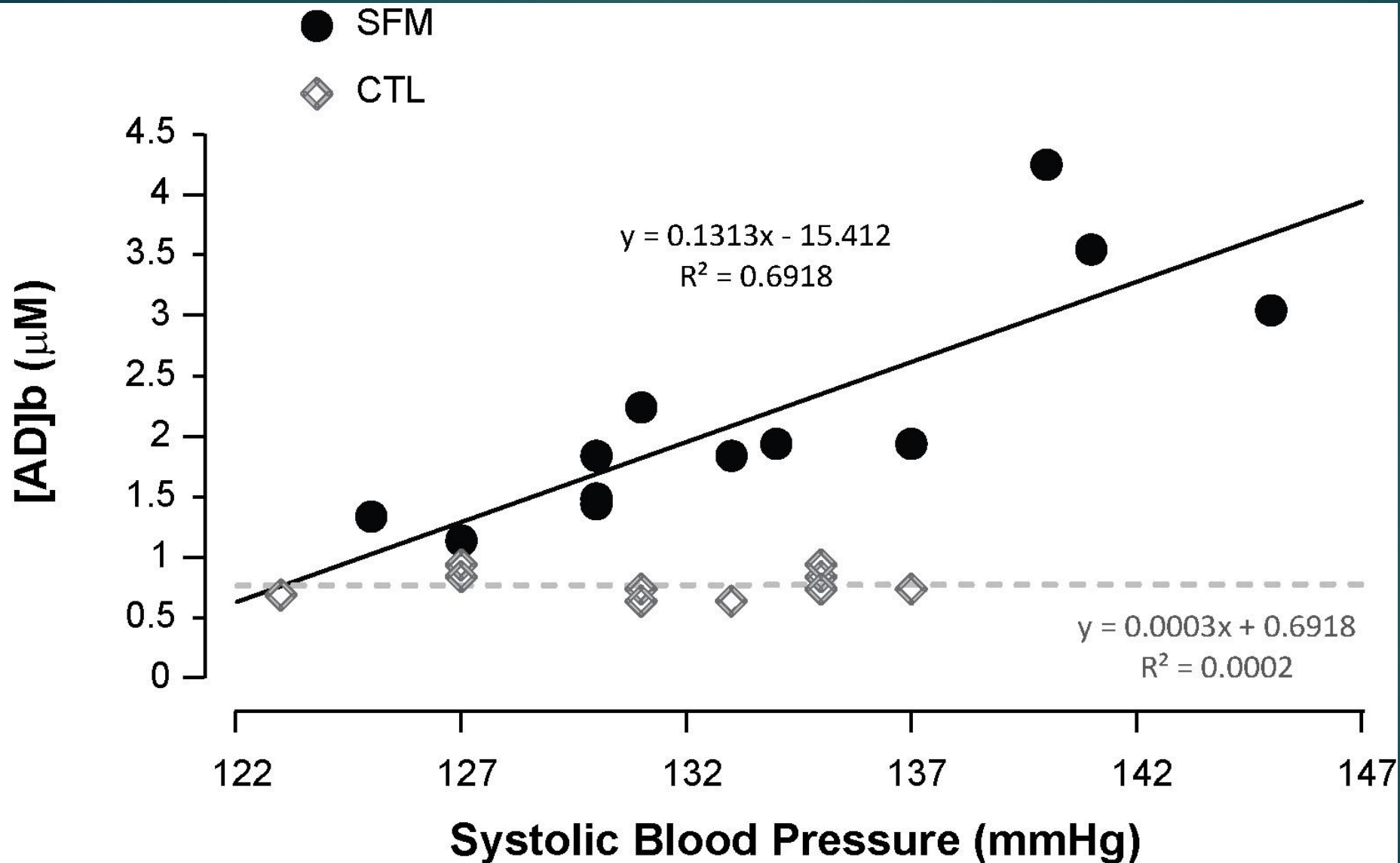
Adenosin and apnea



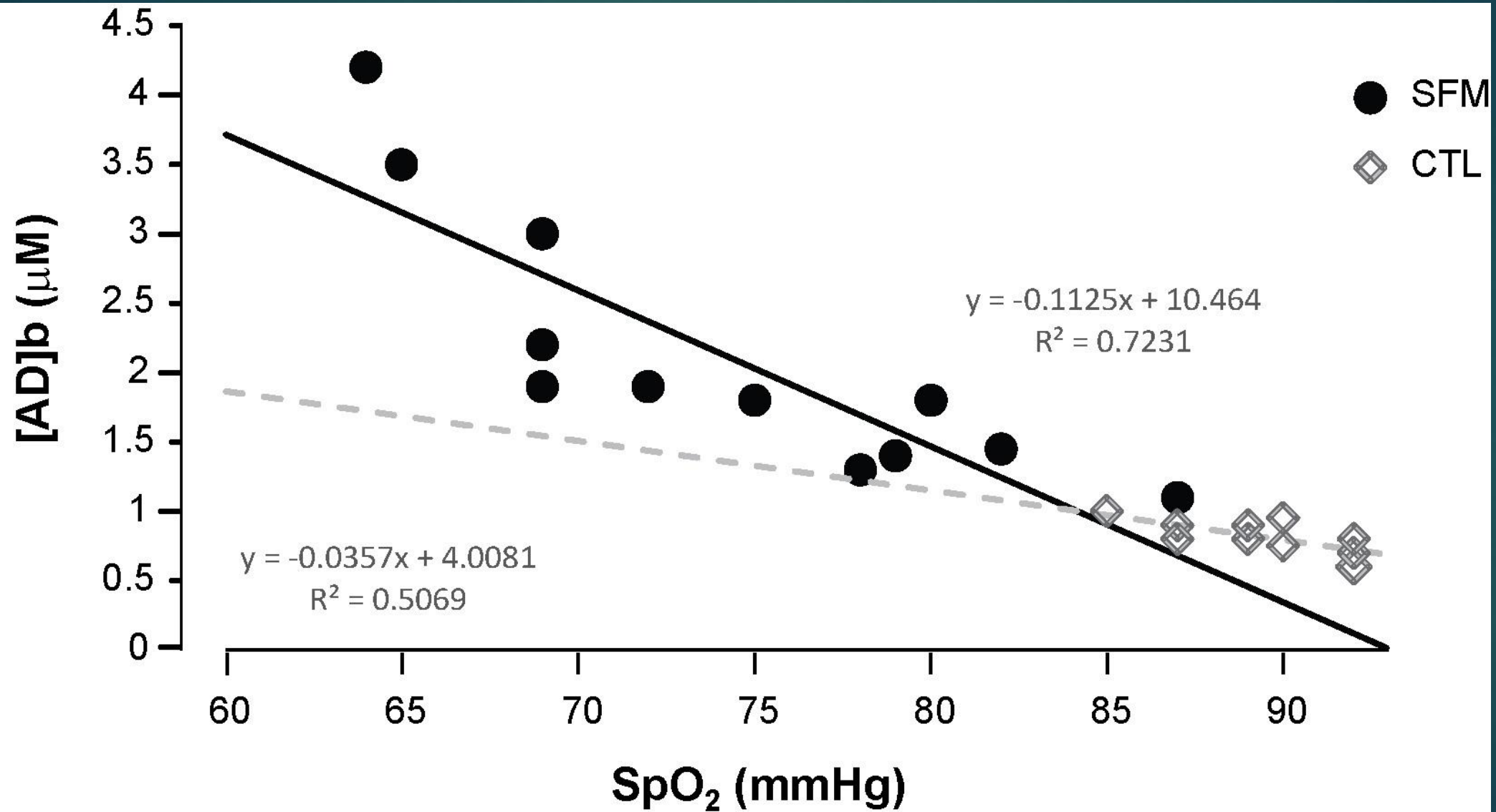
Adenosin AND heart rate



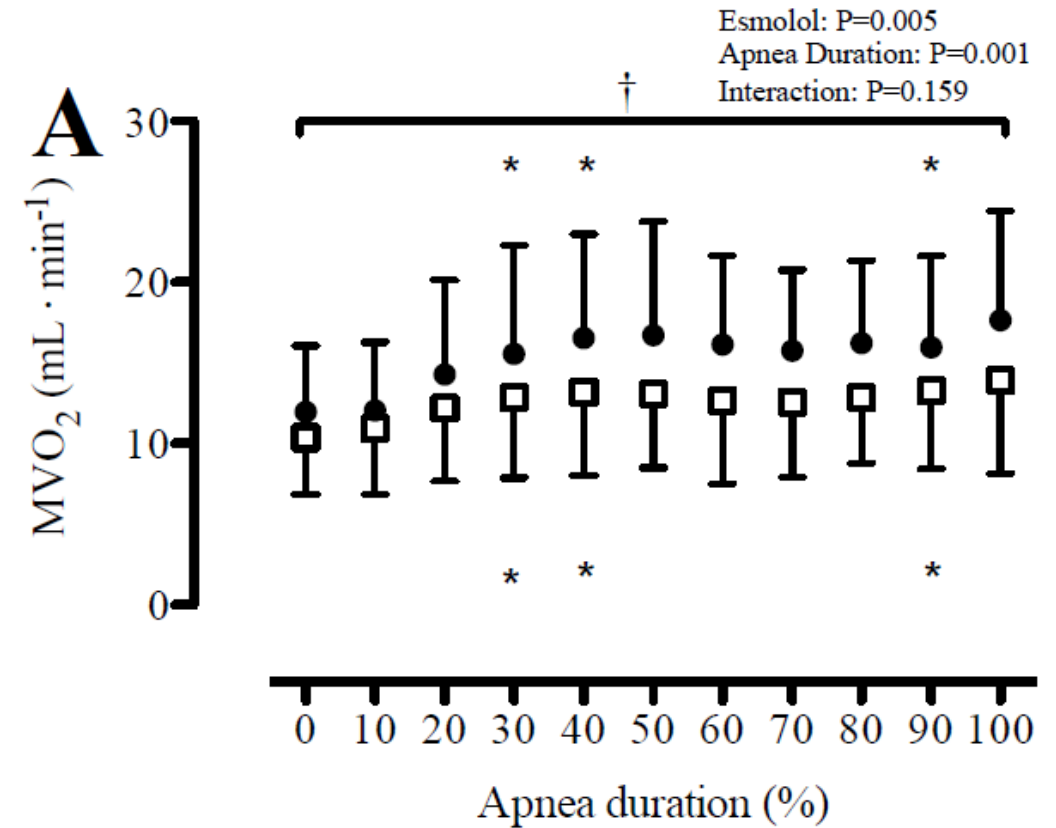
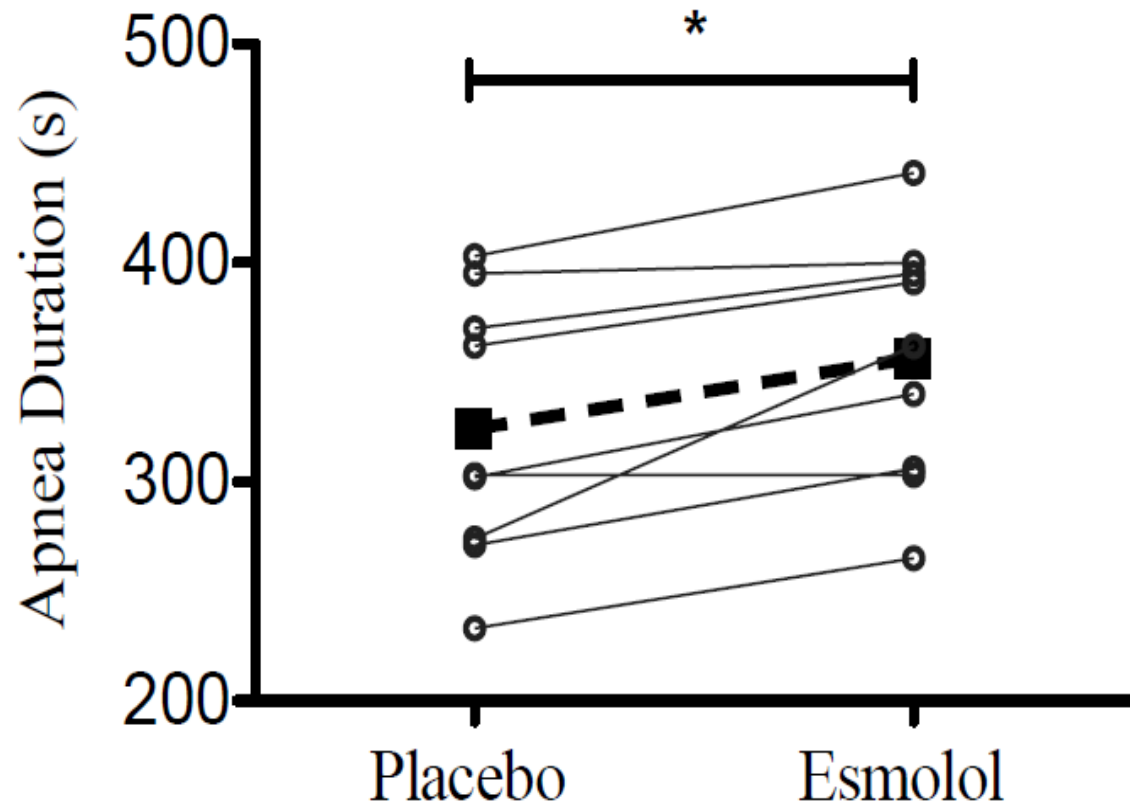
Adenosin AND systolic blood pressure



SpO₂ and adenosin



Effets des β bloquants sur la performance en apnée



Entrainement en apnée : ascension Himalaya

D'après Shah et al. 2020

- ▶ Entrainement de grimpeurs (3 à 10 apnées par jour pendant 6 semaines)
- ▶ Aucun effet significatif sur le risque de survenue de MAM
- ▶ Nombre d'apnées trop faible pour engendrer un effet chronique donc logique de ne pas avoir d'effets