



Assistance Publique
Hôpitaux de Marseille



Physiologie de la respiration intégrée au milieu hyperbare

Pr Marc GAINNIER

Médecine Intensive Réanimation

Marseille

DESIU Médecine Sub-Aquatique et Hyperbare



1. QUELQUES RAPPELS DE PHYSIOLOGIE DE L'APPAREIL RESPIRATOIRE

Composants du système respiratoire

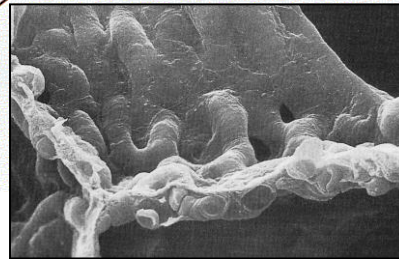
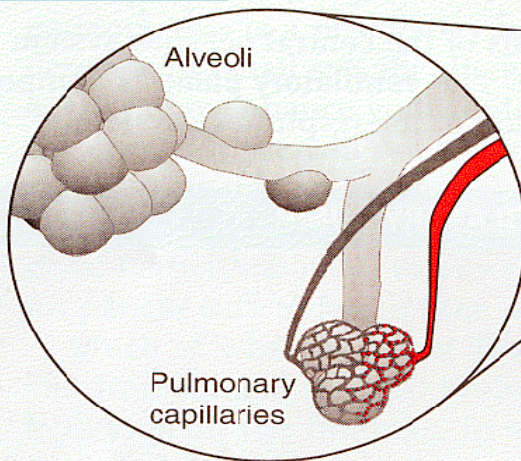
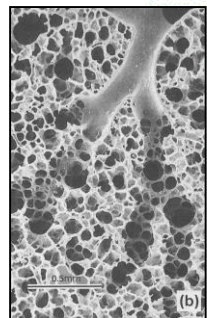
Système de Contrôle

Cortex—behavioral control
Brainstem—automatic control

Pompe ventilatoire

Chest wall muscles
Chest wall skeleton
Chest wall connective tissue
Airways
Pleura
Spinal cord and peripheral nerves

Echangeur de Gaz

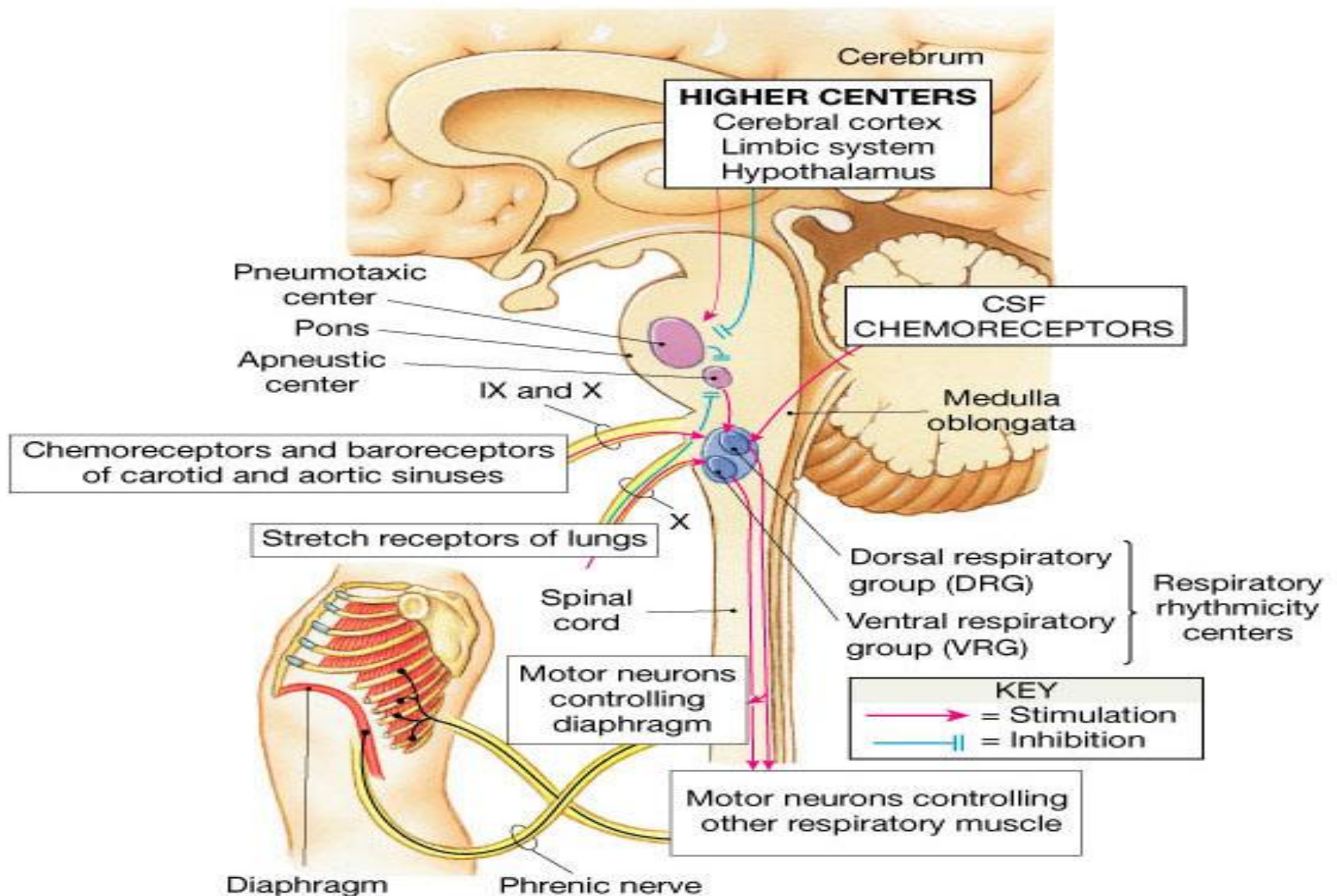


Membrane alvéolaire
Interface 70 - 100 m²
Epaisseur 0,2 - 1µm

1.1 CENTRES RESPIRATOIRES

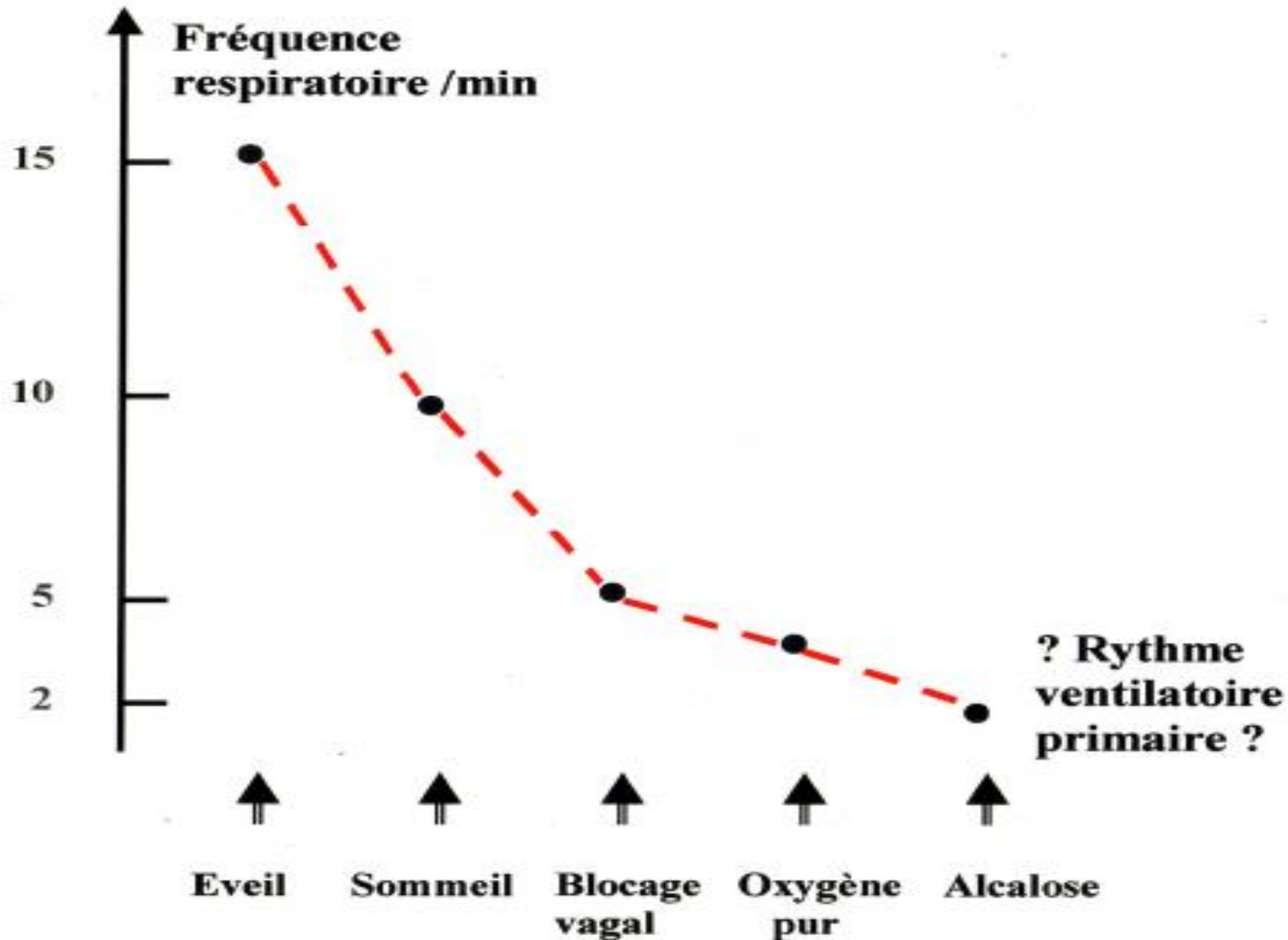
Centres respiratoires

Contrôle automatique de la respiration



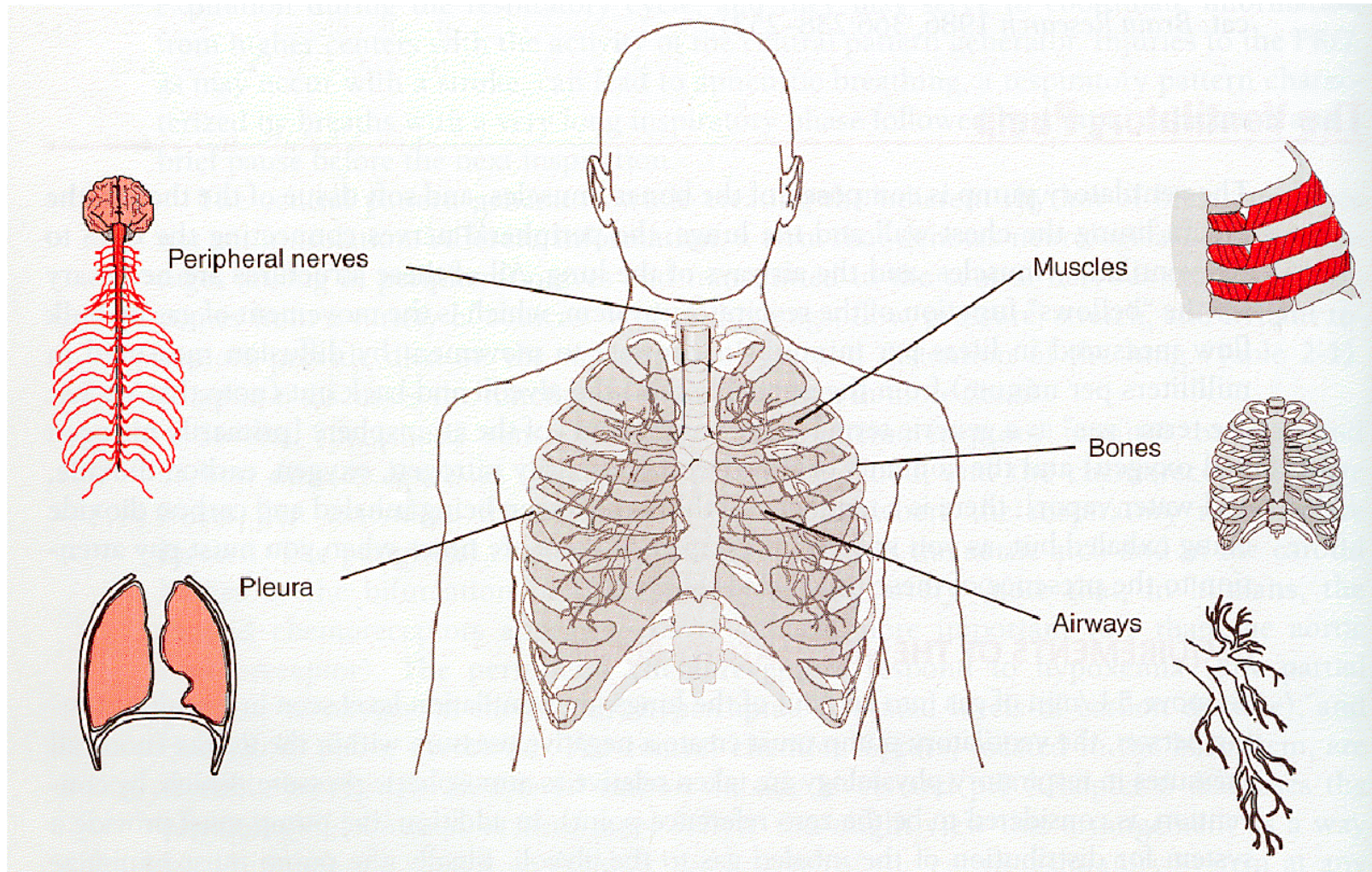
Rôle des afférences dans le contrôle ventilatoire

Sullivan et al. JAP 1978; 45:11-17

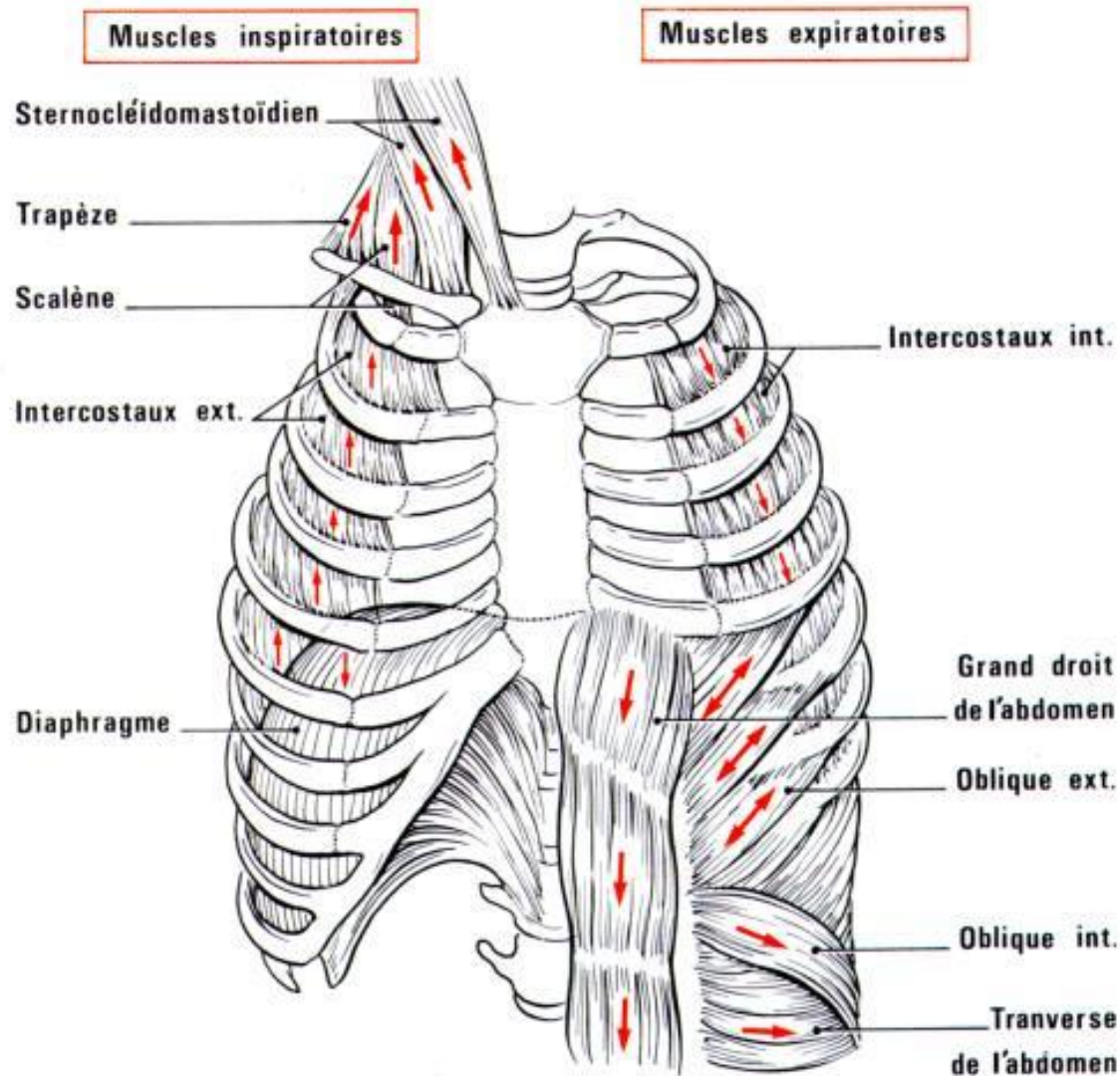


1.2 POMPE VENTILATOIRE

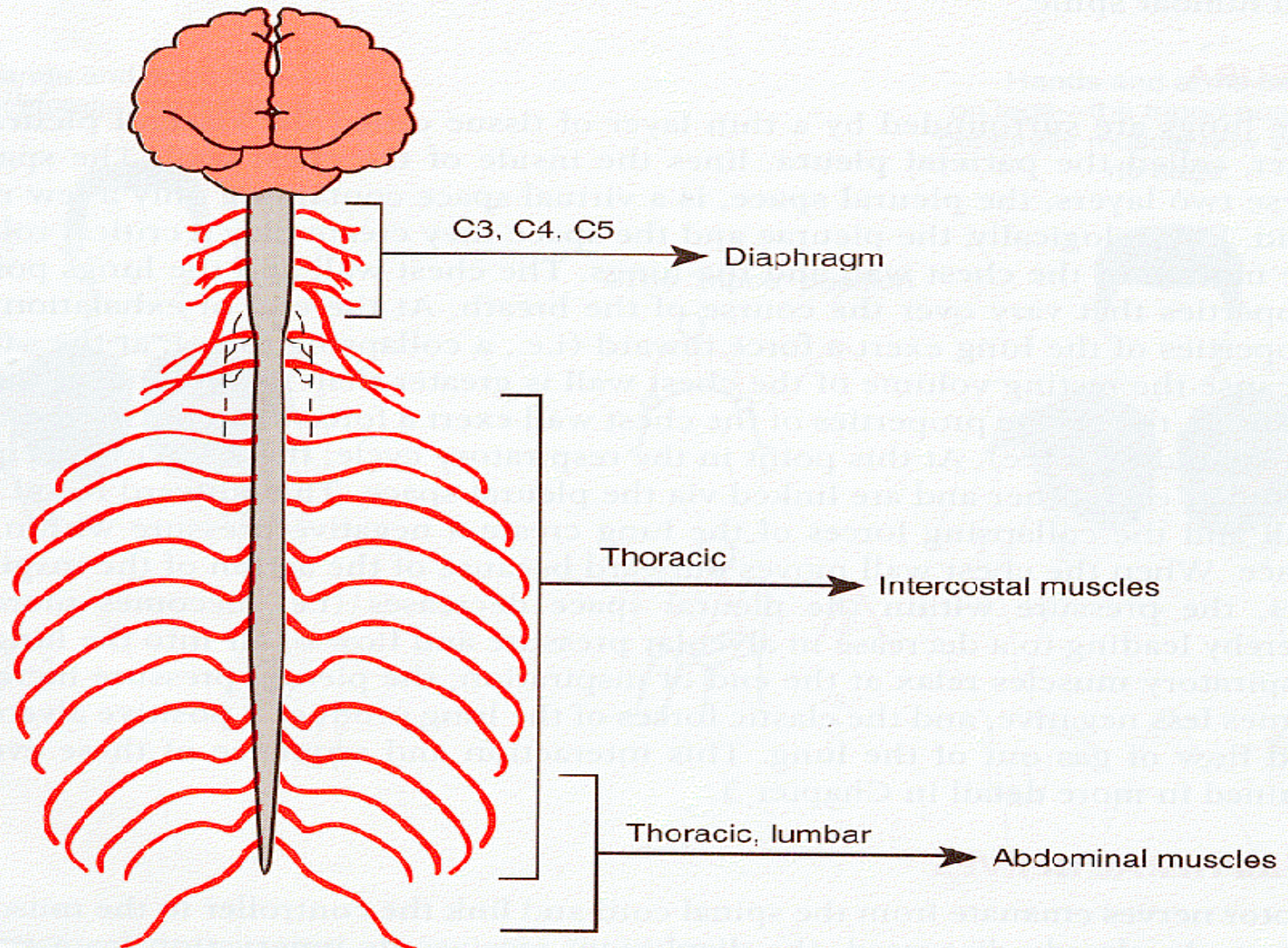
La pompe ventilatoire : les éléments clés



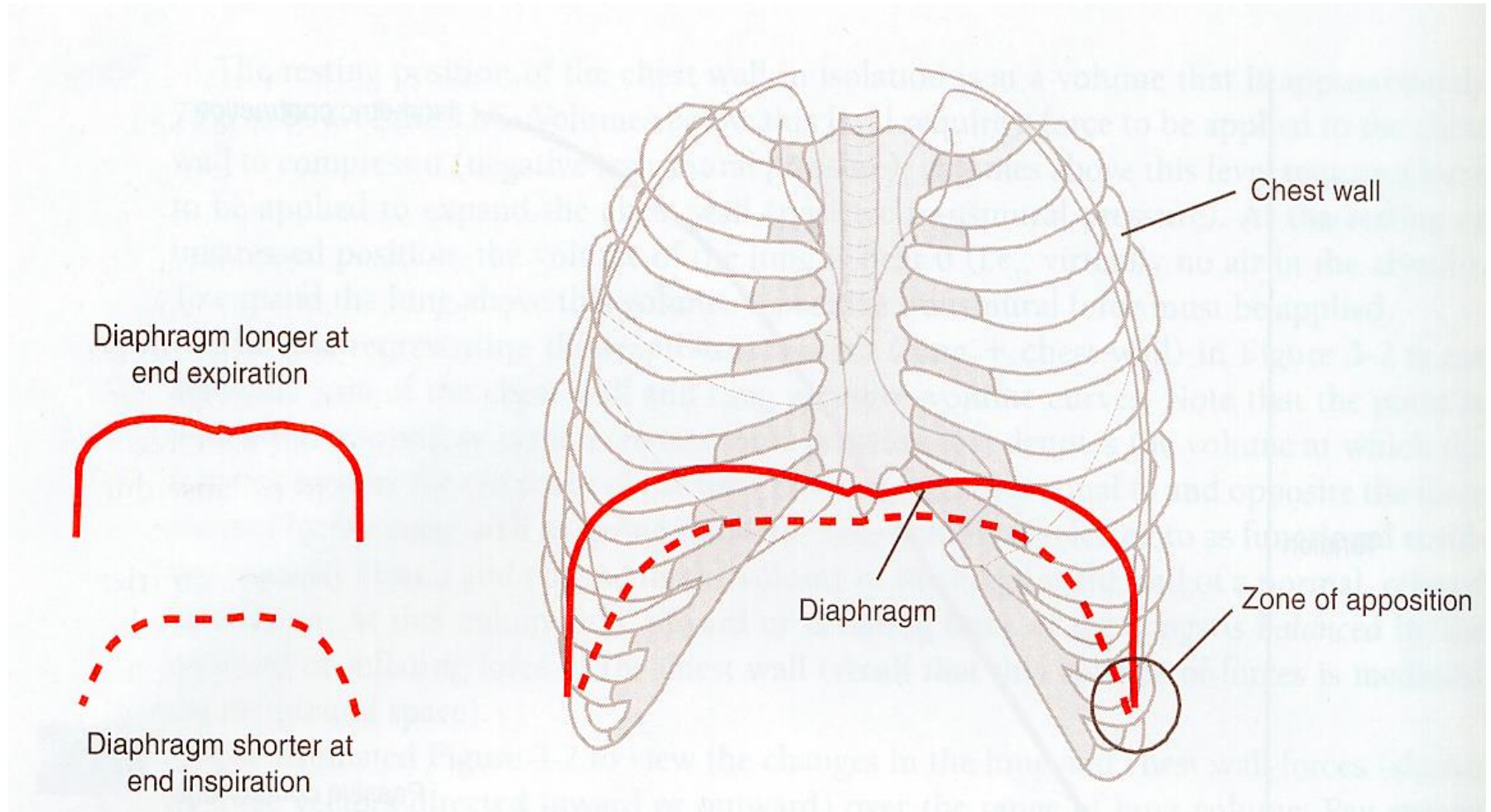
Les muscles respiratoires



Les muscles respiratoires : innervation



Position et fonction du diaphragme



Structure des voies aériennes

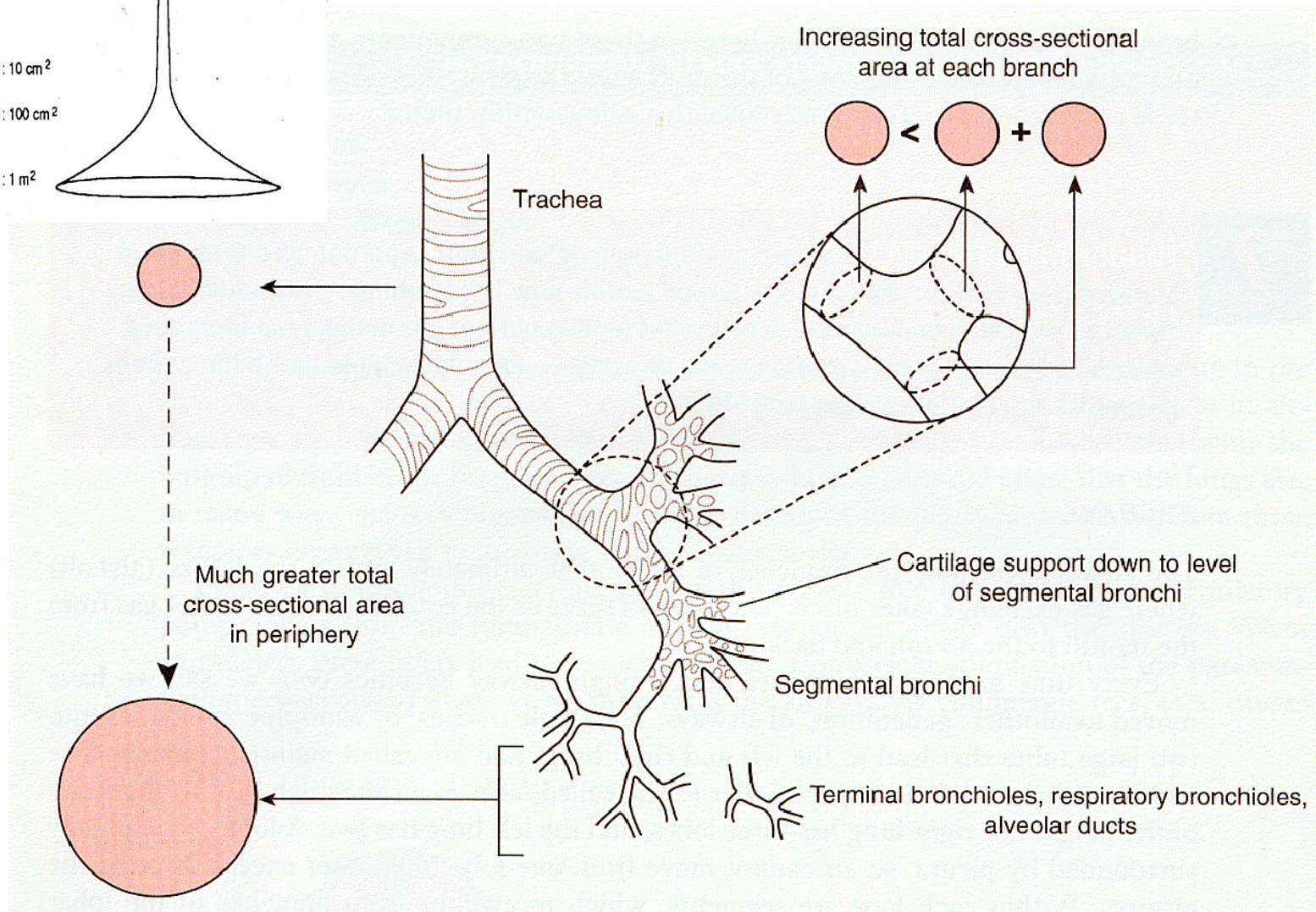
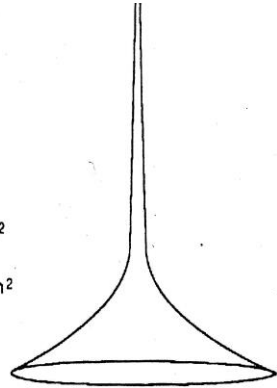
Trachée : $2,5 \text{ cm}^2$

Génération 3 : 5 cm^2

Génération 10 : 10 cm^2

Génération 15 : 100 cm^2

Génération 23 : 1 m^2



Mouvements des gaz dans les voies aériennes

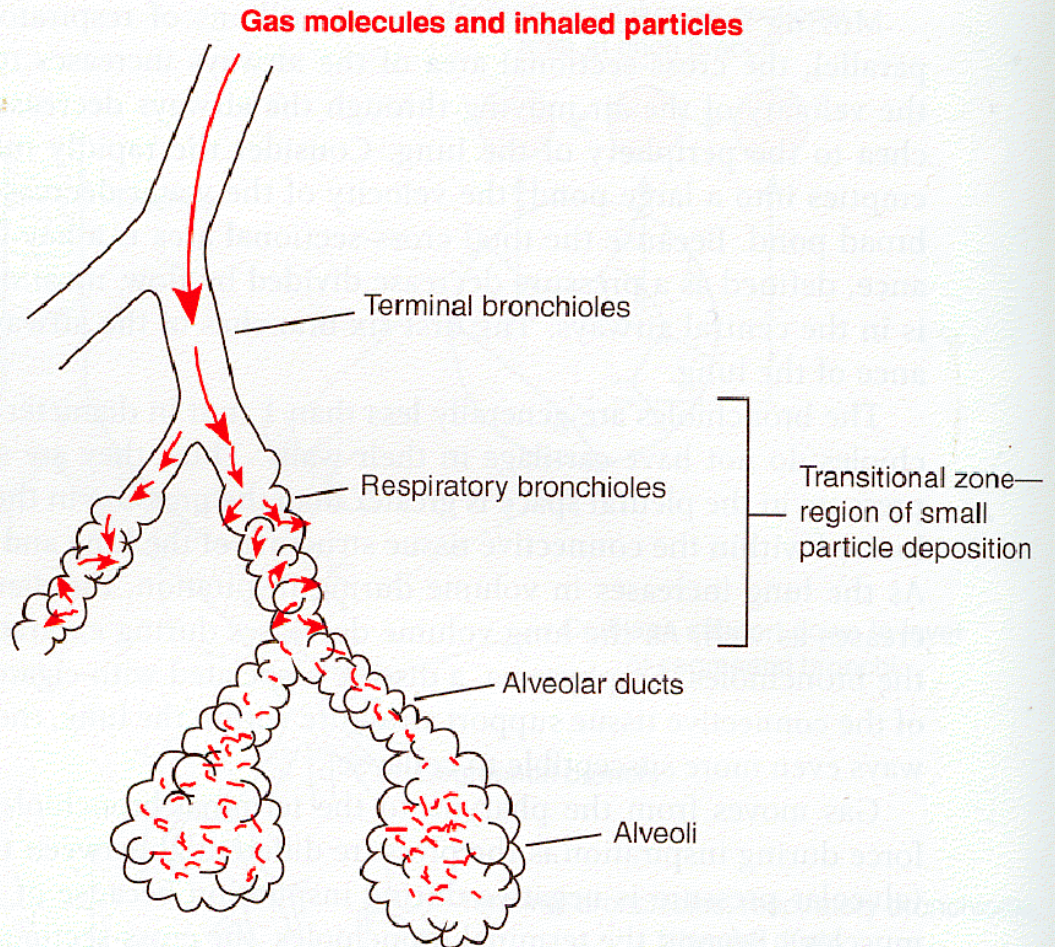
Convection

Movement by
bulk flow

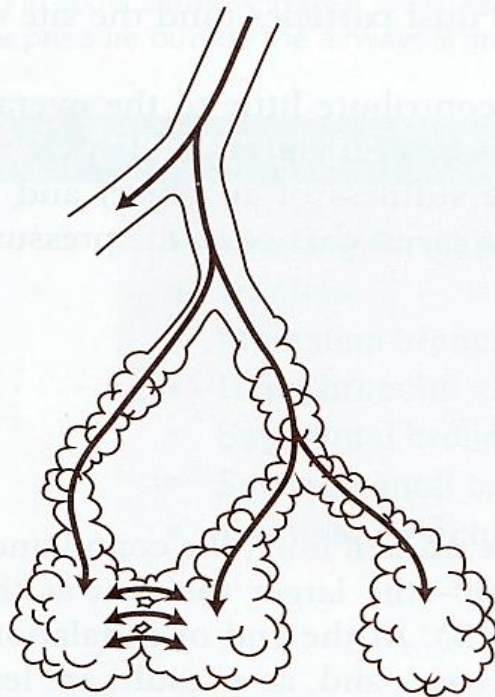
Decreasing
velocity

Diffusion

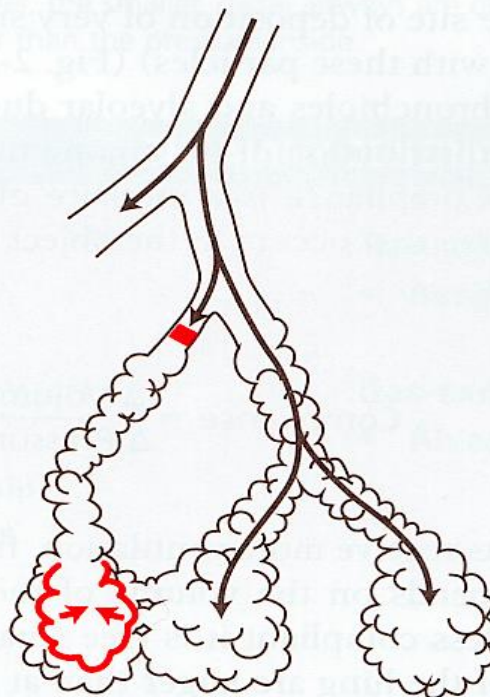
Movement by
diffusion



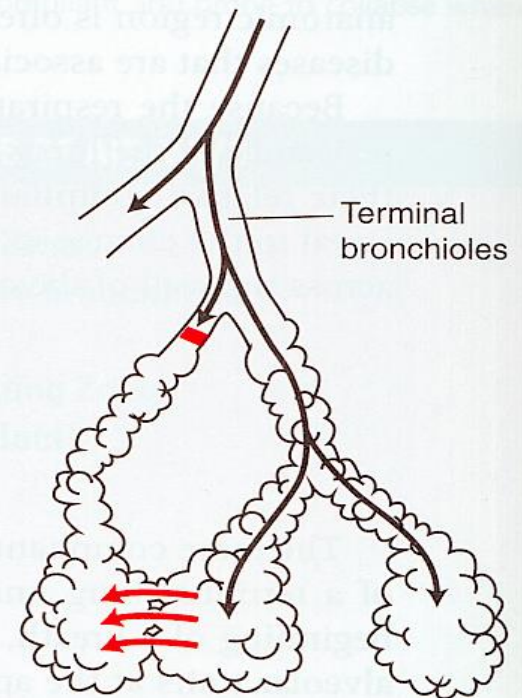
Ventilation alvéolaire



A Normal ventilation



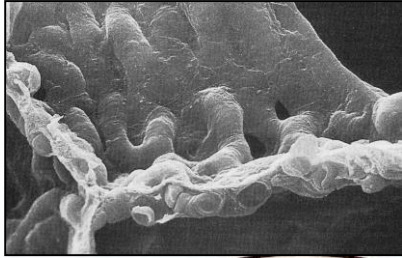
B Blockage leading to potential collapse of alveoli



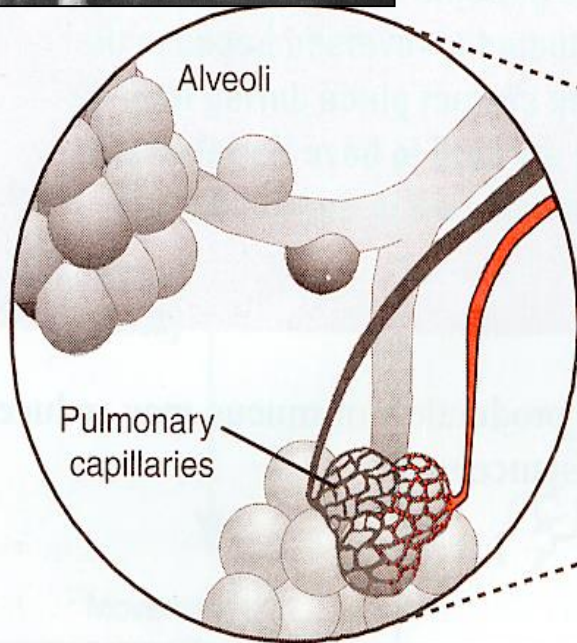
C Collateral flow through pores of Kohn works against collapse

1.3 ECHANGEUR PULMONAIRE

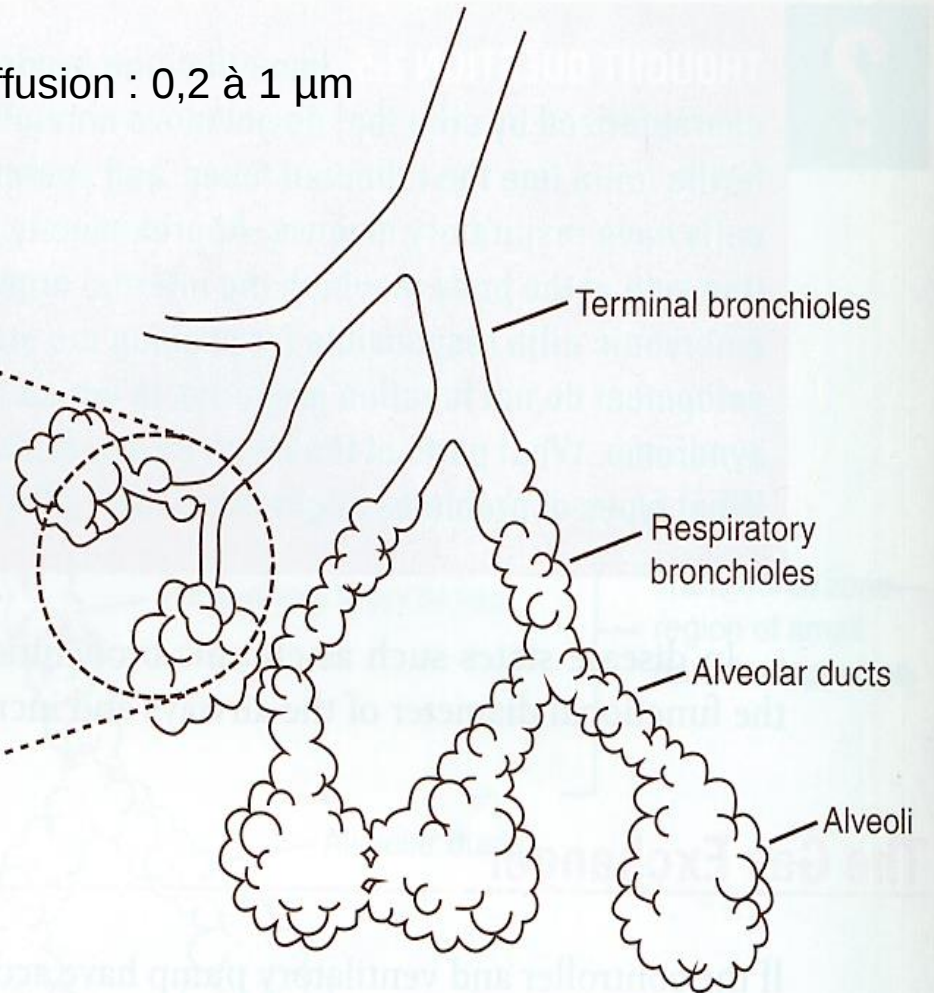
Echangeur pulmonaire



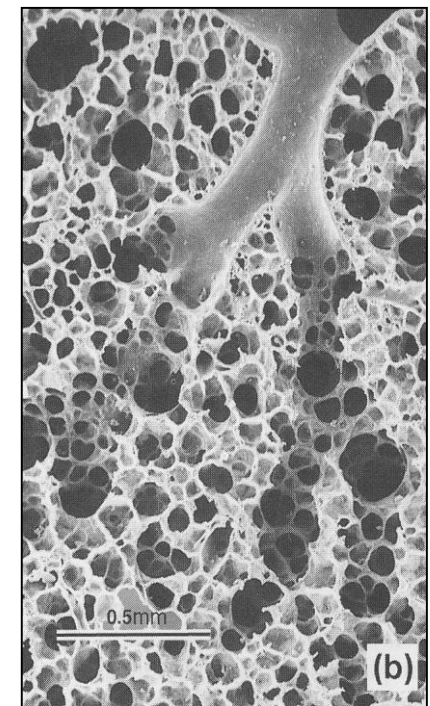
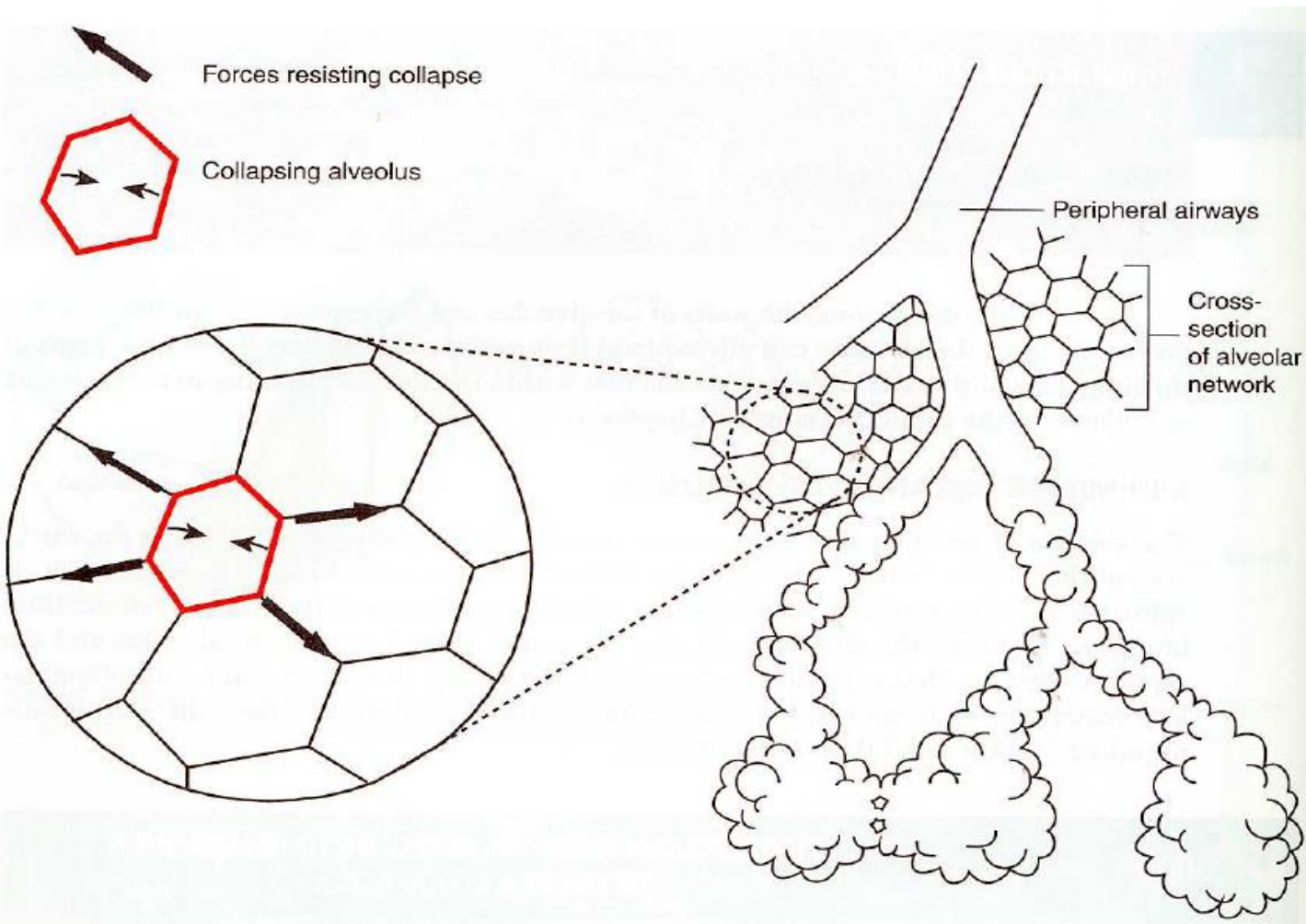
Distance de diffusion : 0,2 à 1 μm



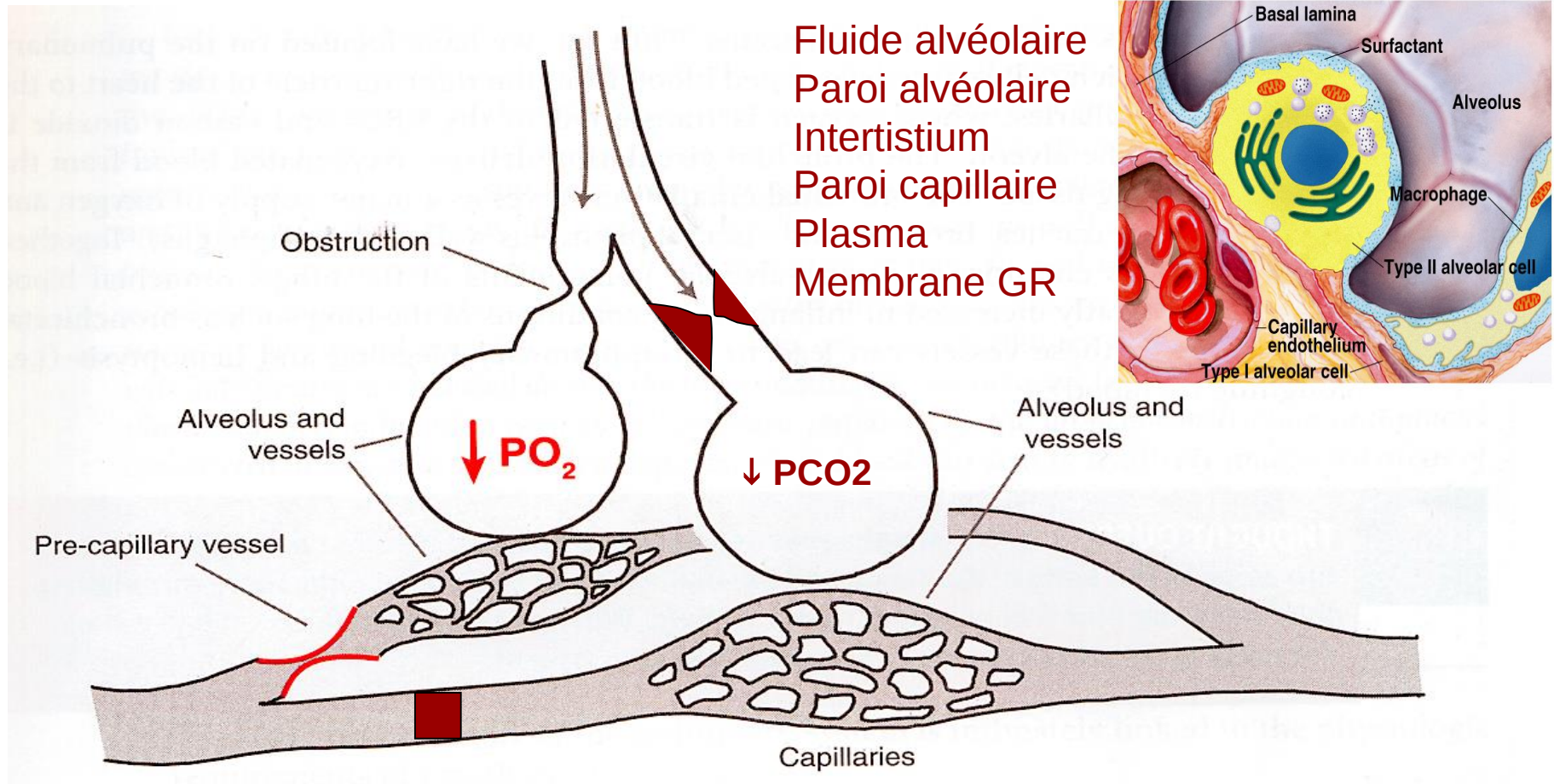
1000 capillaires/alvéole
10 μm de diamètre



Forces stabilisant les alvéoles



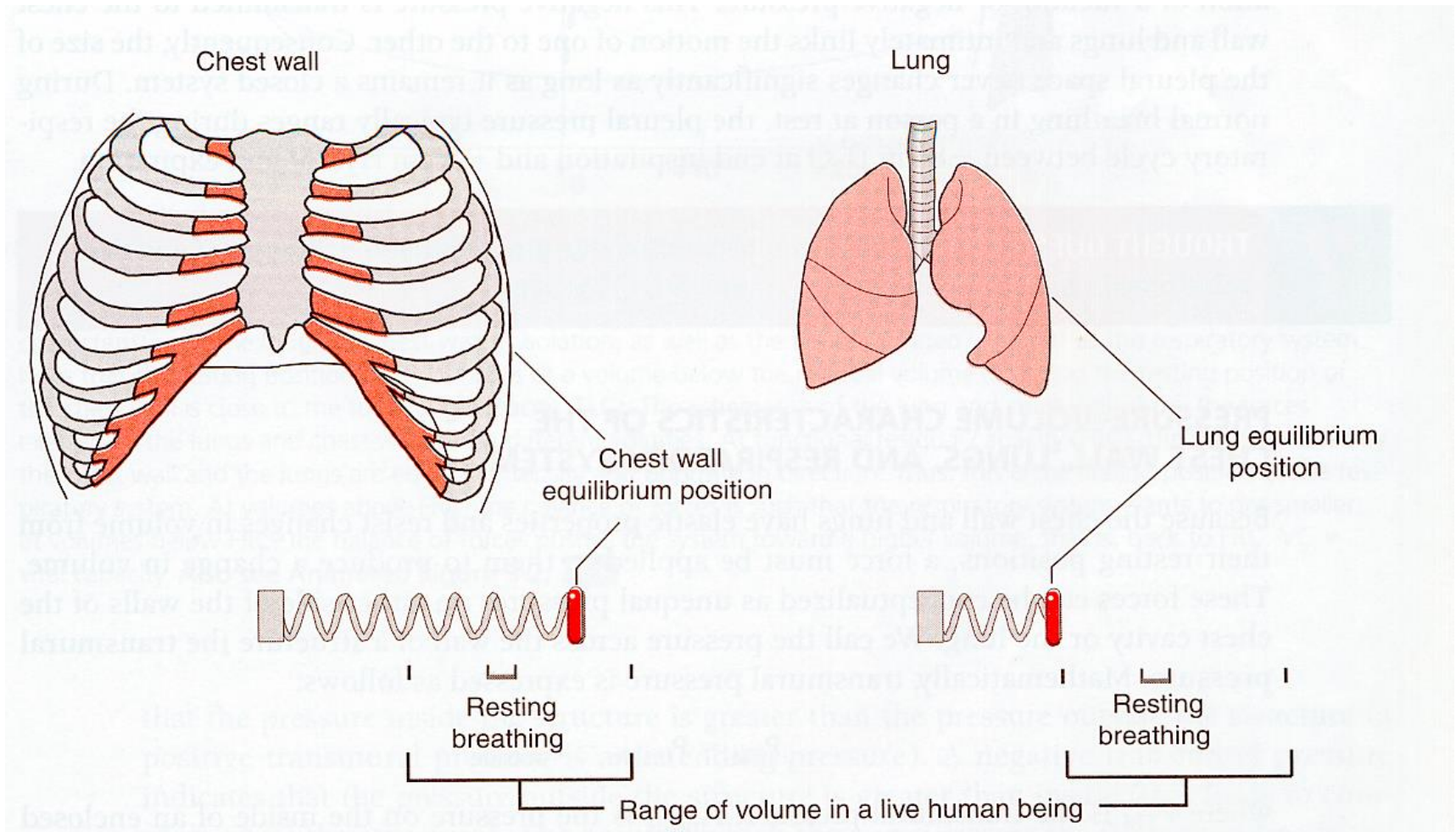
Obstacles à la diffusion pour les gaz (O_2 – CO_2)



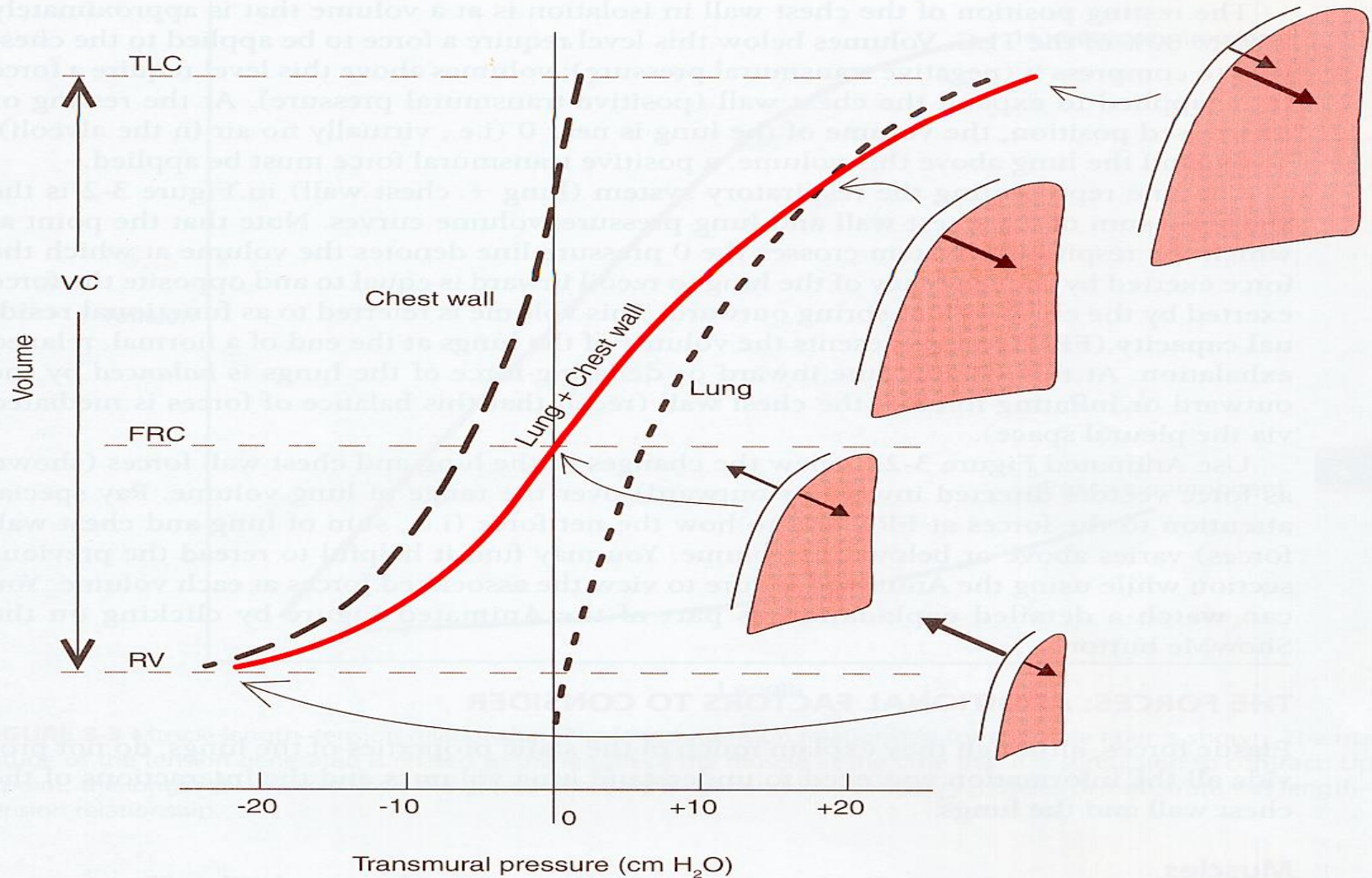
1.4 PROPRIETES MECANQUES DE L'ECHANGEUR

1.4.1 PROPRIETES MECANIKUES STATIQUES DE L'ECHANGEUR

Forces élastiques s'opposant au mouvement

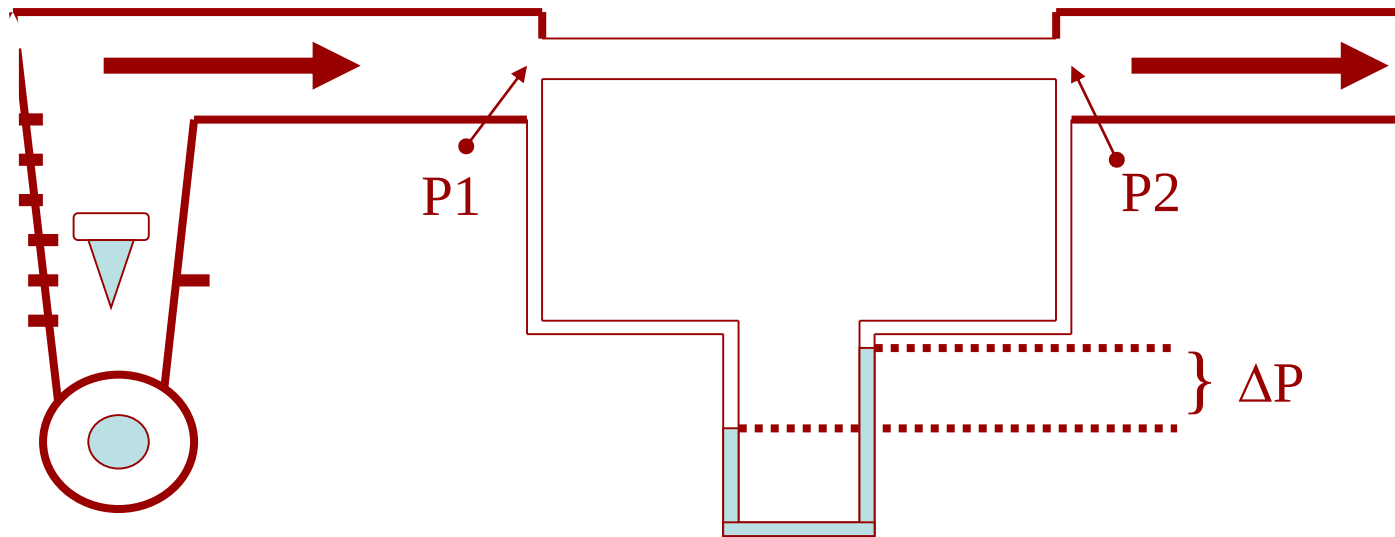


Relation pressure – volume statique



1.4.2 PROPRIETES MECANIKUES DYNAMIQUES DE L'ECHANGEUR

Résistances



Débit gazeux

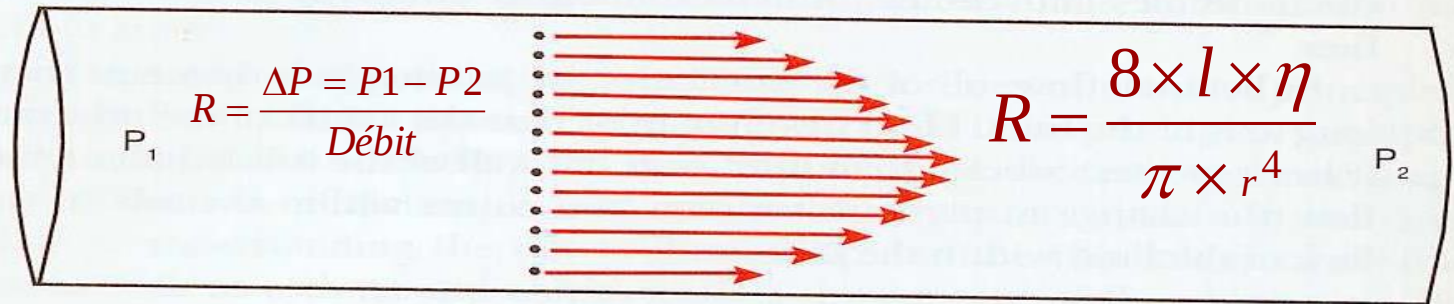
$$R = \frac{\Delta P = P1 - P2}{Débit}$$

Régimes d'écoulement

Movement of molecules

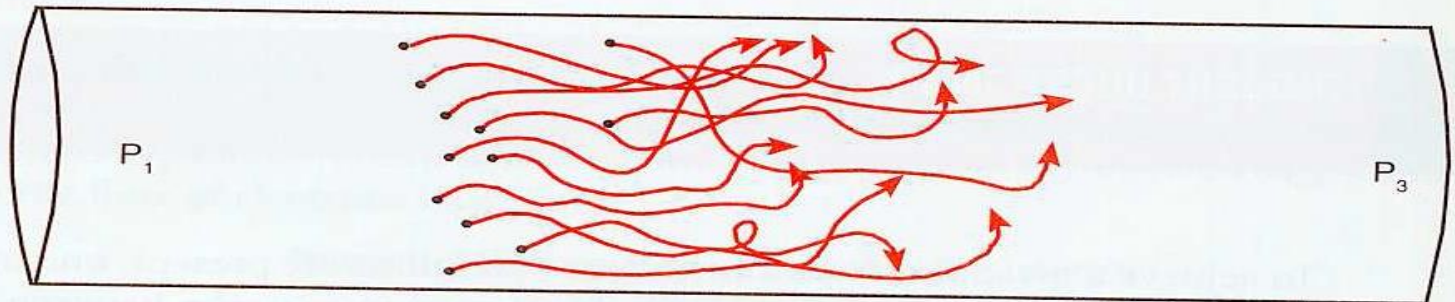
Laminar

$\Delta P \propto \text{Flow}$



Turbulent

$\Delta P \propto (\text{Flow})^2$



For same flow, $P_2 > P_3$

Résistance selon le régime d'écoulement

Laminaire



$$R = \frac{8 \times l \times \eta}{\pi \times r^4}$$

Laminaire condition entrée



$$R = \eta^{0.5} \cdot \rho^{0.25} \cdot \dot{V}^{0.5}$$

Laminaire avec ramification



$$R = \eta^{0.5} \cdot \rho^{0.5} \cdot \dot{V}^{0.5}$$

Turbulent lisse (X4)



$$R = \eta^{0.25} \cdot \rho^{0.75} \cdot \dot{V}^{0.75} \cdot l / r^{9.5}$$

Turbulent rugueux

Rugueux



$$R = \text{rugosité} \cdot \dot{V}$$

Régimes d'écoulement

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{u \cdot \rho \cdot D}{\eta} = \frac{\dot{V} \rho}{\eta \pi D} = \frac{Fi}{Fv}$$

U : vitesse du gaz (cm/sec)

V : débit (cm³/s).

D : diamètre du tube (cm).

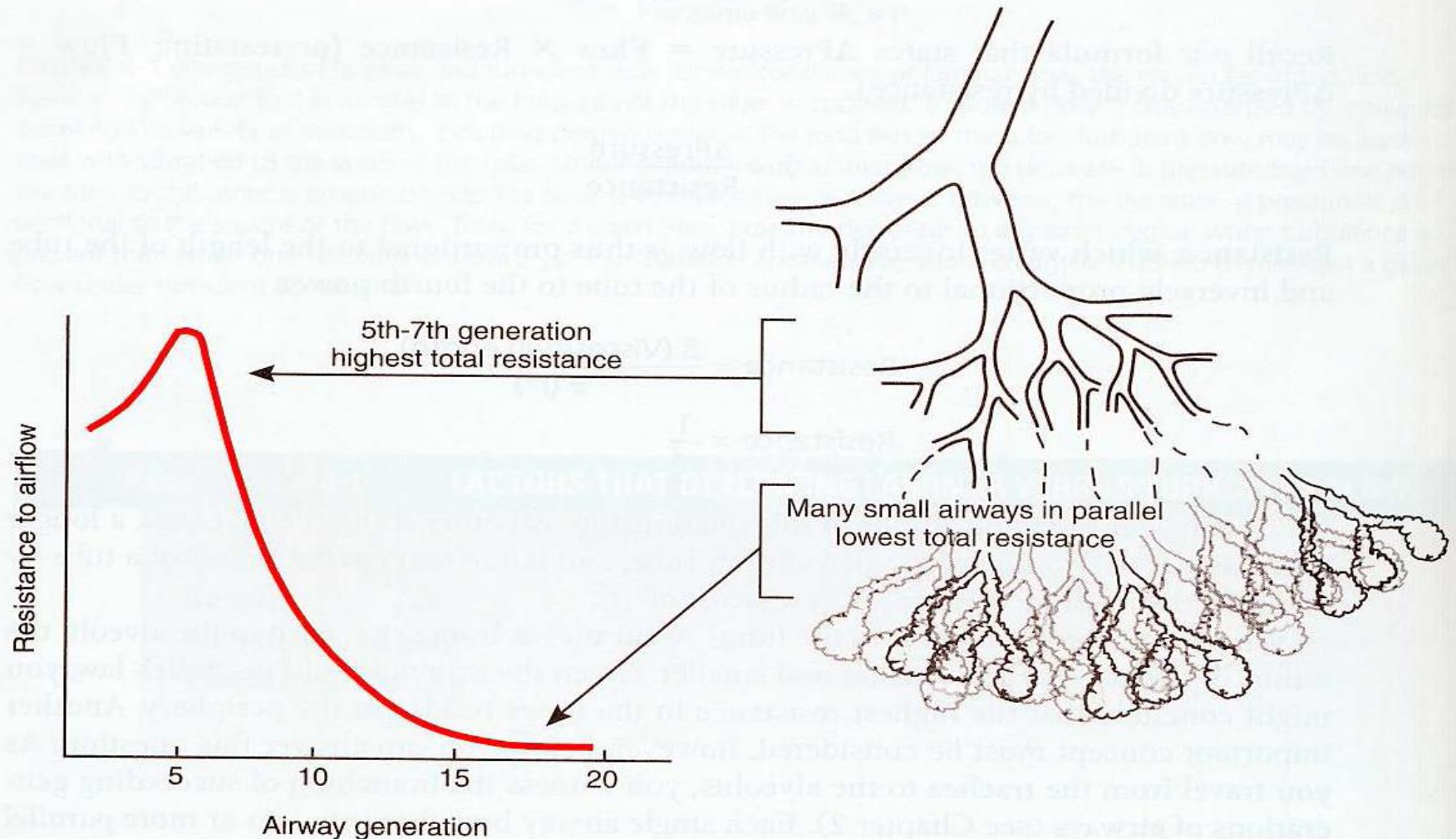
ρ : densité (g/cm³)

η : viscosité dynamique (micropoise)

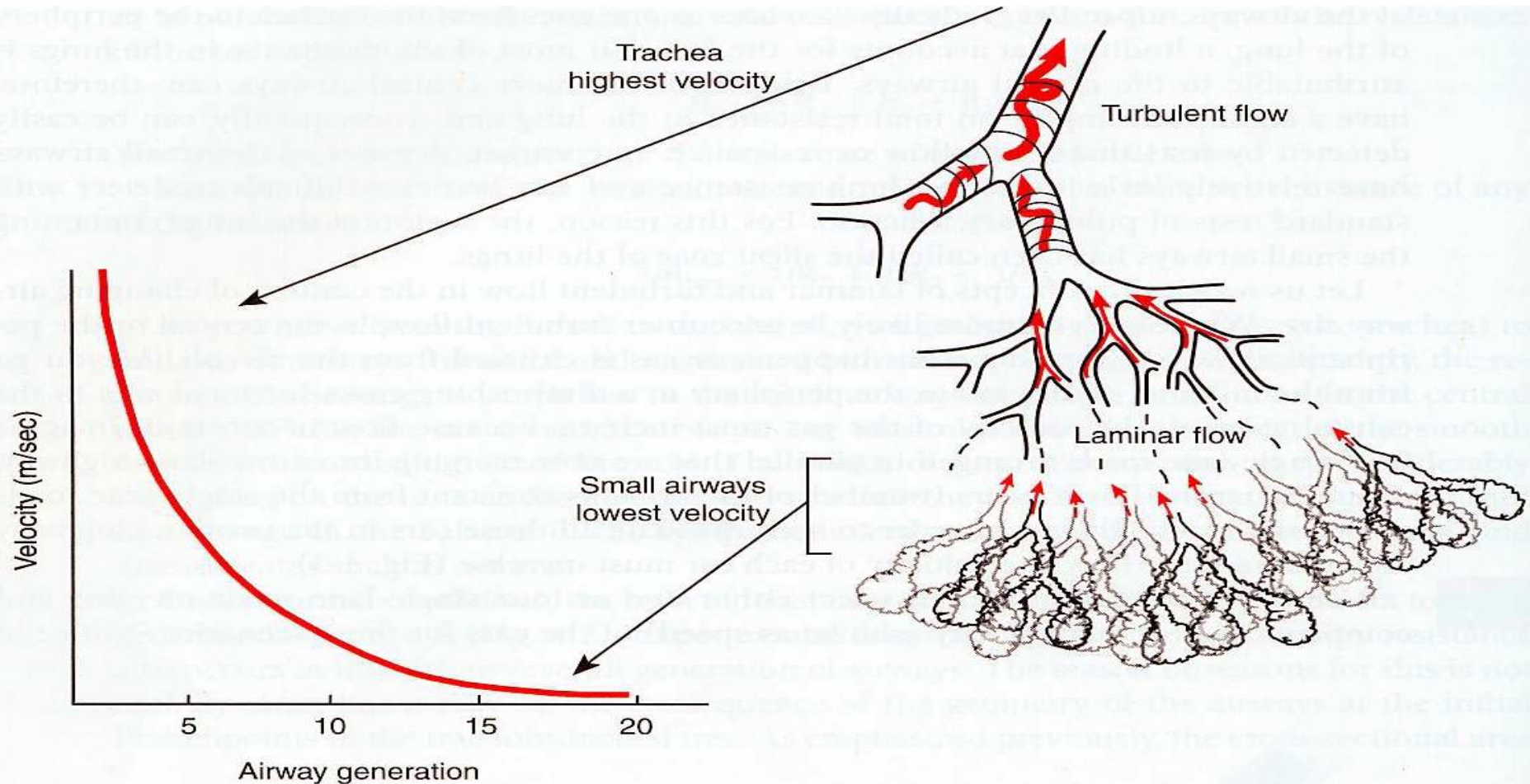
< 1000 - Transitionnel - > 4000

Laminaire - Transitionnel - Turbulent

Répartition des résistances dans le poumon

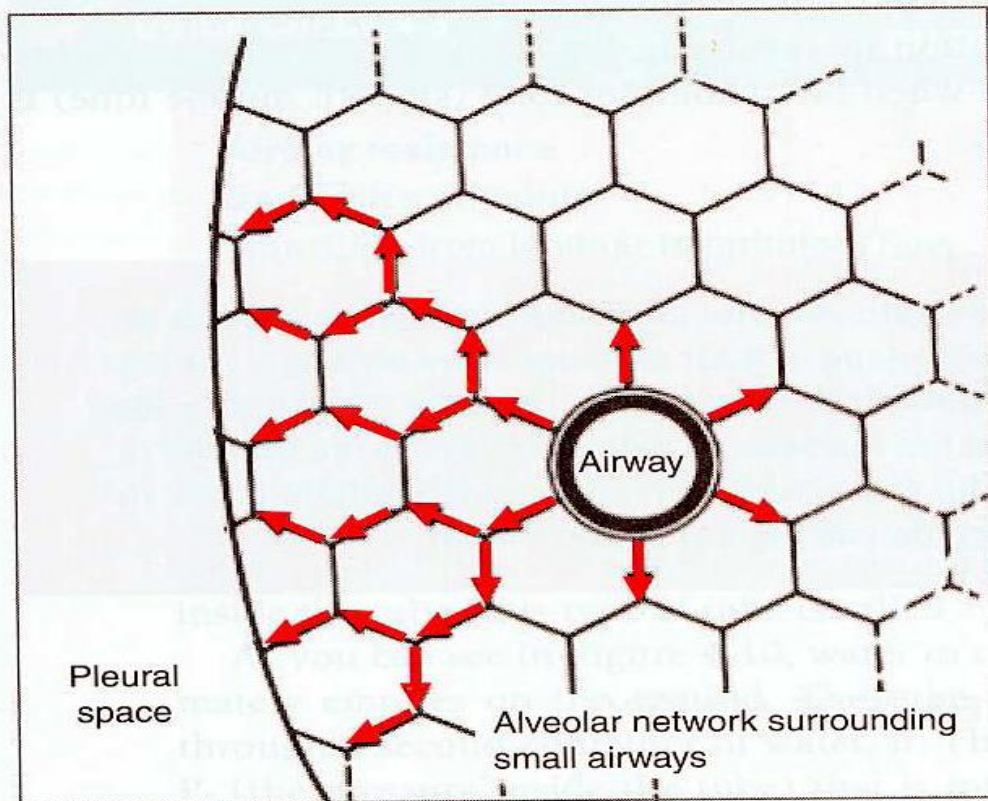


Régimes d'écoulement dans les voies aériennes

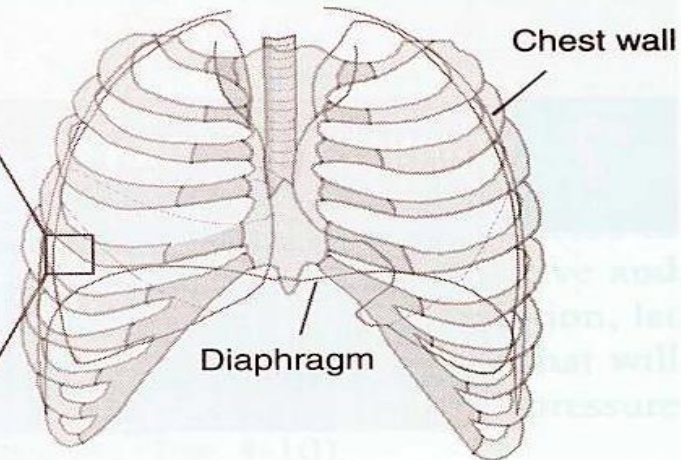


Résistances et volumes pulmonaires

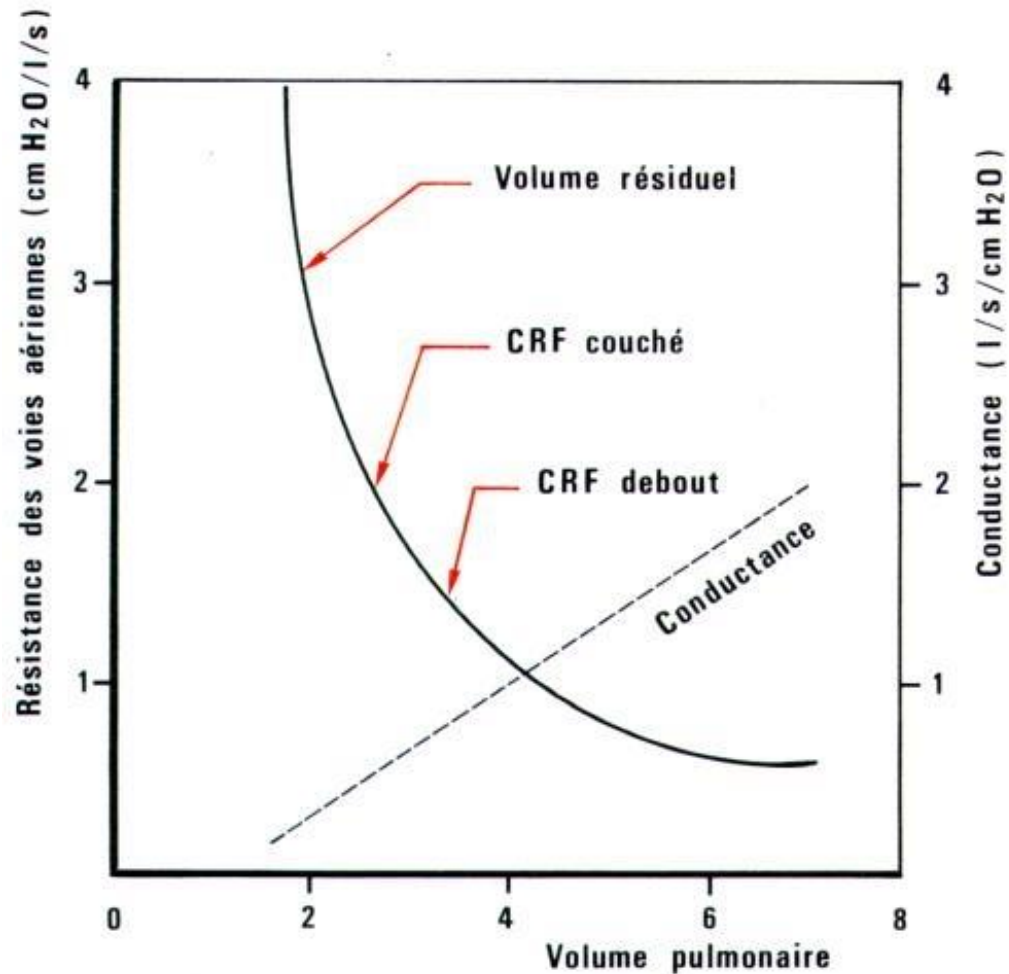
Cross-sectional cut of lung



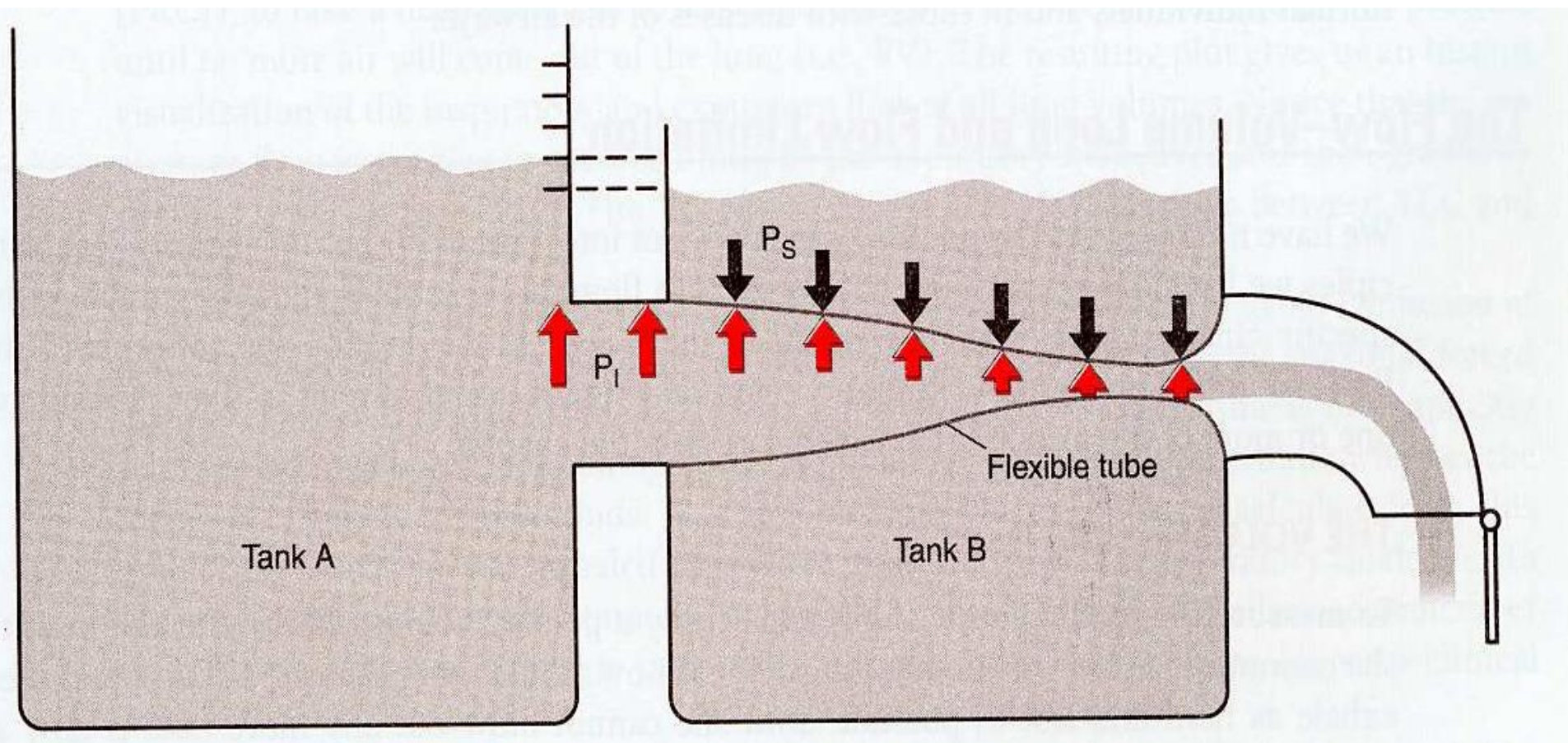
 = tethering forces



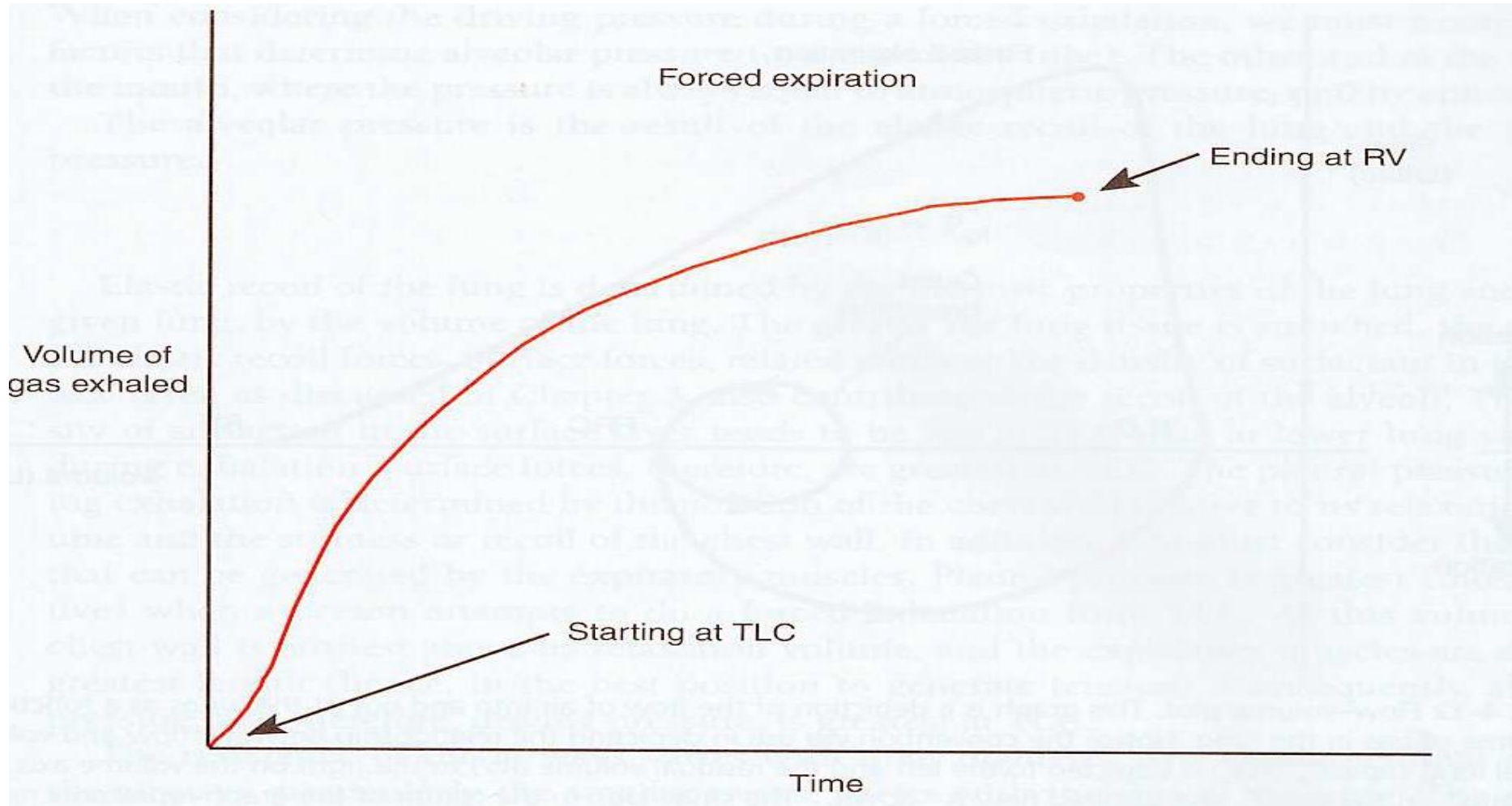
Résistances et volumes pulmonaires



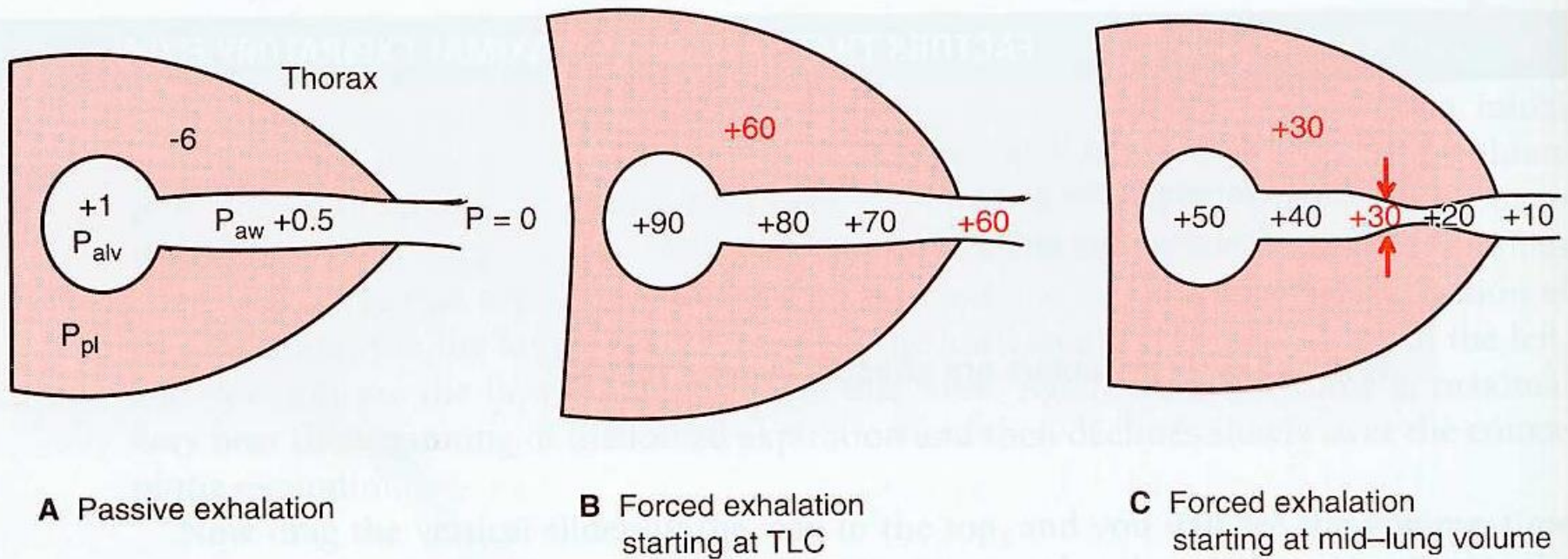
Limitations des débits expirés



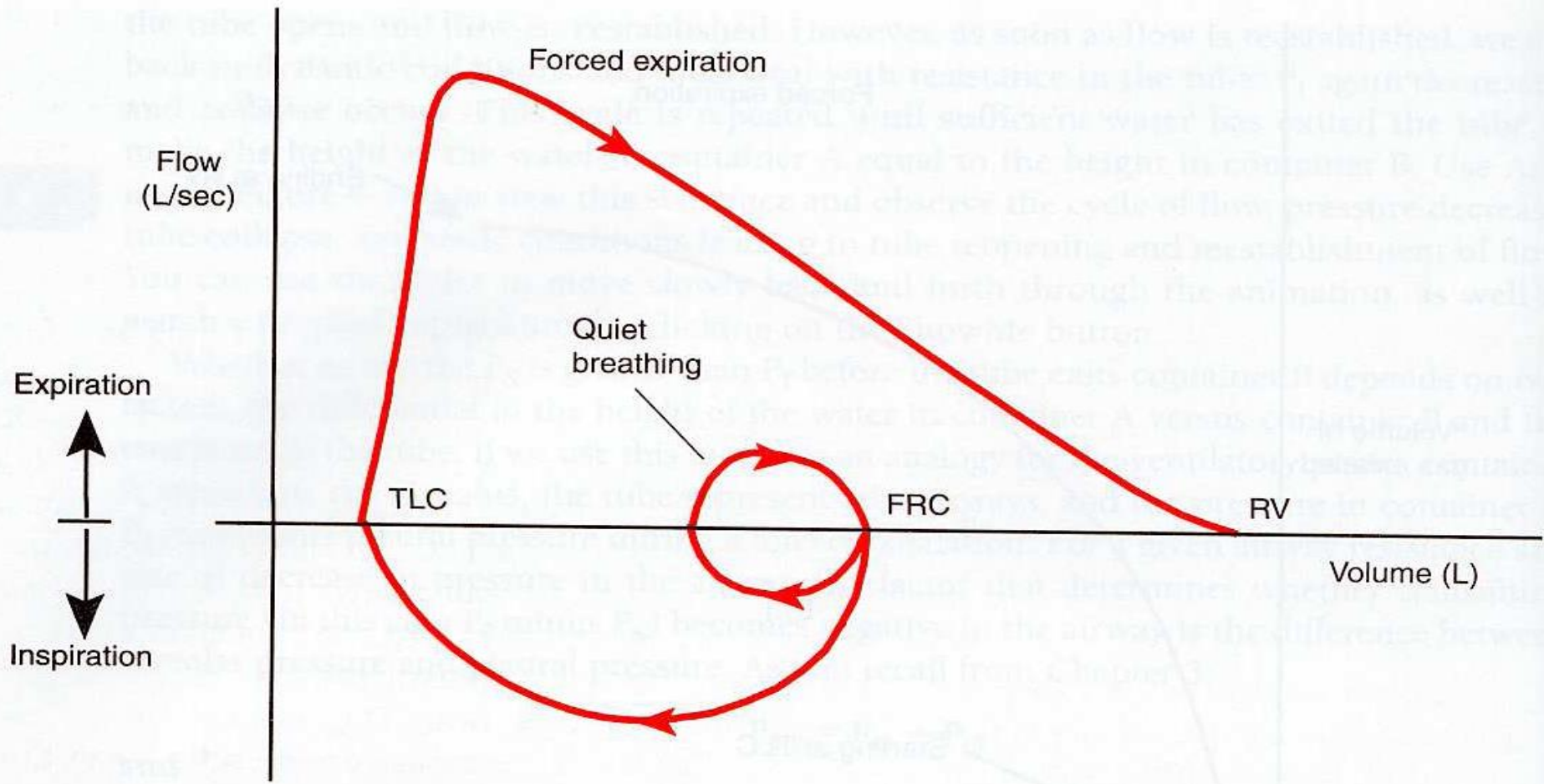
Limitations des débits expirés



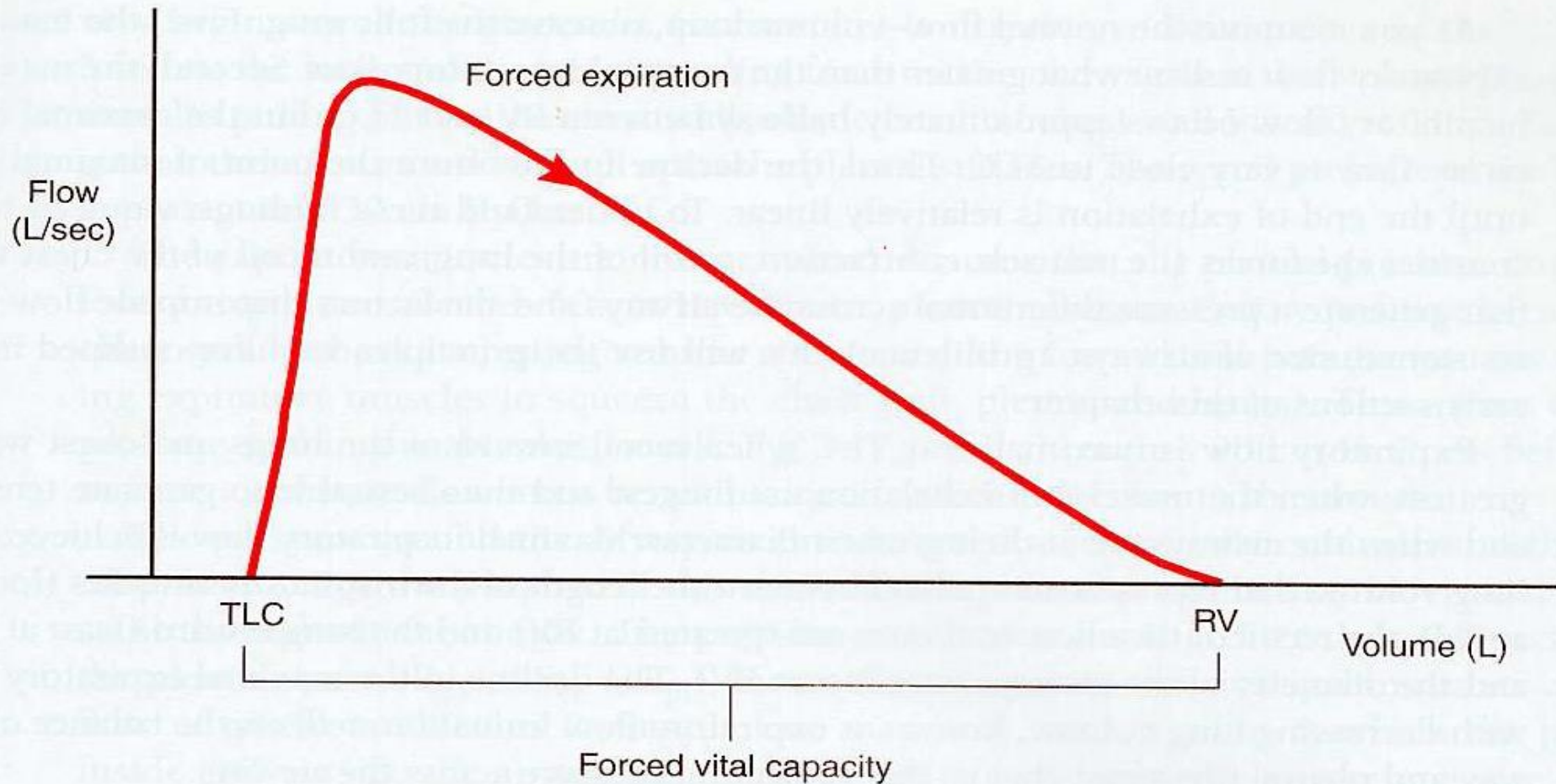
Limitations des débits expirés – Point d'égale pression



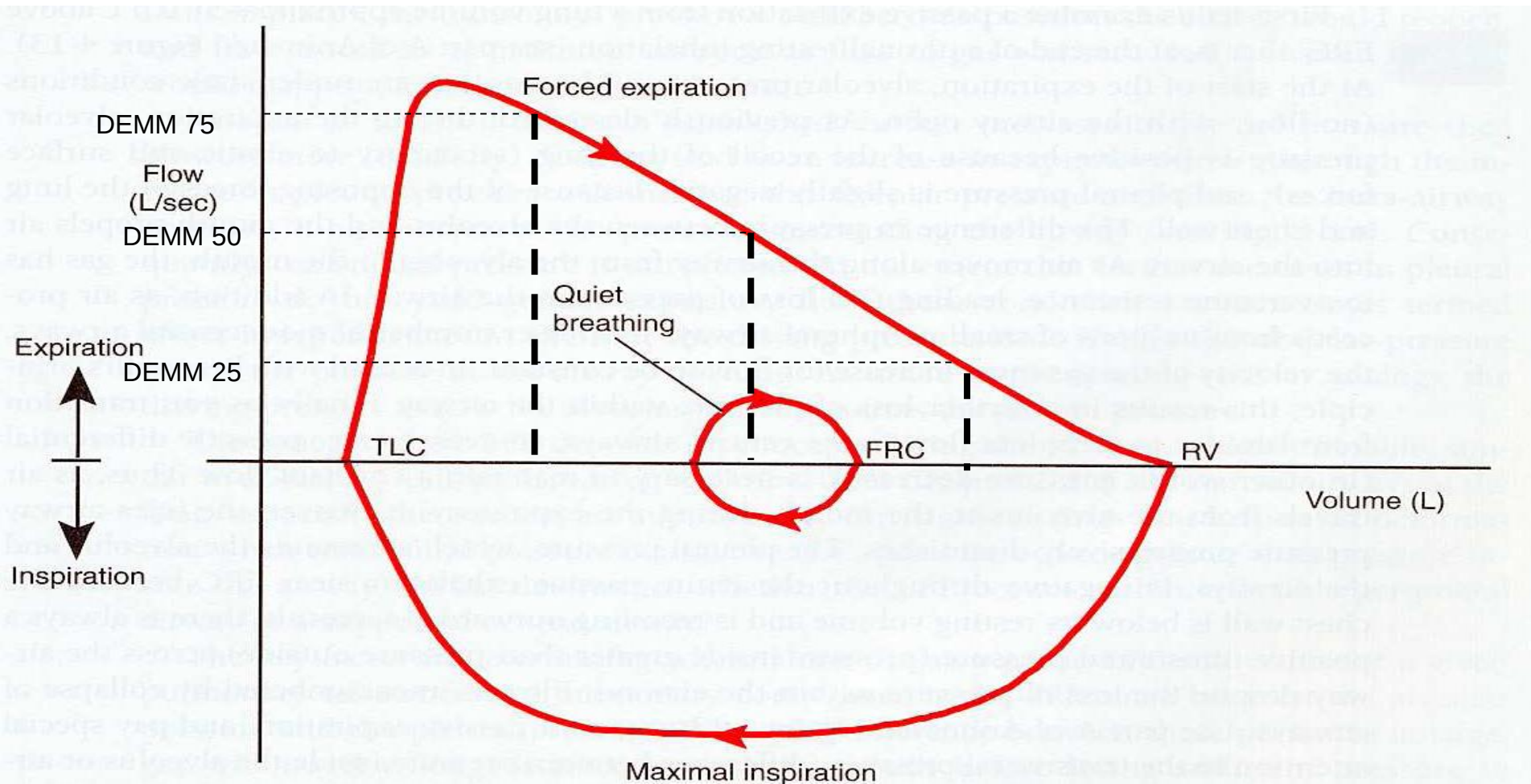
Courbe débit-volume



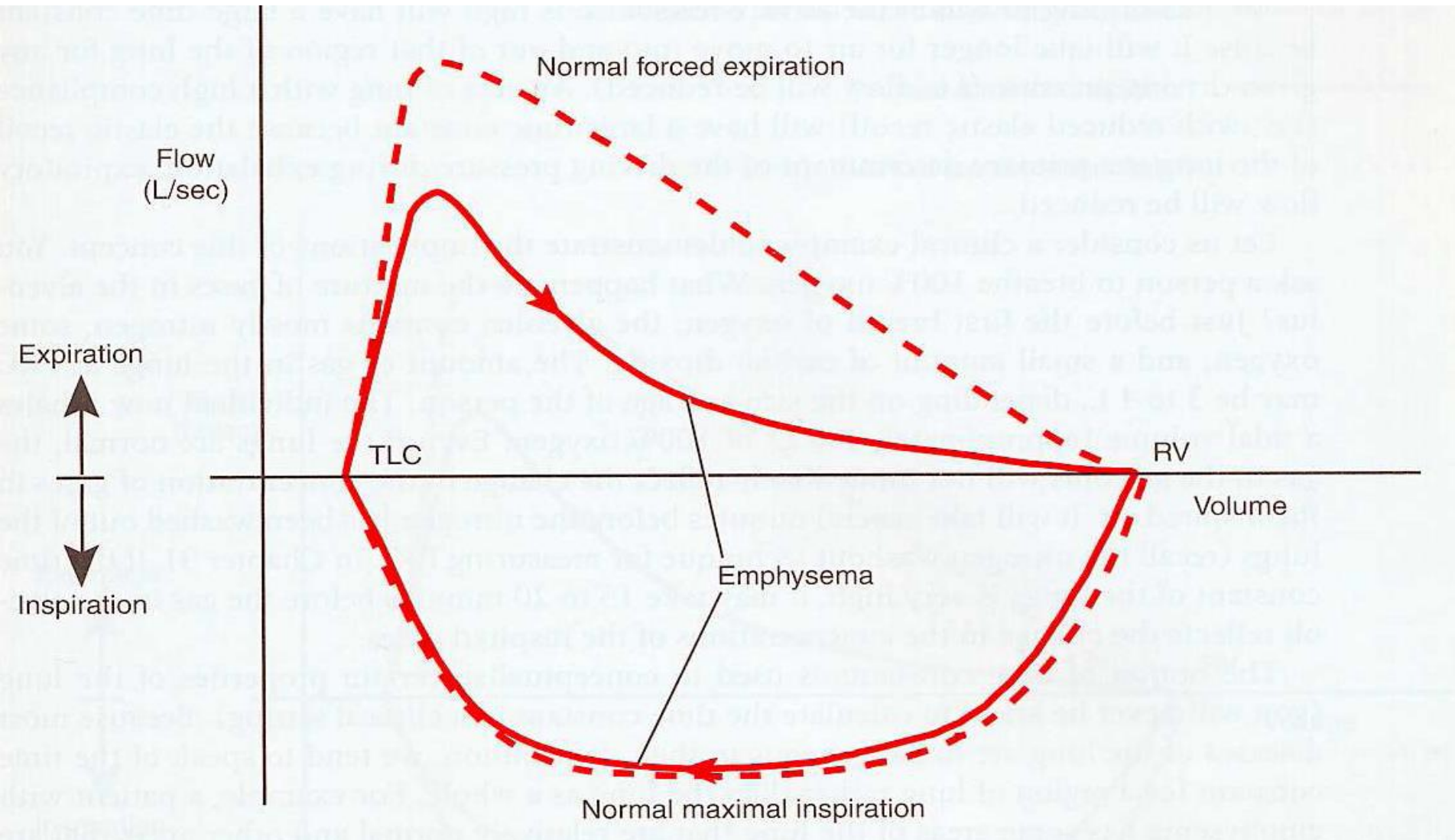
Courbe débit-volume



Courbe débit-volume



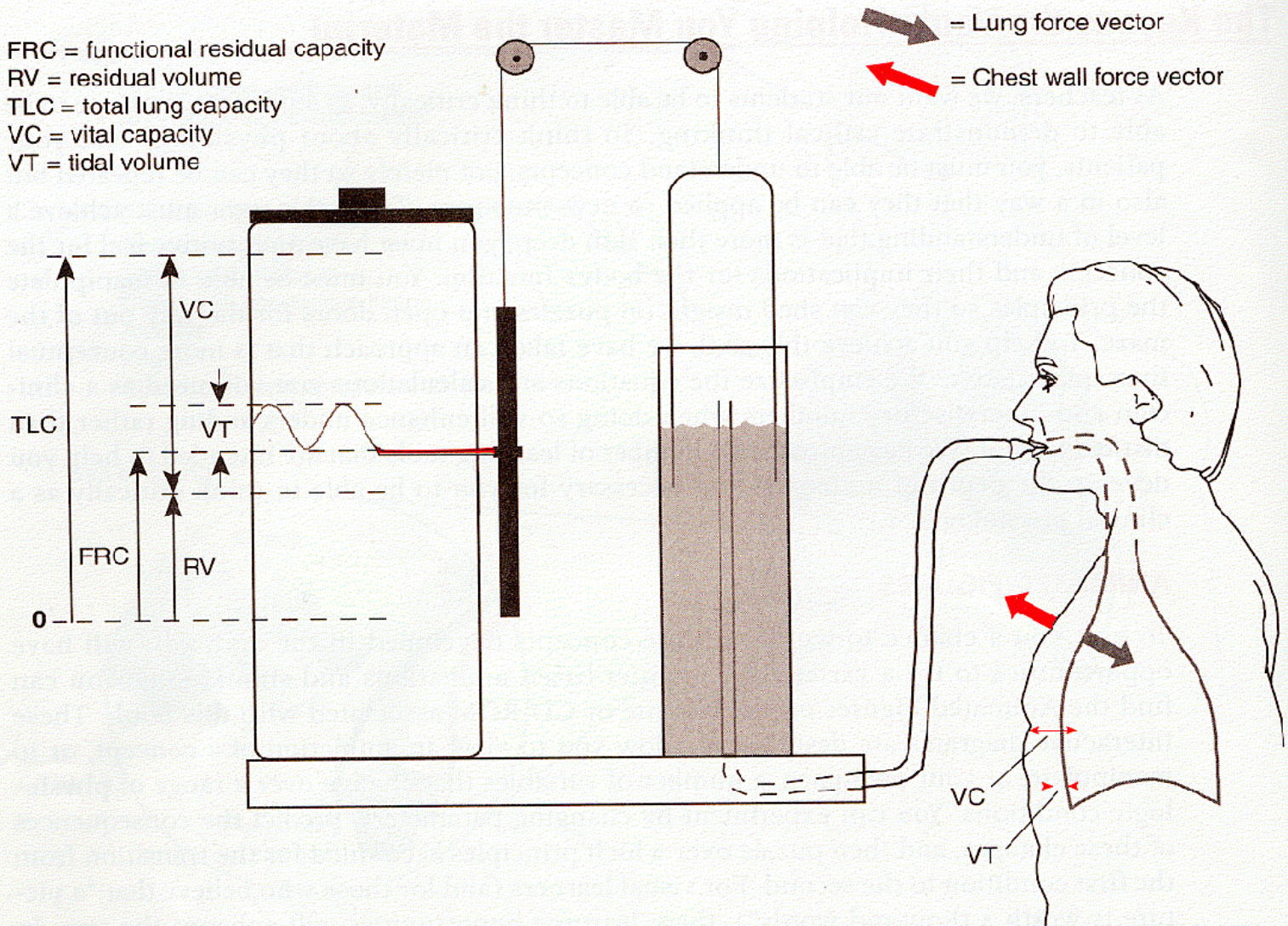
Courbe débit-volume



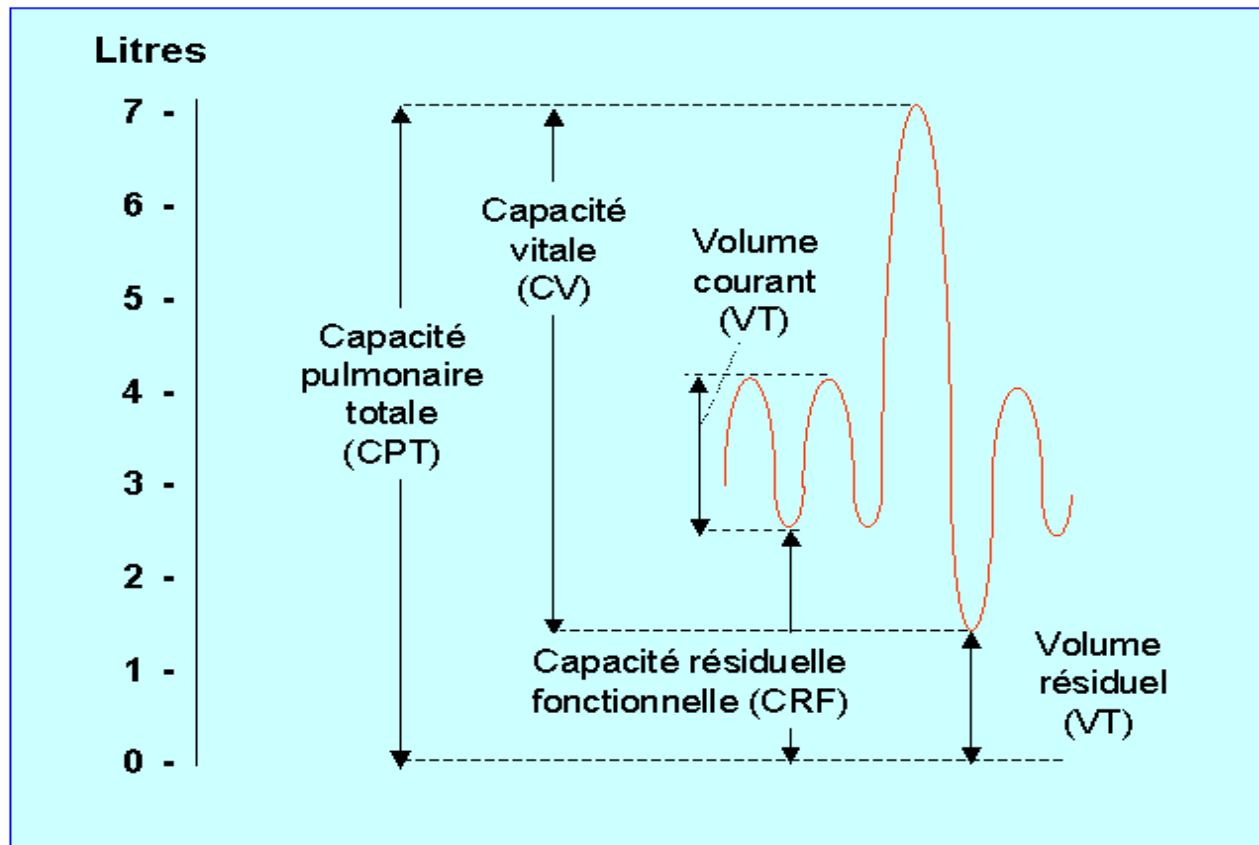
1.4.3 VOLUMES PULMONAIRES

Volumes pulmonaires

FRC = functional residual capacity
RV = residual volume
TLC = total lung capacity
VC = vital capacity
VT = tidal volume



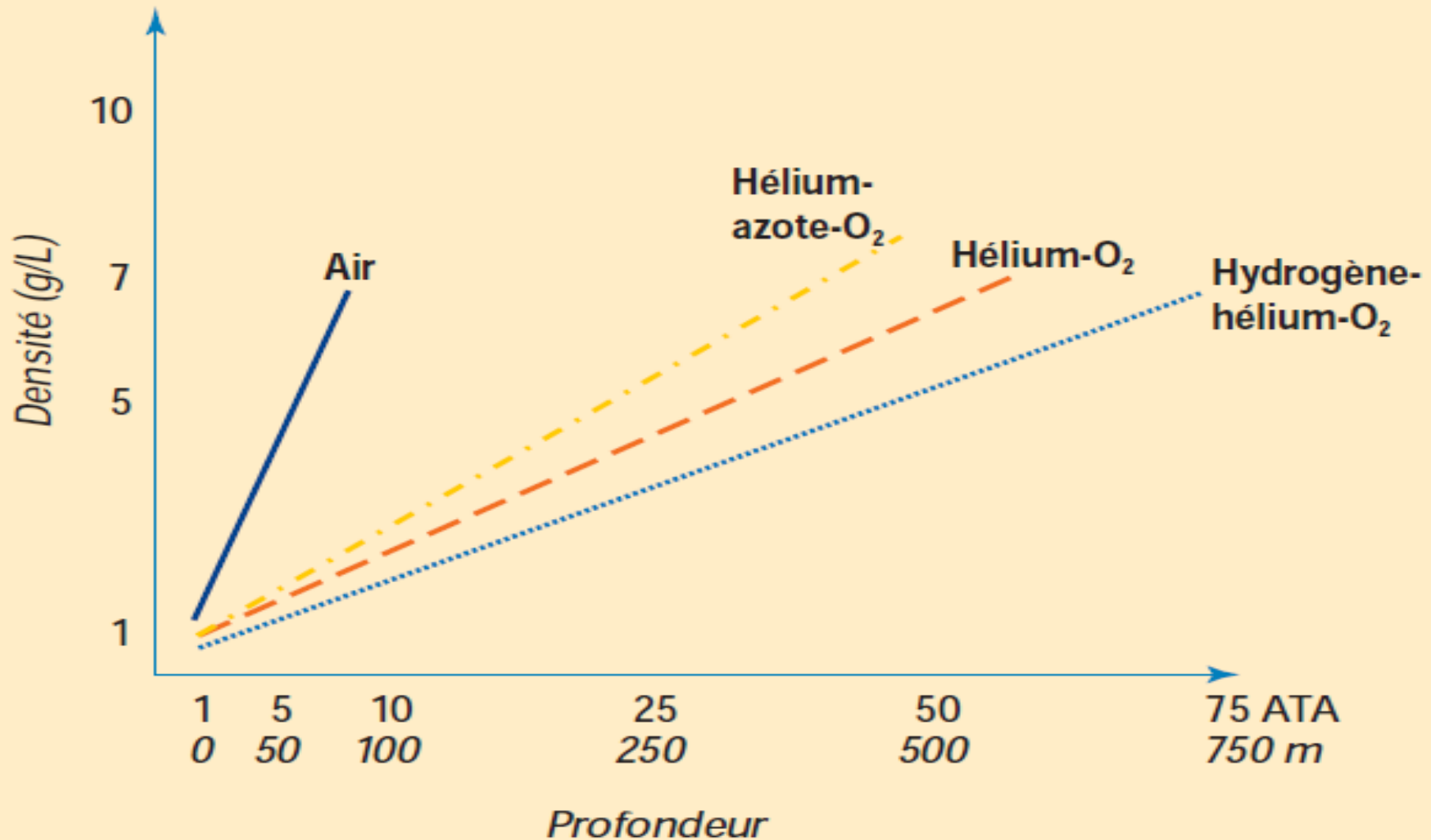
Volumes pulmonaires



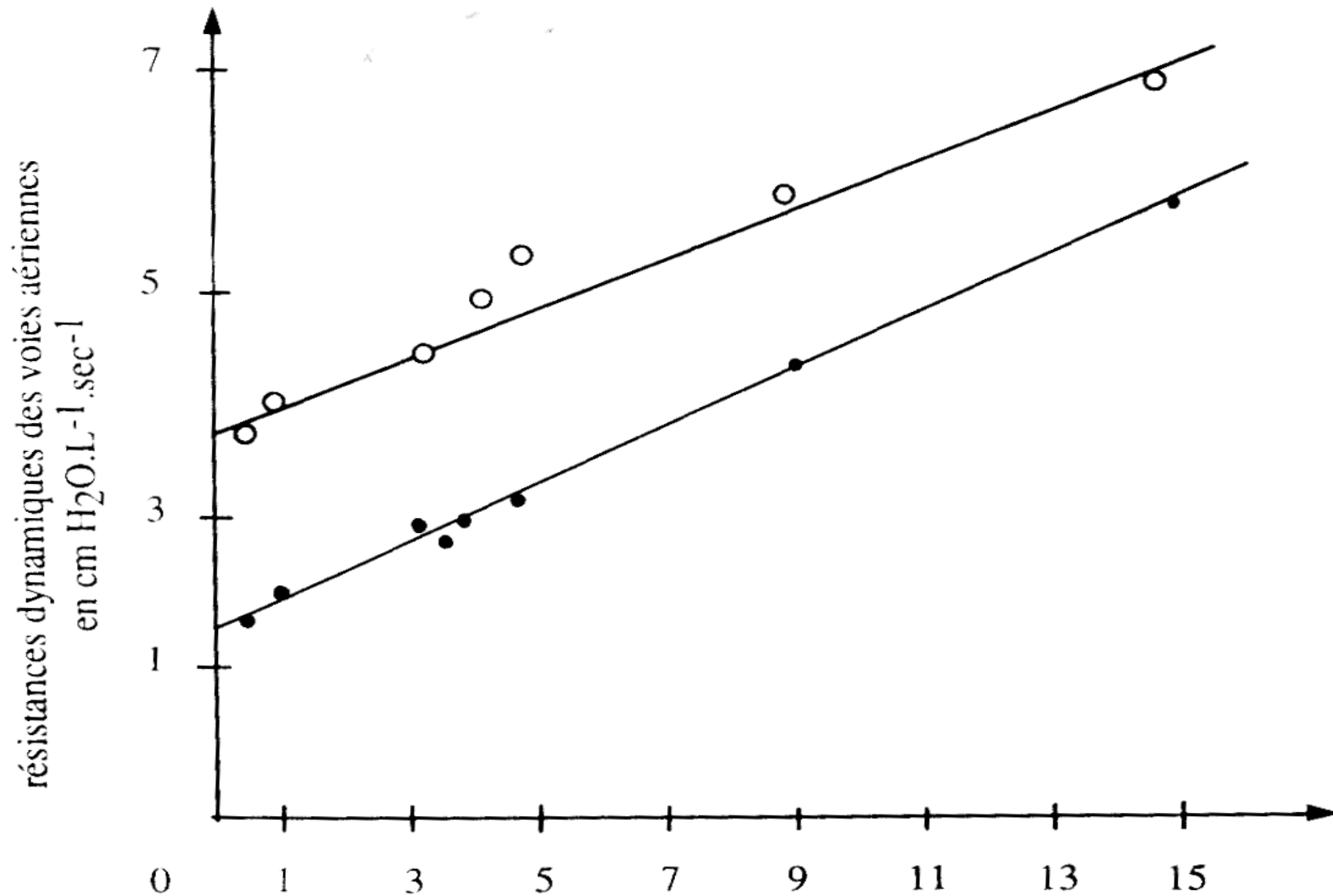
2. EFFETS DE L'HYPERTHERMIE SUR LA FONCTION RESPIRATOIRE

2.1 EFFETS DE L'HYPERTENSION SUR LA MECANIQUE VENTILATOIRE

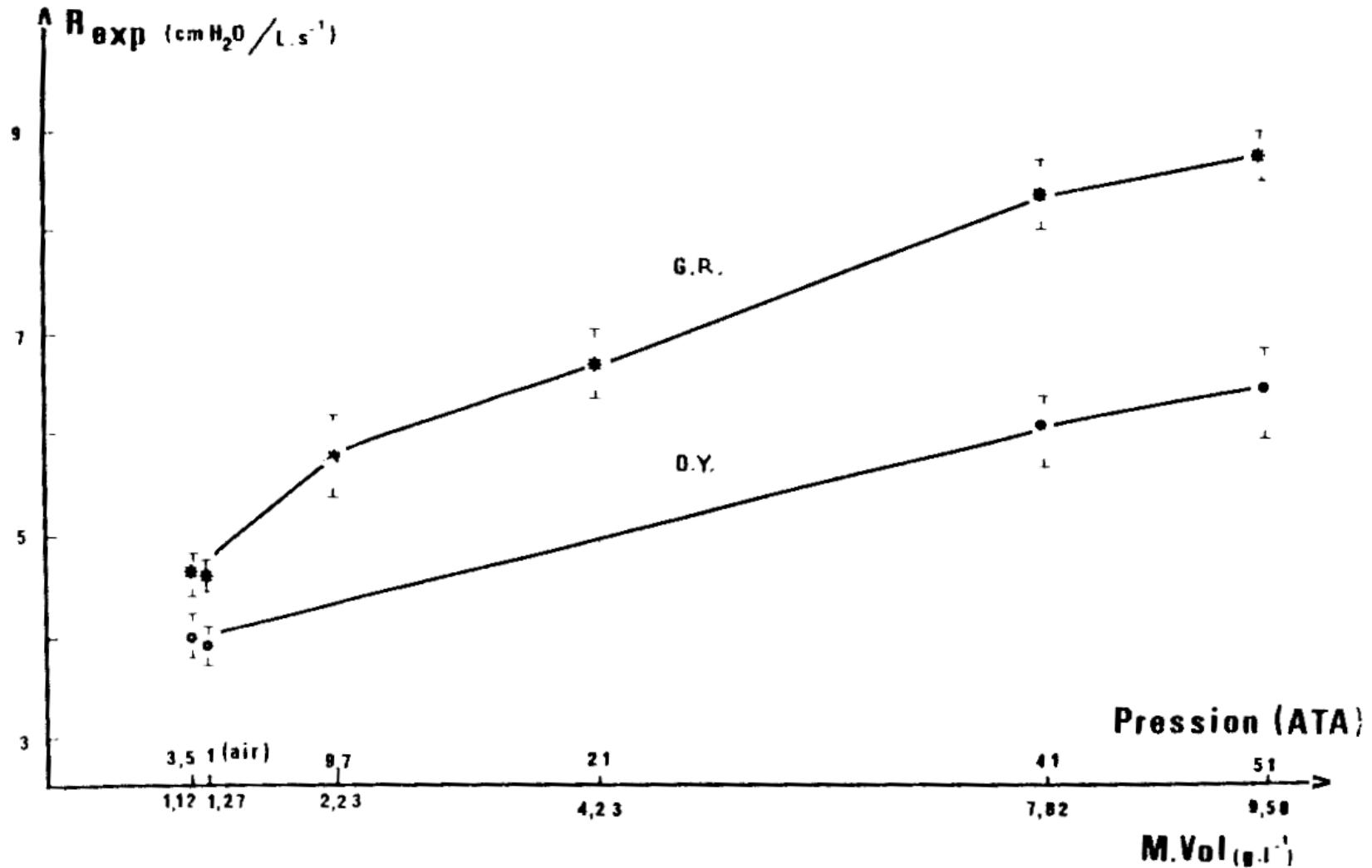
Densité des mélanges utilisés en hyperbarie selon la profondeur



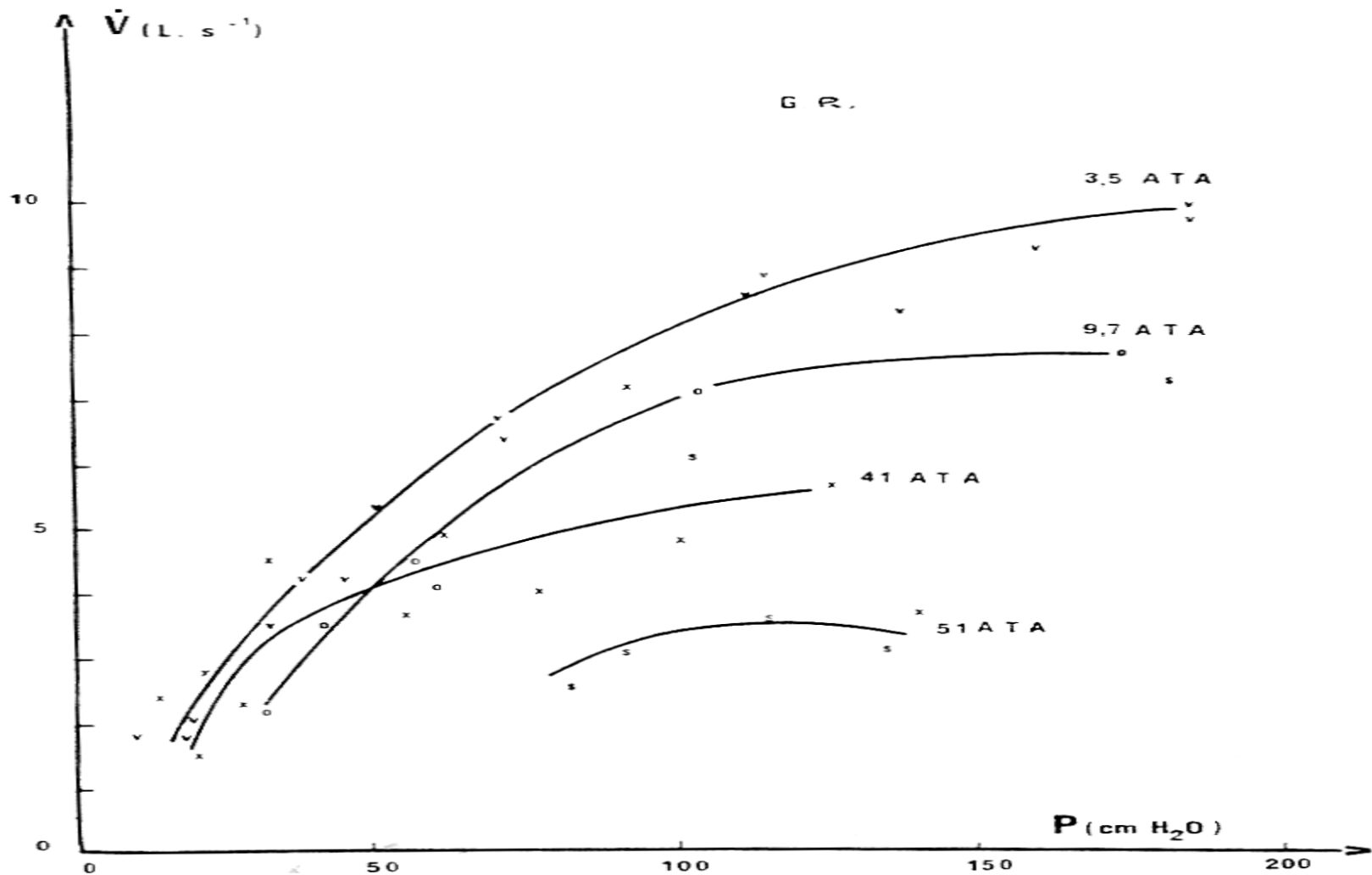
Rinsp selon la densité gazeuse chez 2 plongeurs



Résistances expiratoires selon la profondeur

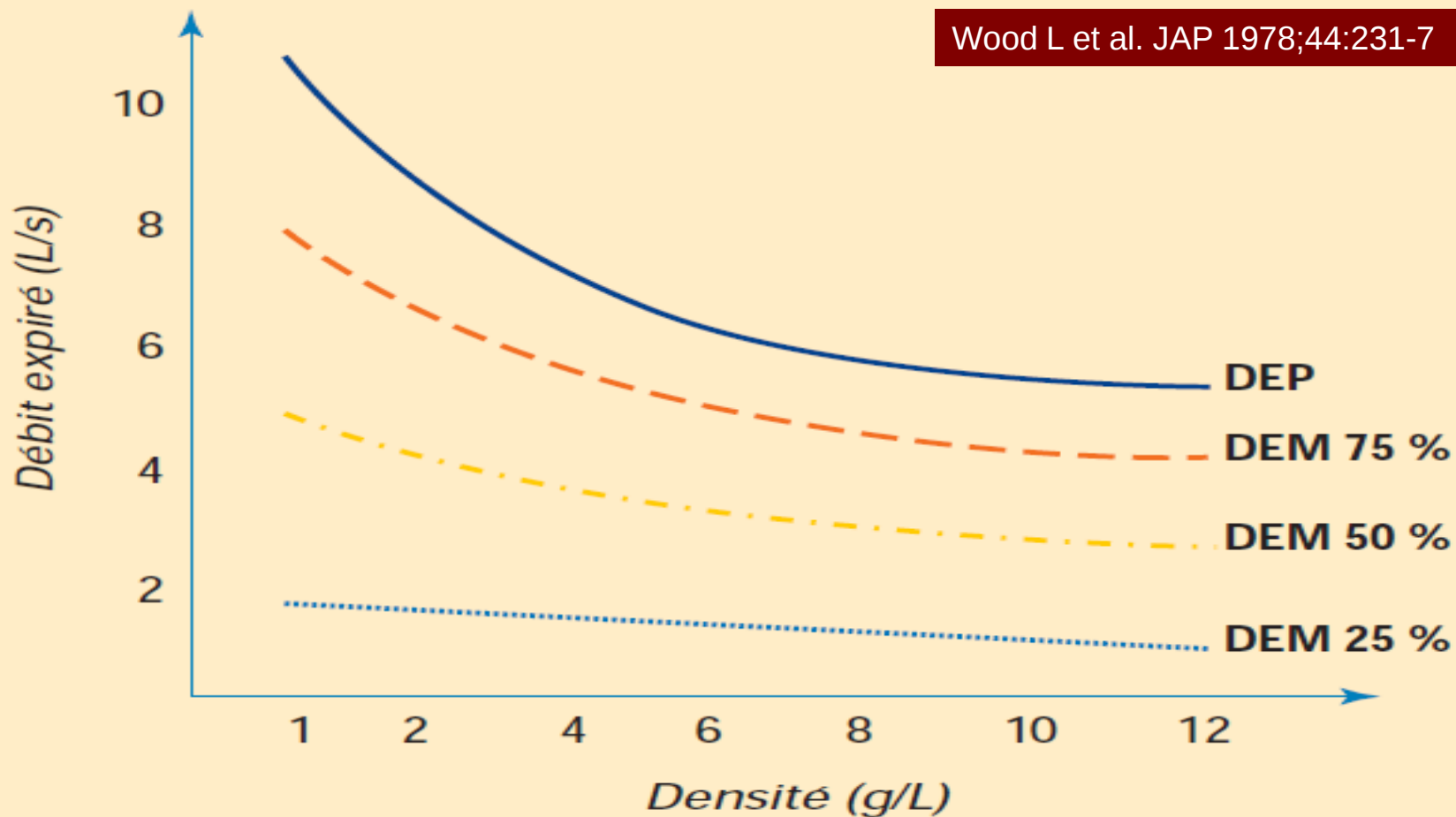


Courbes Isovolumes (75 % CV) Débit-Pression chez un plongeur de 3.5 à 51 ATA

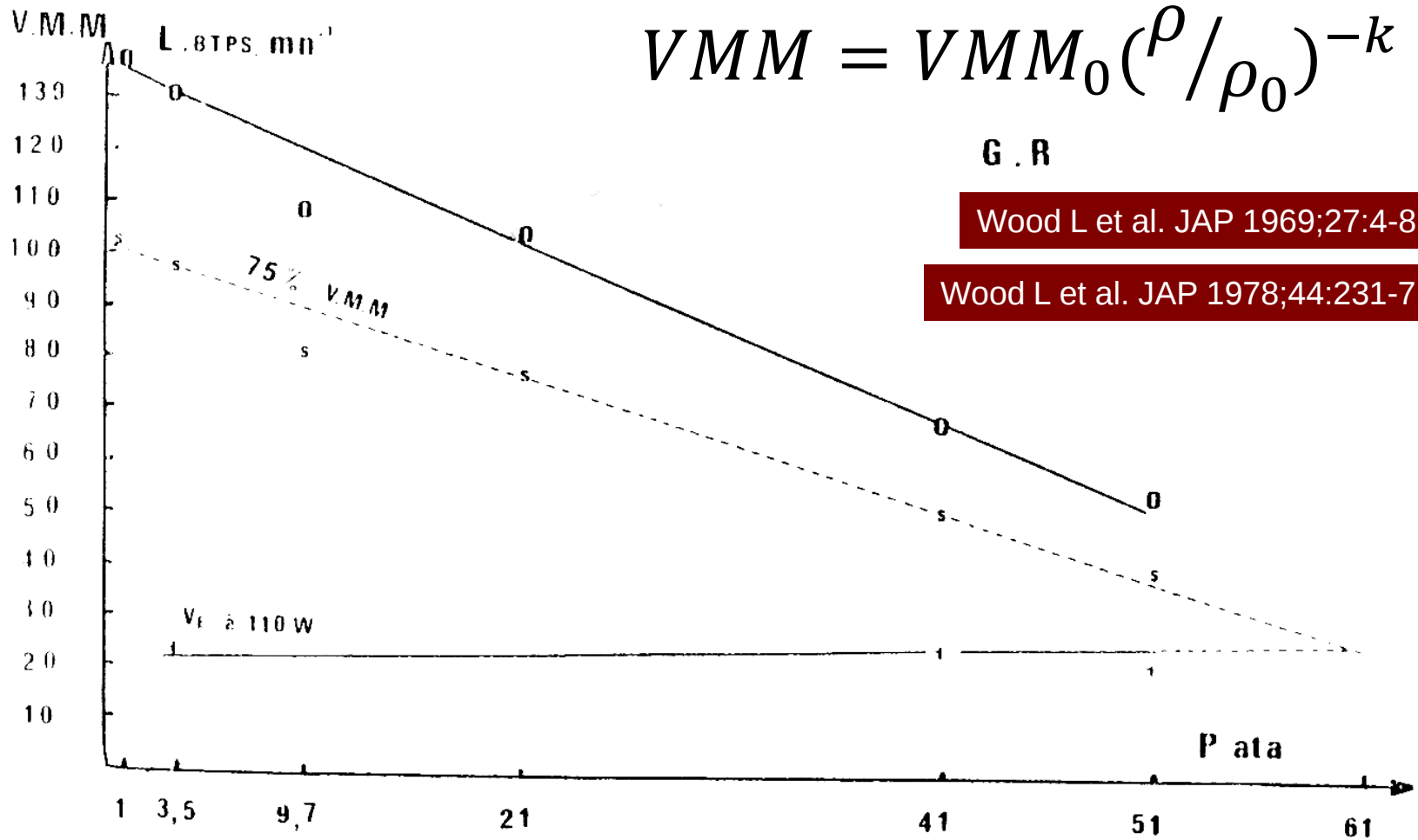


Courbes des Débits expirés en fonction de la densité

Wood L et al. JAP 1978;44:231-7

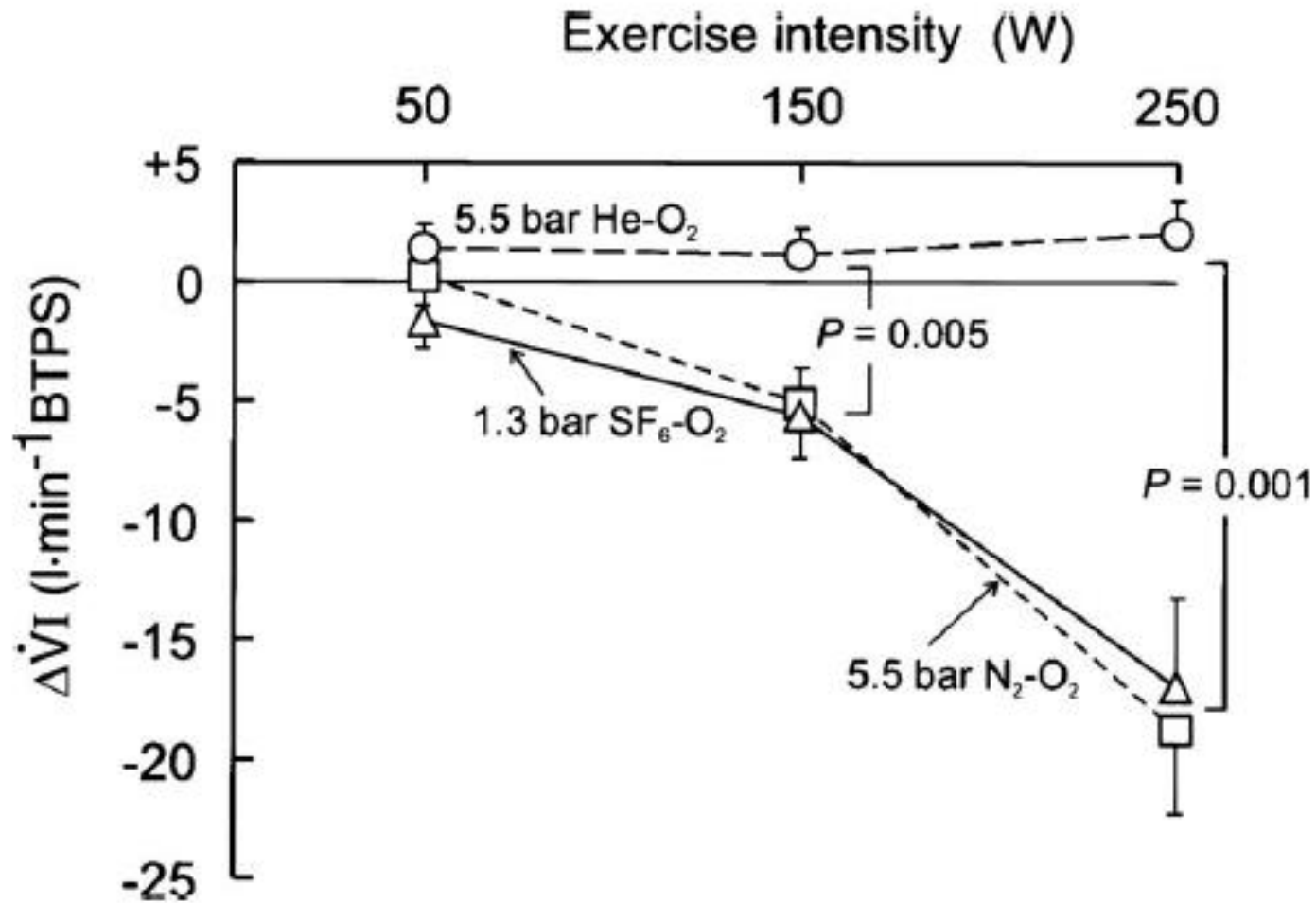


VMM en fonction de la pression

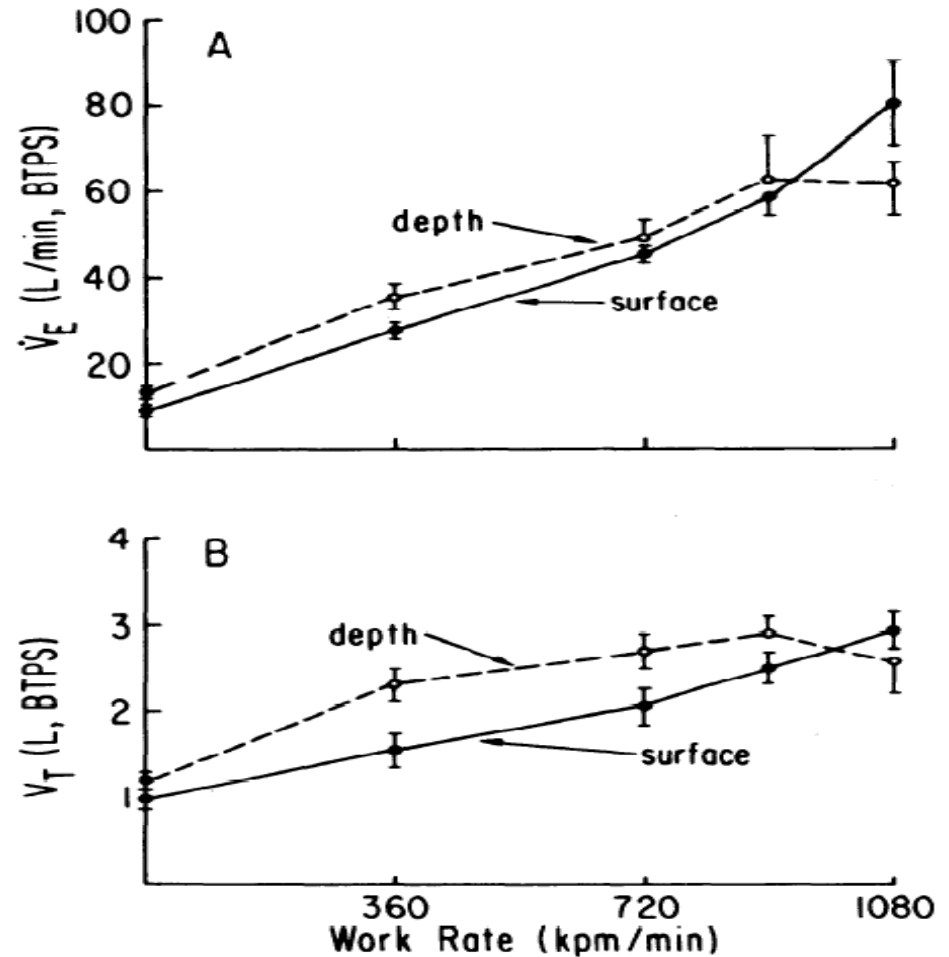
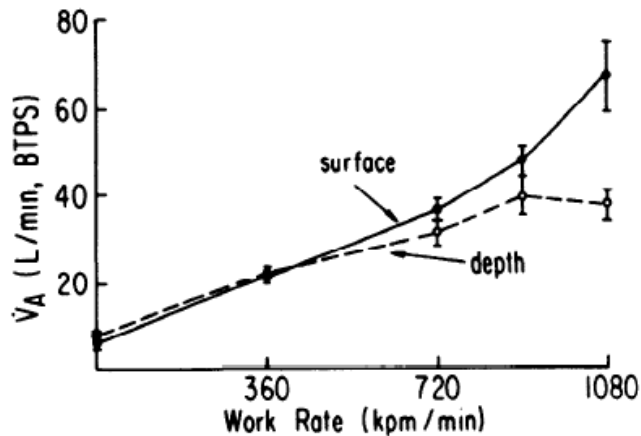


VMM = Ventilation Maximale Minute

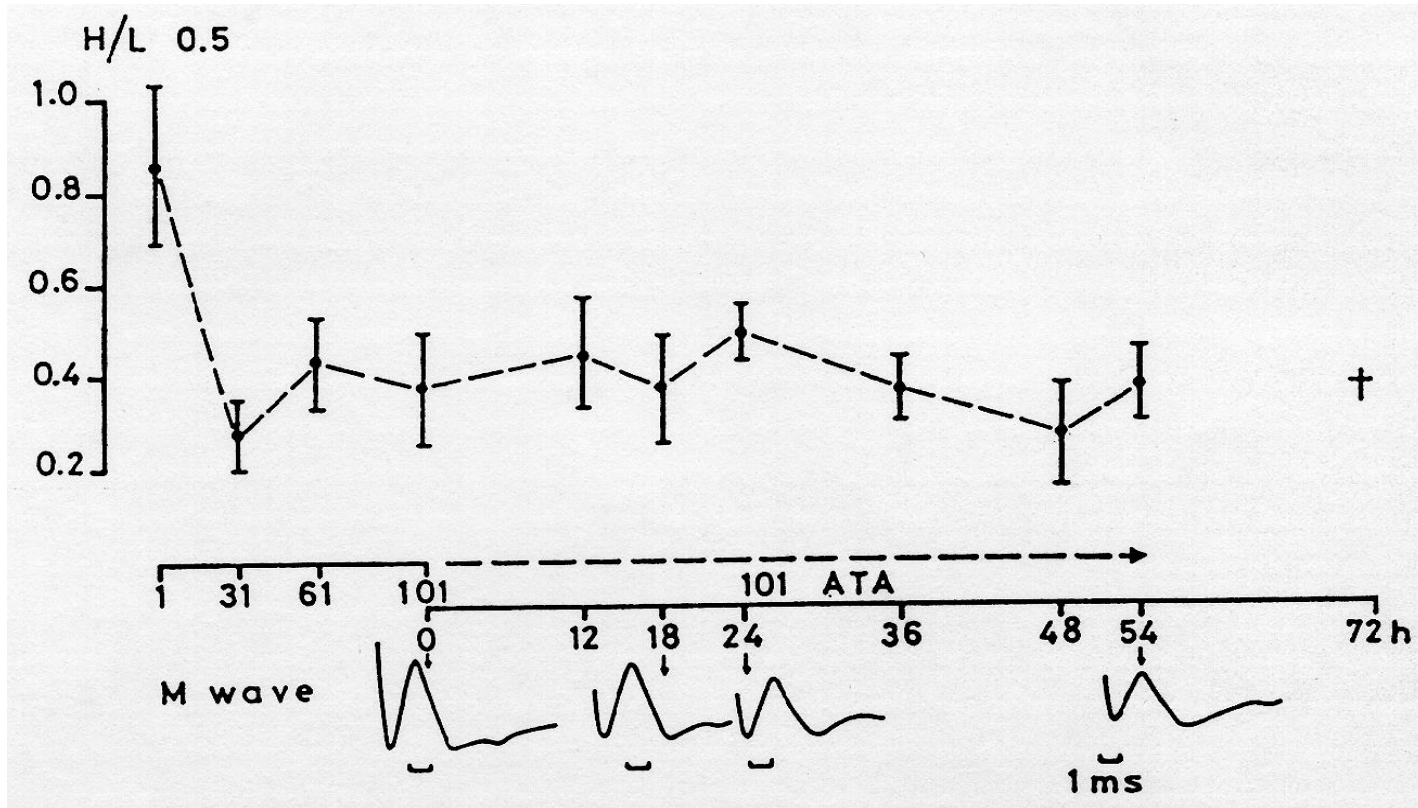
Effect of gas density on ventilatory response to exercise.



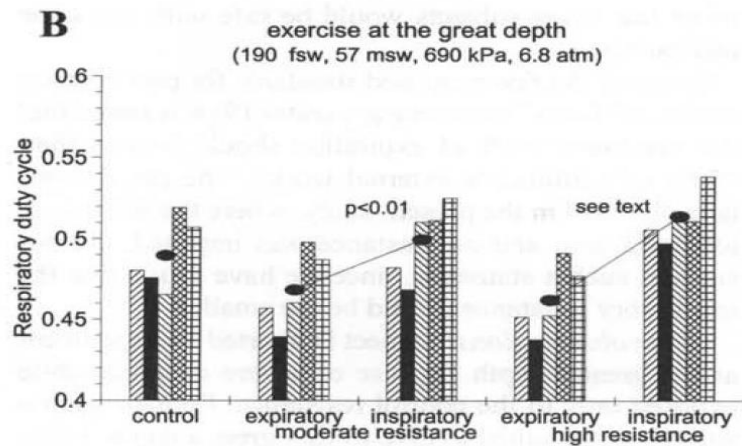
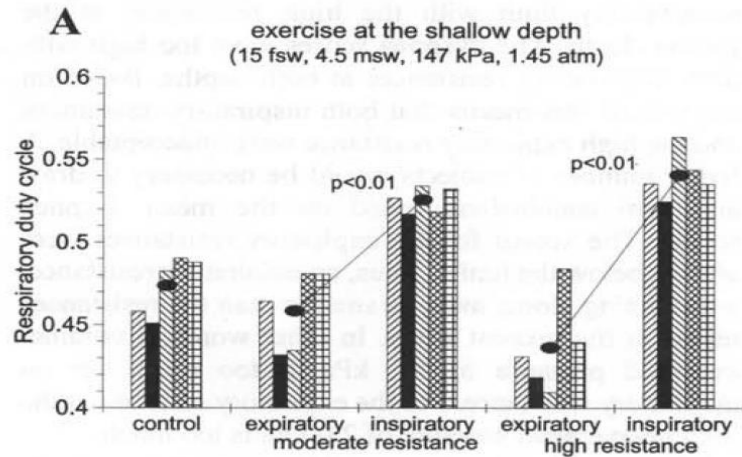
VE, VA, VT selon la profondeur au repos et a l'effort (5 sujets)



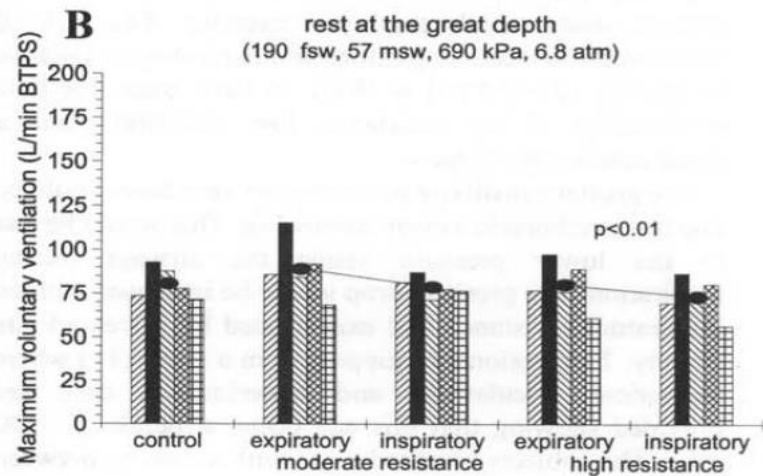
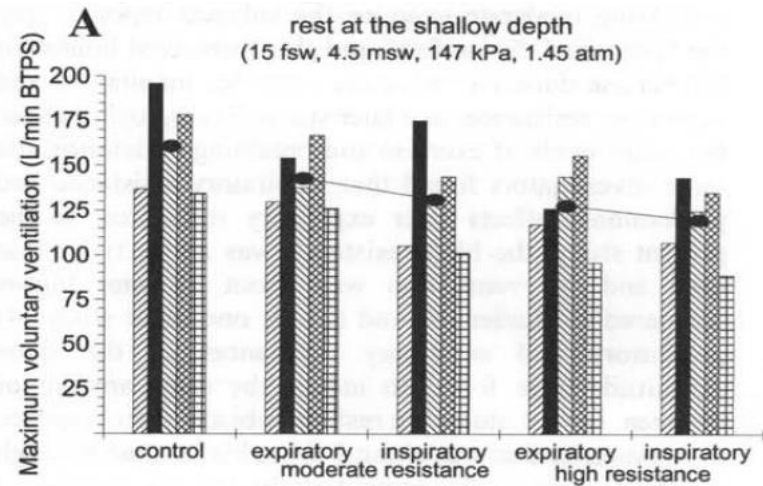
Signes de fatigue diaphragmatique chez le chat à 101 ATA



Rôle de l'appareillage



▨ A ■ B ▨ C ▨ D ▨ E • mean



▨ A ■ B ▨ C ▨ D ▨ E • mean

Conséquences de l'hyperbarie sur les résistances

- Augmentation des résistances inspiratoires
 - + de flux turbulent,
 - augmentation des résistances au flux turbulent,
- Augmentation des résistances expiratoires :
 - en début d'expiration (flux turbulent)
- Compression dynamique des voies aériennes intrapulmonaires,
- Compression sur les voies aériennes extra-pulmonaires.

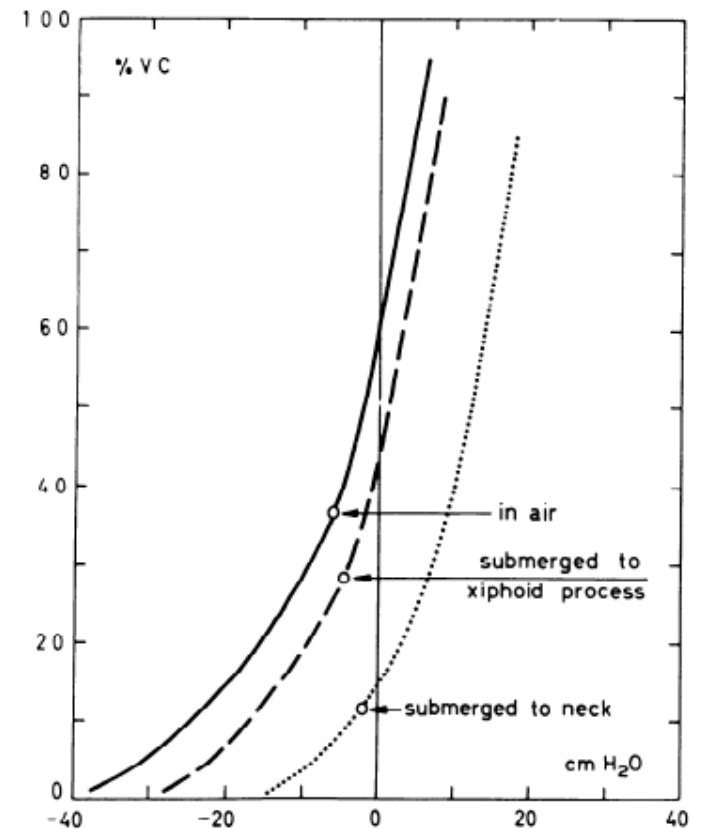
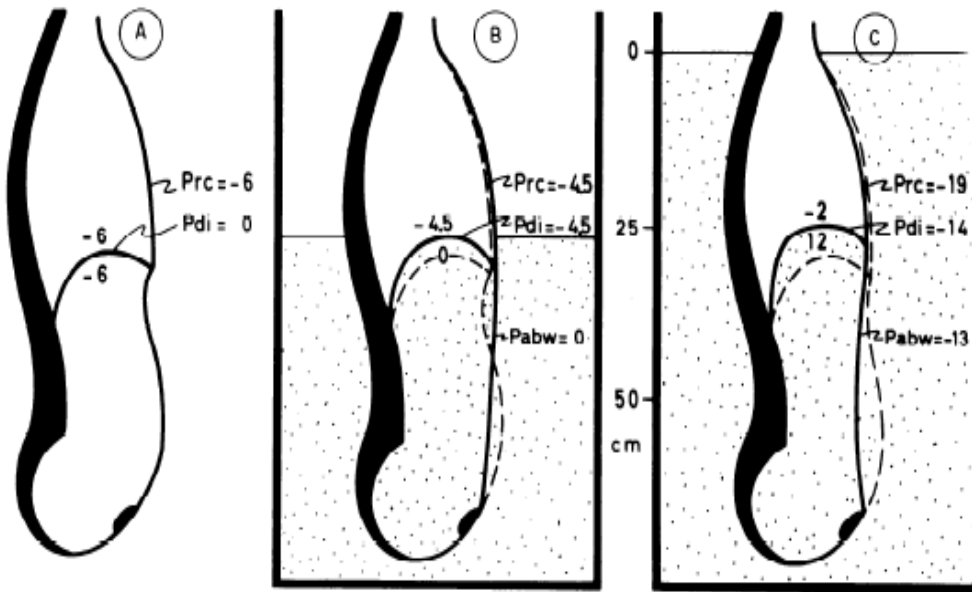
Mécanique ventilatoire statique

Le système respiratoire immobile

Effet de l'augmentation de la pression ambiante

- Baisse des volumes pulmonaires (en apnée)
- Peu d'effet sur la compliance statique (bouteille)

Position du diaphragme en fin d'inspiration en immersion



Type d'activité de plongée et effets respiratoires

Apnée et volume pulmonaire

Loi de Boyle Mariotte (gaz parfait) : $PV / T = \text{cte}$

Baisse du volume pulmonaire en apnée

CPT : 6 litres à 1 ATA

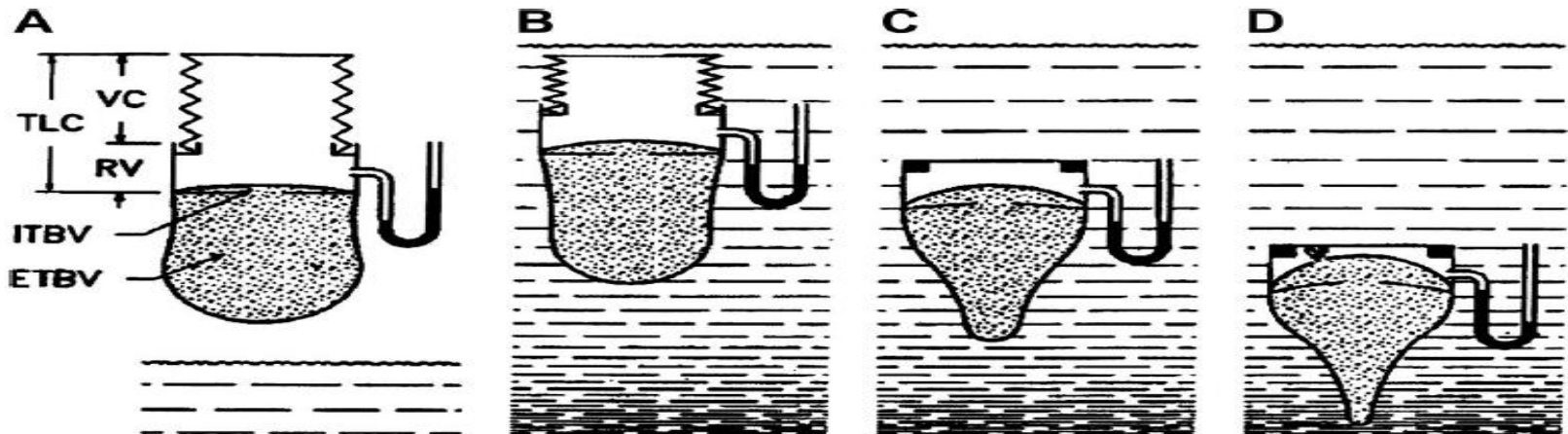
CPT : 600 ml à 10 ATA (90 m)

Perte de flottabilité

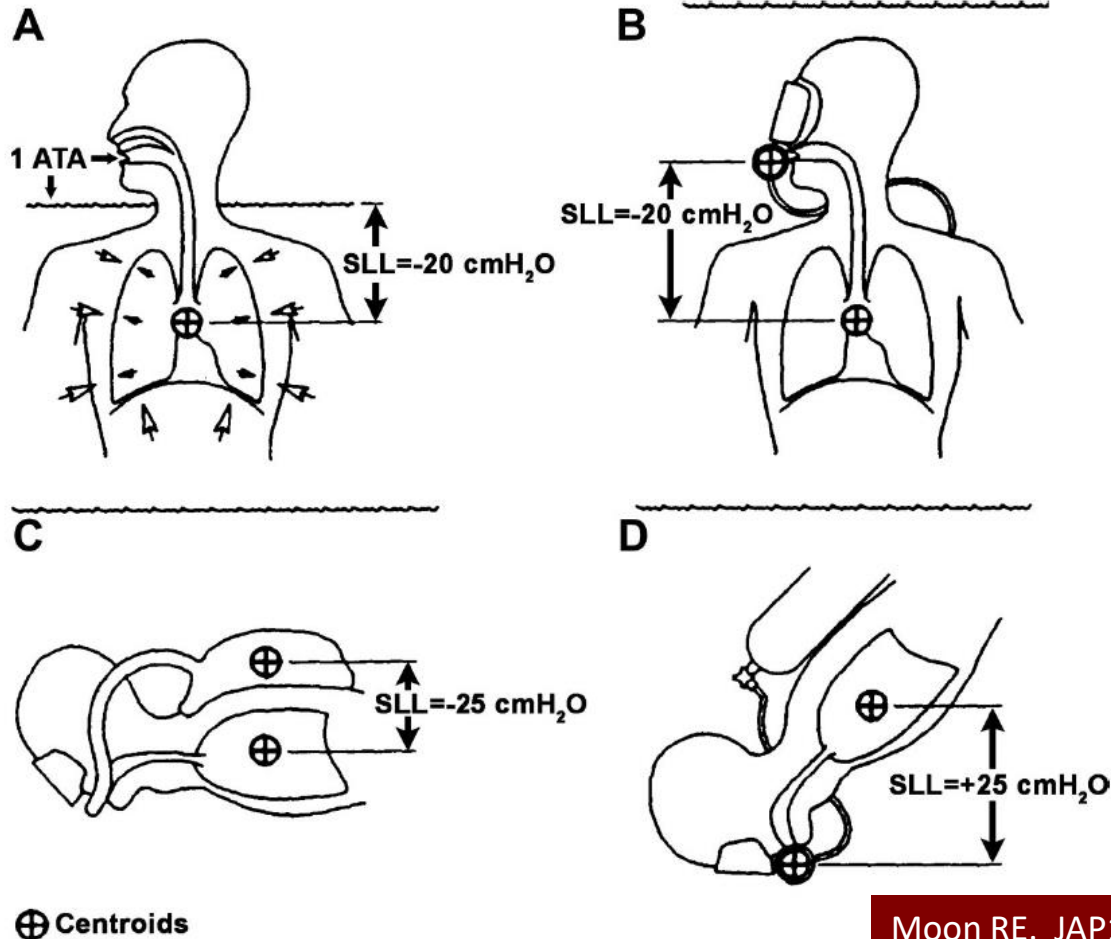
Record en apnée :

125 mètres (Néry)

253,2 mètres !!!!! (Nitsch) – No limit



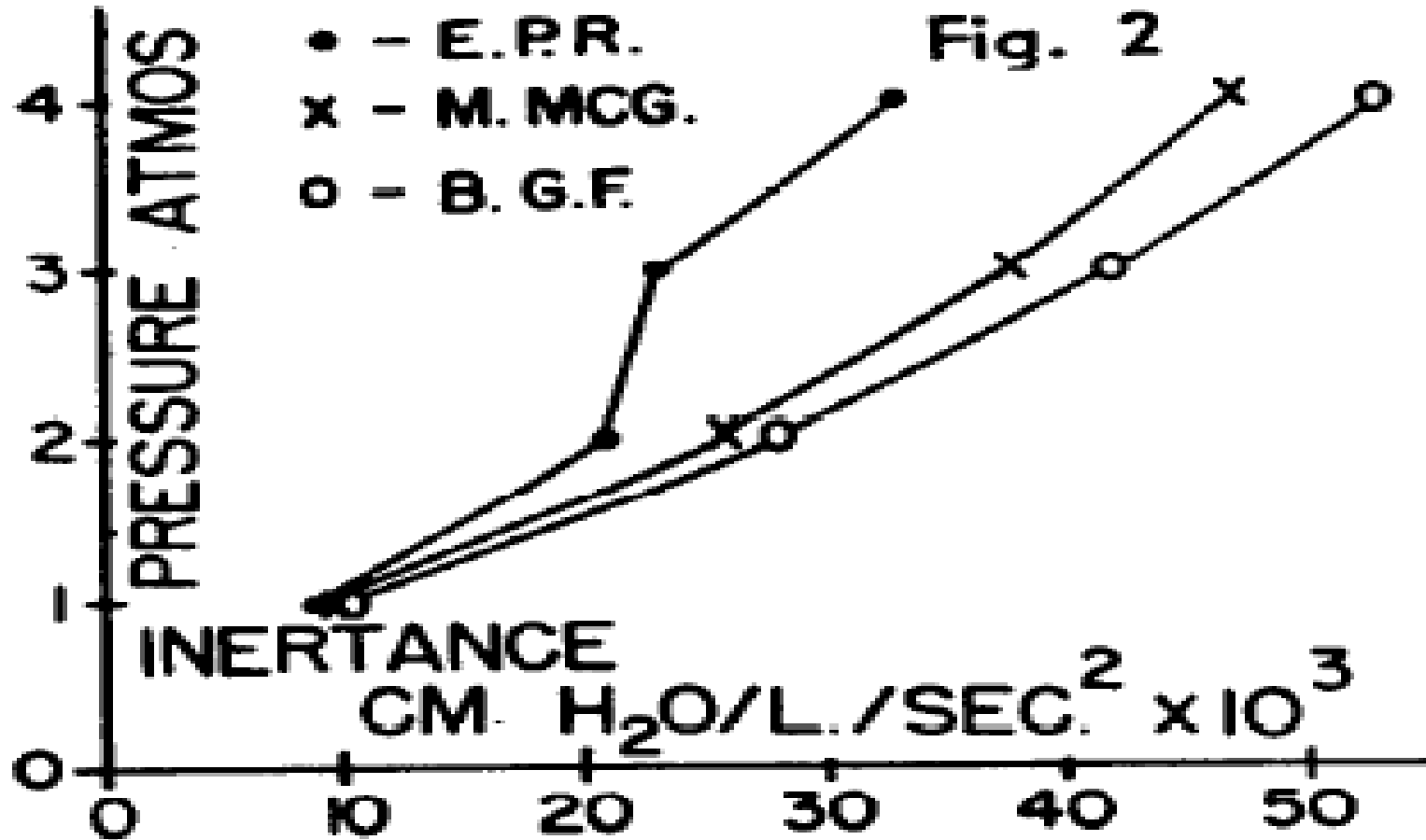
Pression Trans-respiratoire



Moon RE. JAP106: 668–677, 2009

Lundgren CG. Lung Bio Health Dis 1999 91-128

Effet de la pression sur l'inertance



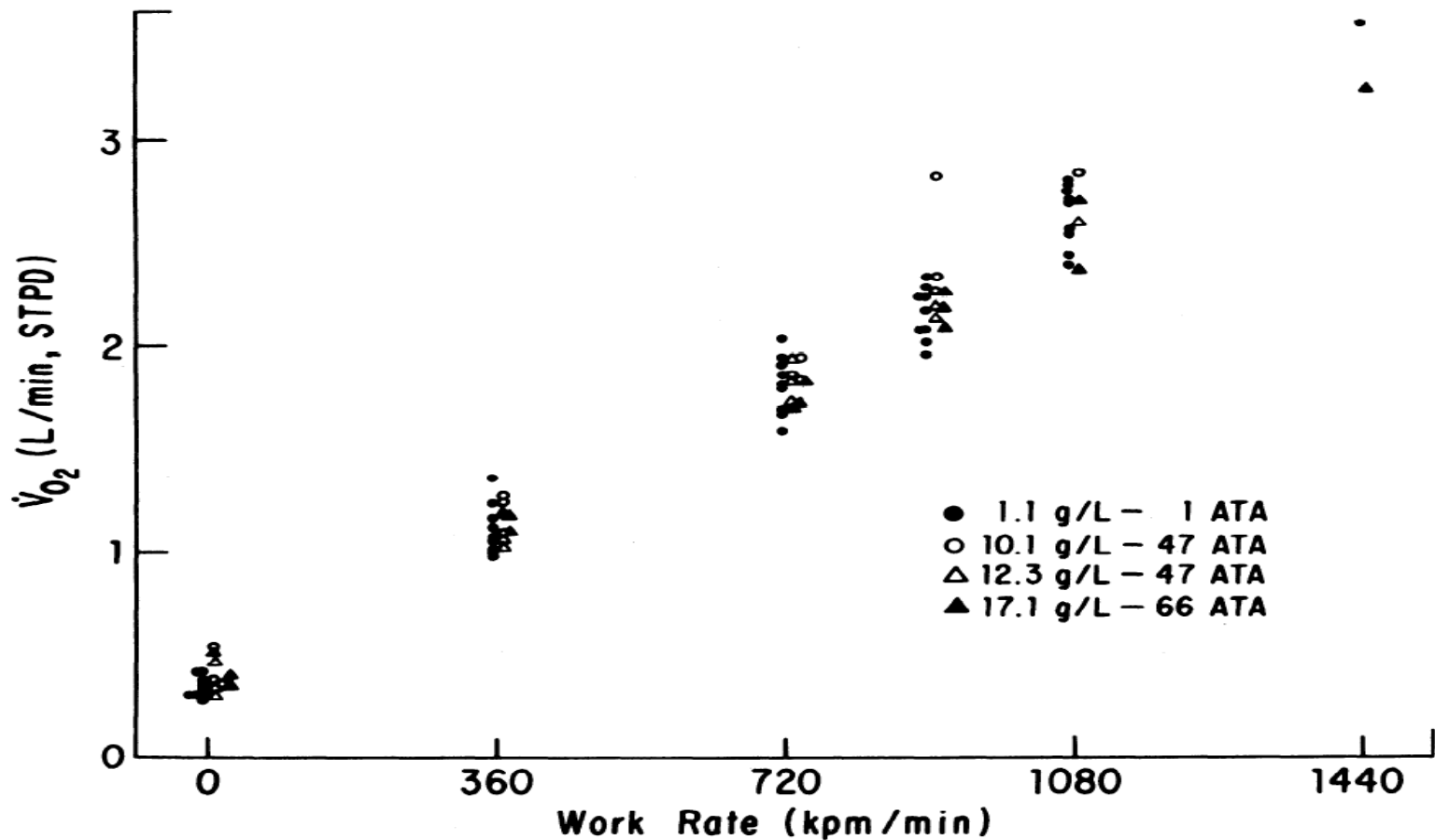
Effet de la pression sur la mécanique et les volumes pulmonaires

- Plongée à « saturation »
 - Augmentation de la charge résistive inspiratoire,
 - Augmentation de la charge résistive expiratoire
 - Syndrome obstructif ++++
- Apnée
 - Diminution de la CRF

2.2 EFFETS DE L'HYPERTHERMIE SUR LES ECHANGES RESPIRATOIRES : O₂ - CO₂

2.2.1 EFFETS DE L'HYPERTHERMIE SUR LA VO2

VO₂ et Augmentation de Pression



2.2.2 EFFETS DE L'HYPERTENSION SUR LE CO₂

Elimination de CO2 et espace mort

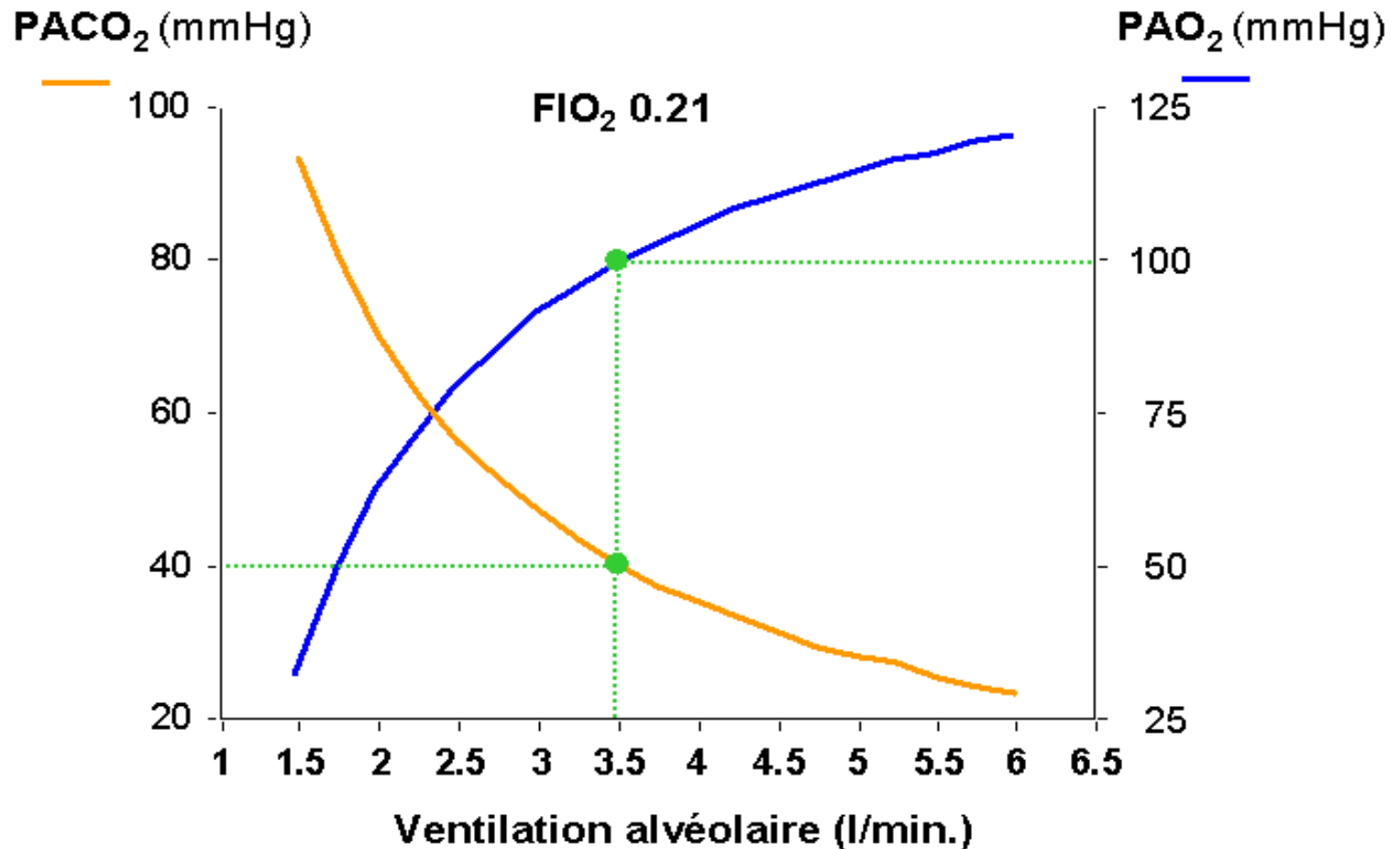
$$PaCO_2 = \frac{\dot{V}CO_2 \times 0,863}{\dot{V}A}$$

$$PaCO_2 = \frac{\dot{V}CO_2 \times 0,863}{\dot{V}E \left(1 - \frac{VD}{VT}\right)}$$

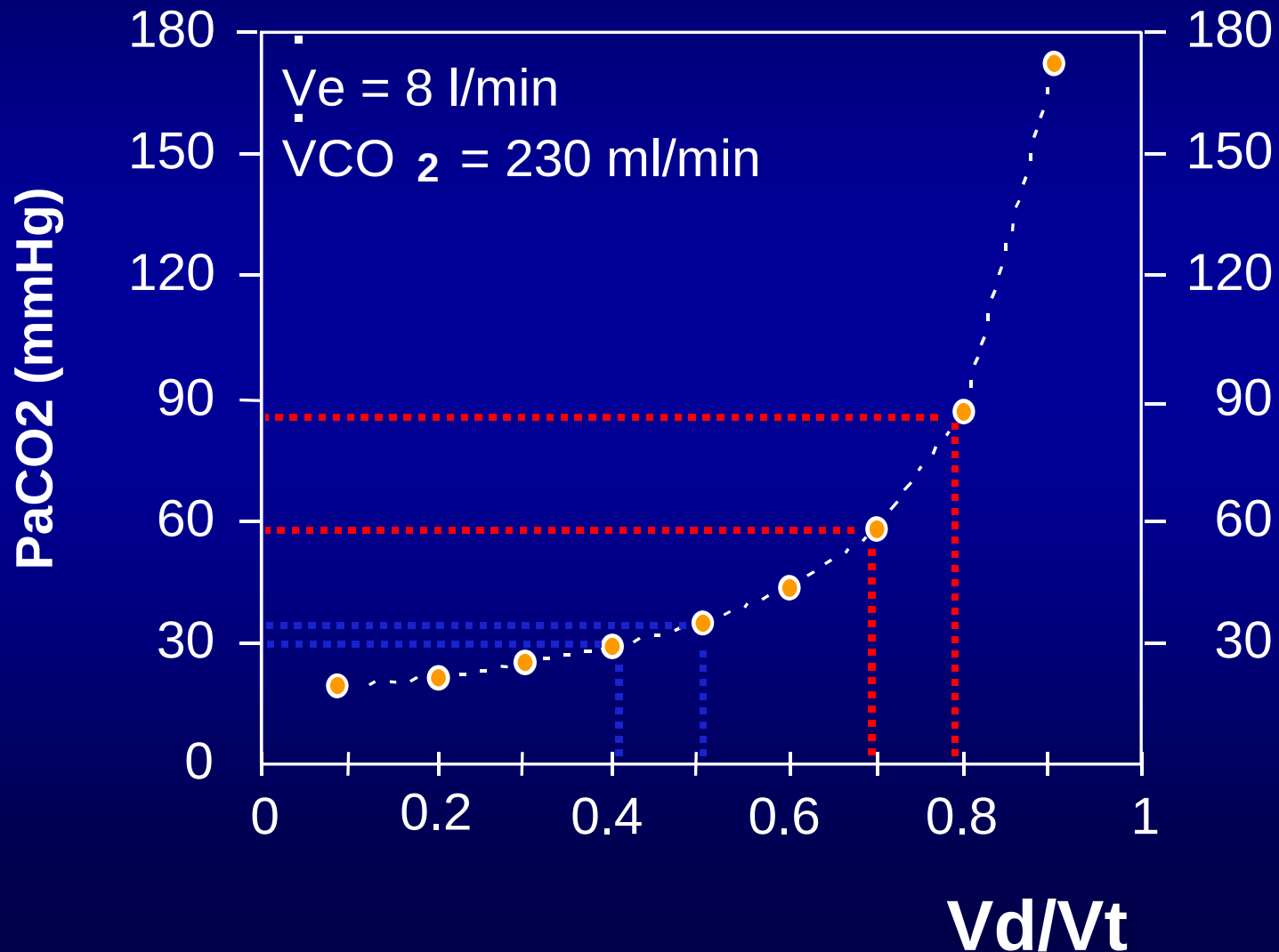
$$\dot{V}A = \dot{V}E - \dot{V}D = \dot{V}E \left(1 - \frac{\dot{V}D}{\dot{V}E}\right) = \dot{V}E \left(1 - \frac{f \times VD}{f \times VT}\right)$$

Elimination de CO₂

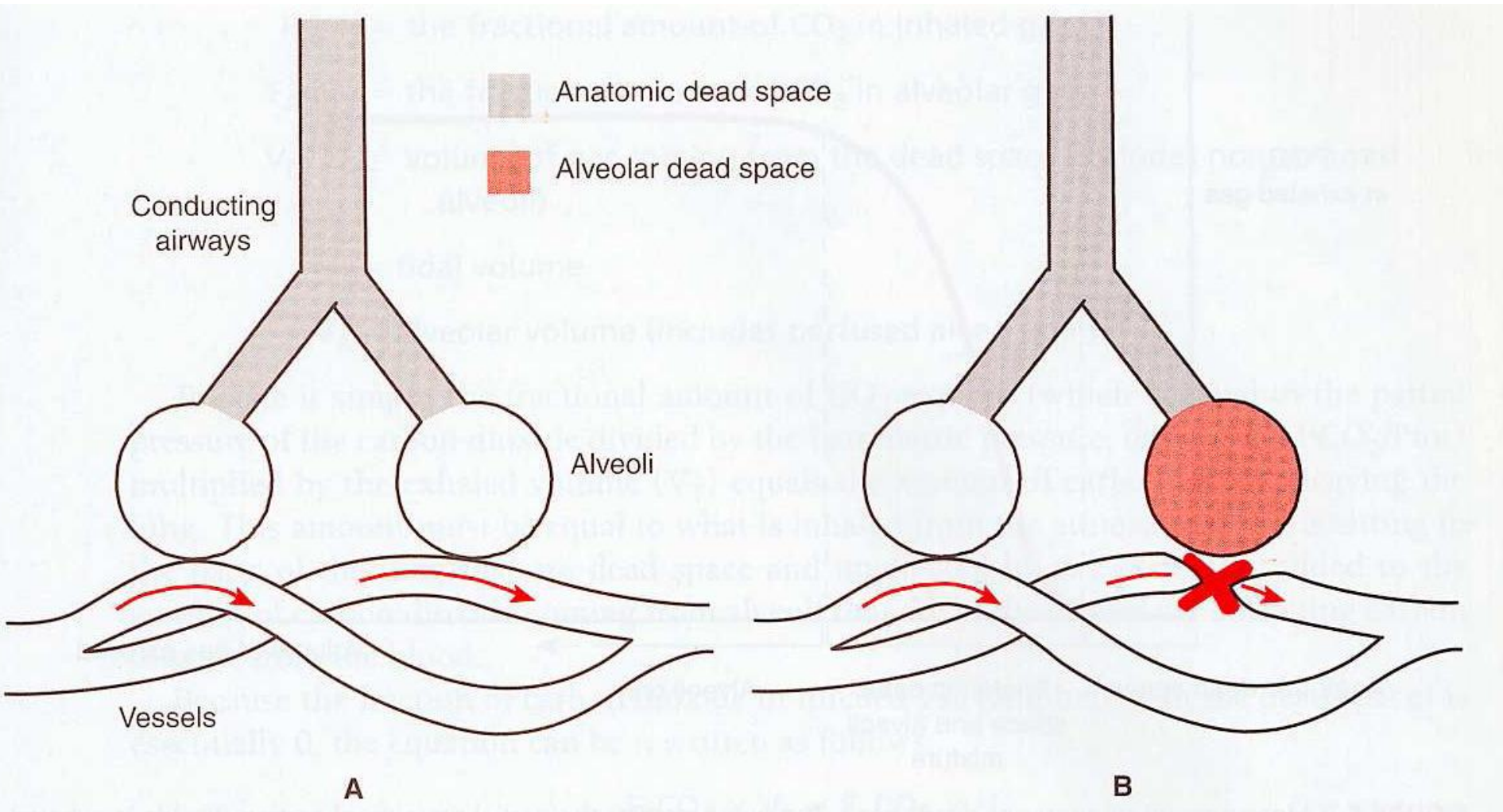
Ventilation alvéolaire



PaCO₂ dépend étroitement de V_d/V_t

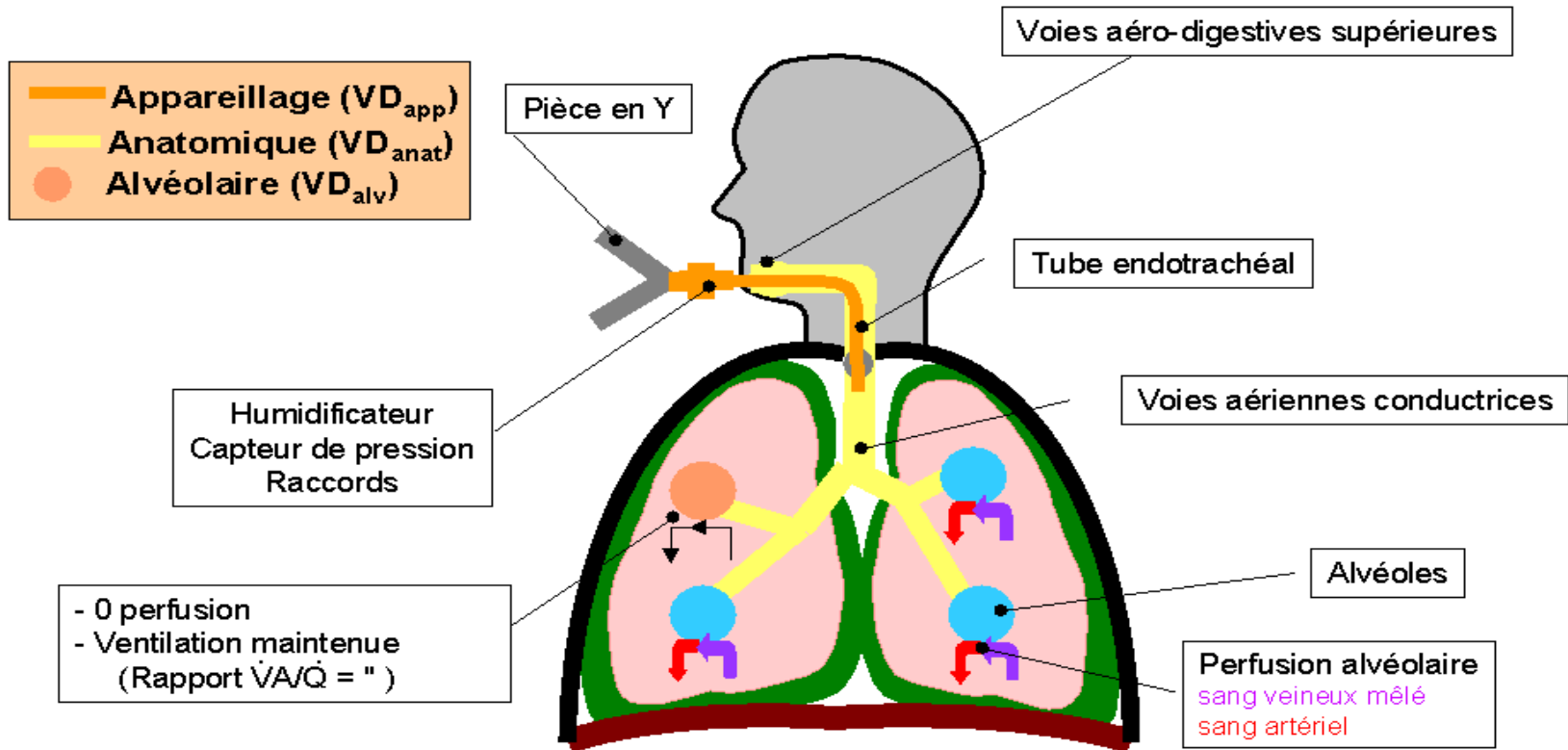


Notion d'espace mort

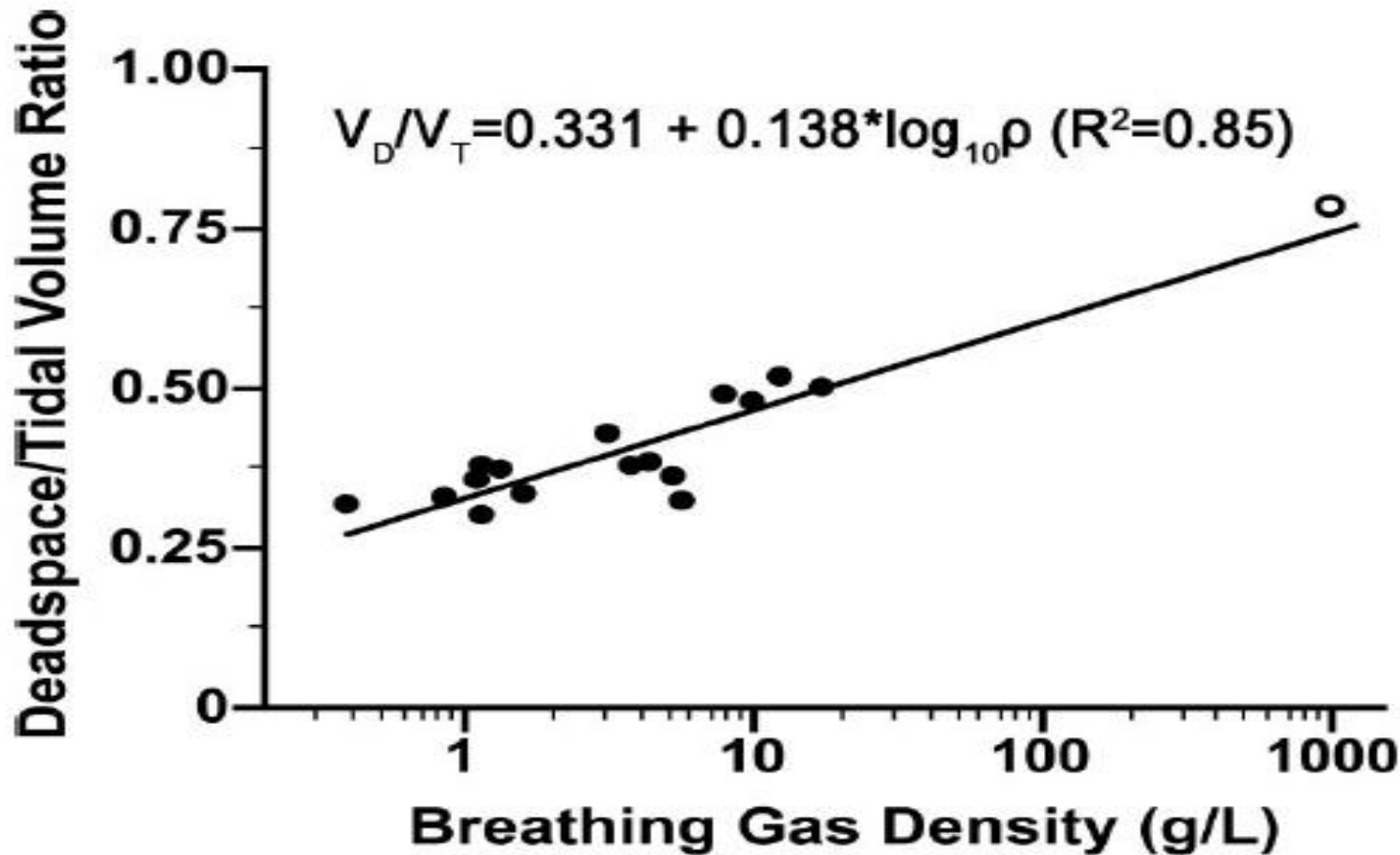


Espace mort physiologique

$$VD/VT = VD_{app} + VD_{anat} + VD_{alv}$$

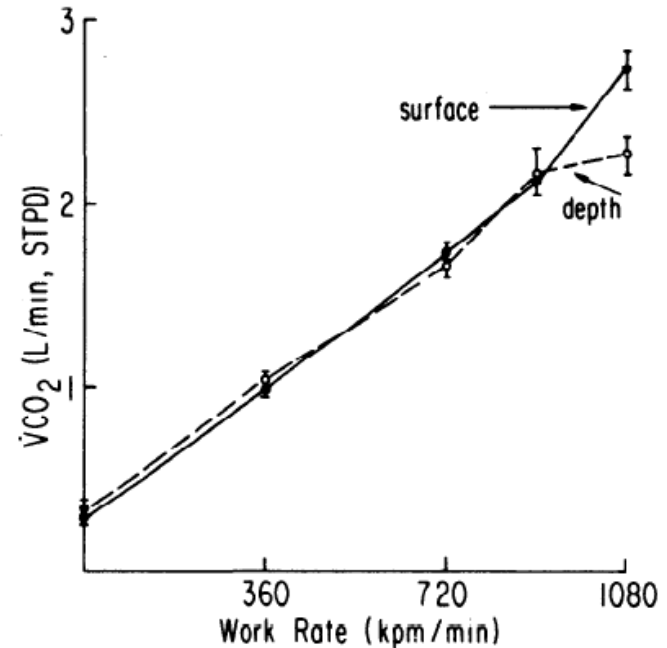


Effet de la densité gazeuse sur l'espace mort



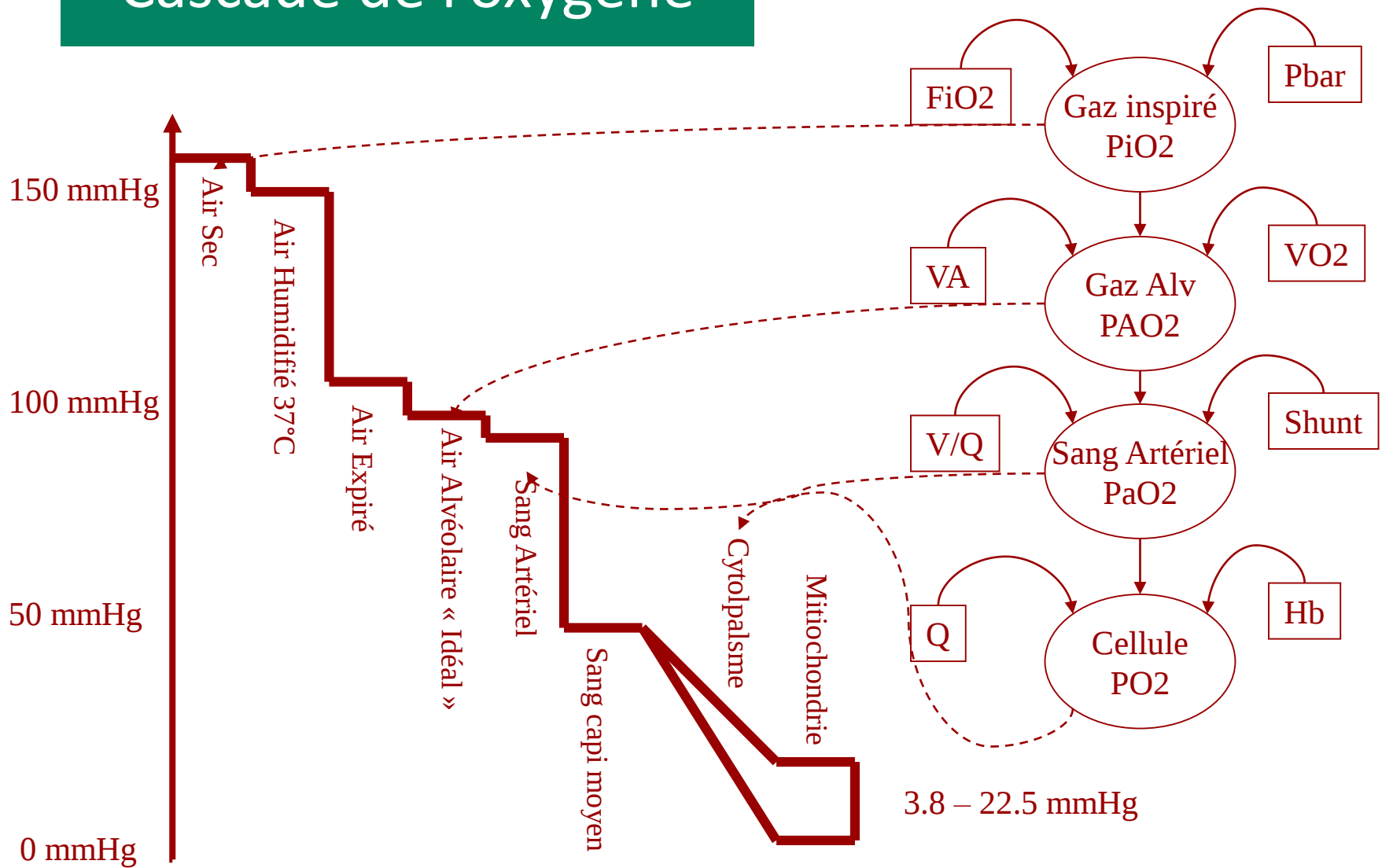
Effets de la pression sur l'espace mort

- VD/VT au repos
 - 35% niveau de la mer
 - 42 % à 47 ATA !!!
- VD/VT effort
 - 20 % au niveau de la mer
 - 40 % à 47 ATA
 - Risque d'hypercapnie en plongée profonde à l'effort
 - 46-7 – 62.2 mmHg



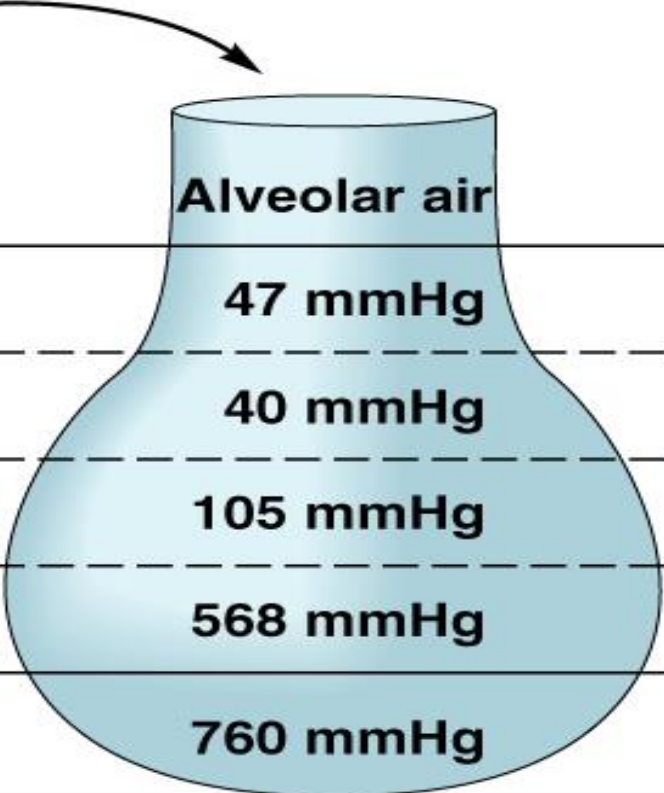
2.2.3 EFFETS DE L'HYPERTHERMIE SUR LA PO₂

Cascade de l'oxygène



Pression partielle des gaz dans l'air inspiré et l'air alvéolaire

Inspired air		Alveolar air
H ₂ O	Variable	47 mmHg
CO ₂	000.3 mmHg	40 mmHg
O ₂	159 mmHg	105 mmHg
N ₂	601 mmHg	568 mmHg
Total pressure	760 mmHg	760 mmHg



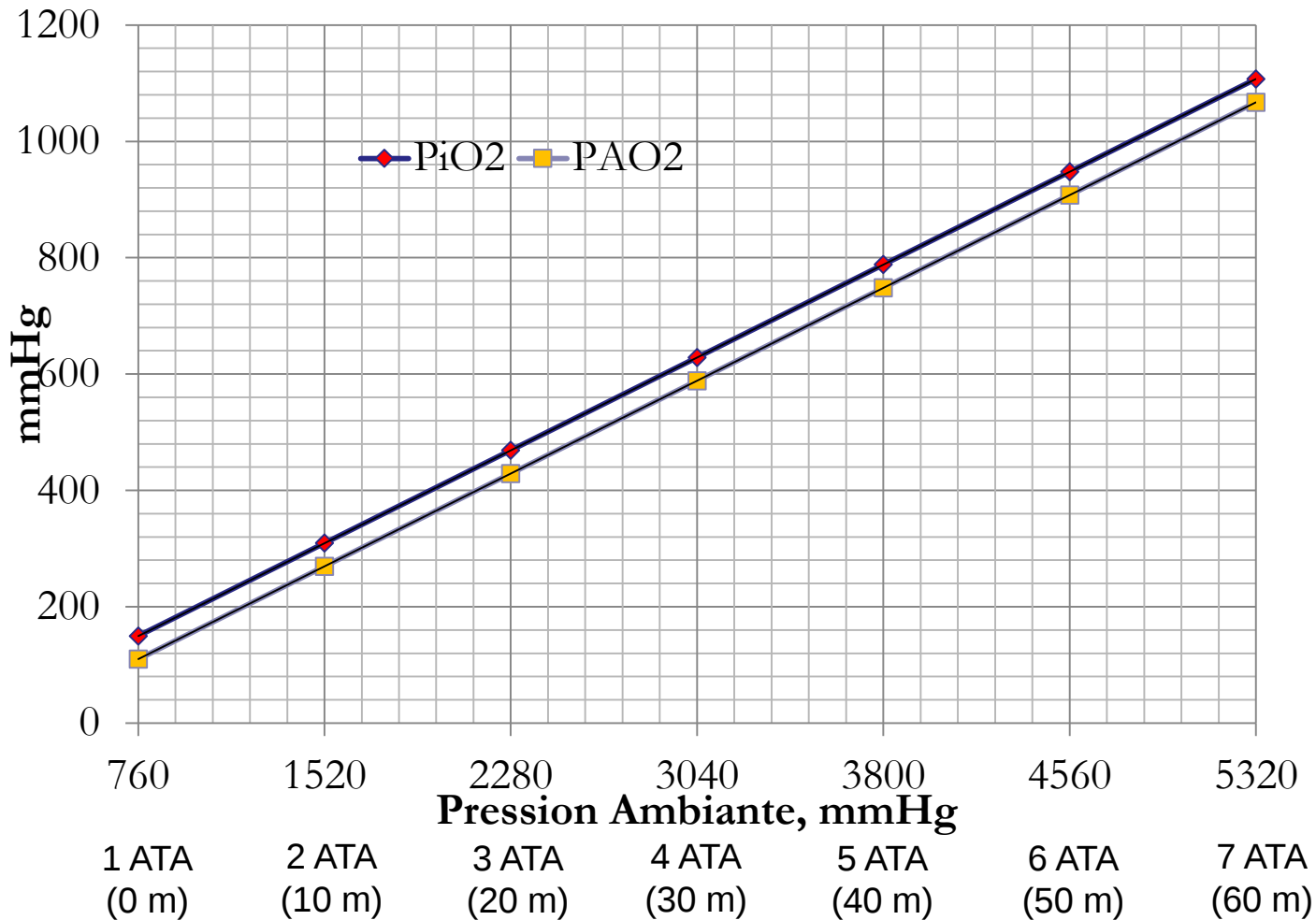
$$P_{atm} = P_{gaz1} + P_{gaz2} + \dots + P_{gazn} \text{ (Loi de Dalton)} - F_i G_{azx} = P_{gazx} / P_{tot}$$

Equation des gaz alvéolaires

$$PAO_2 = PiO_2 - 1,2 \times PaCO_2$$

$$PAO_2 = FiO_2 \times (PB - 47) - 1,2 \times PaCO_2$$

PAO₂ et PiO₂ selon la pression ambiante (Ventilation avec de l'air – FiO₂ 0.21)



Pression et valeur PO2 à différentes profondeurs

Profondeur (mètres)	Pression (ATA-mmHg)	PiO2 (mmHg)	PAO2 (mmHg)	%O2 pour PIO2 = PiO2 à 1 ATA
0	1 - 760	149	104	20,9
10	2-1520	309	264	10,1
20	3-2280	467	422	6,69
50	6-4560	945	900	3,31
100	11-8360			1,8
200	21-15960			0,94
500	51-38760			0,39
1000	101-76760	Cachalot		0,20
2000	201-152760			0,098
2500	251-190760			0,078

Pression et valeur PN2 à différentes profondeurs (Ventilation en Air – FiN2 = 0.79)

Profondeur (mètres)	Pression (ATA-mmHg)	PiN2 (mmHg)	PAN2 (mmHg)
0	1 - 760	601	568
10	2-1520	1200	1120
20	3-2280	1800	1600
50	6-4560	3600	3200
100	11-8360		
200	21-15960	Anesthésie	Chirurgicale
500	51-38760		
1000	101-76760		
2000	201-152760		
2500	251-190760		

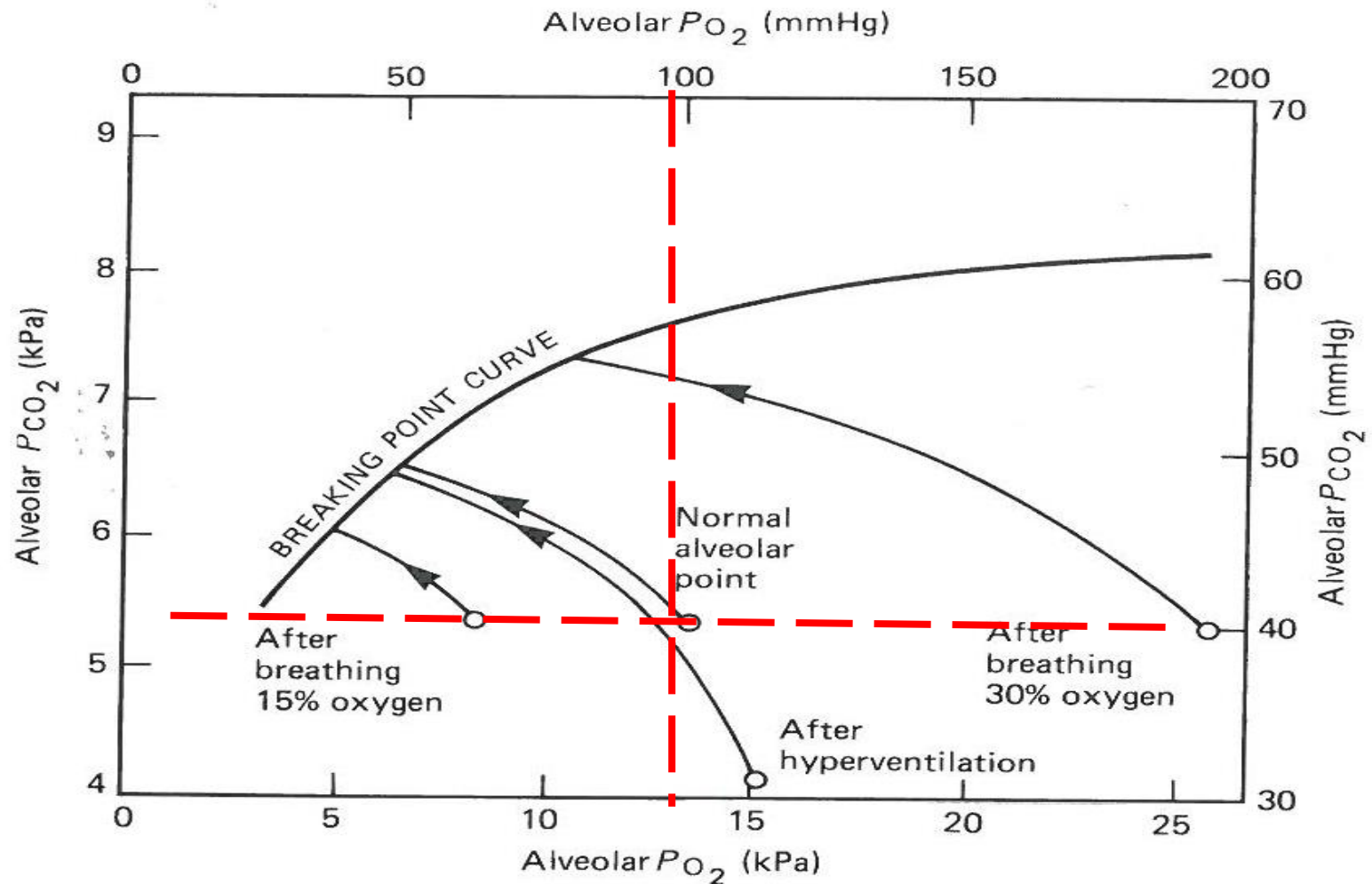
Narcose

Type d'activité de plongée et effets respiratoires

Apnée

- Temps limité : 60-70 sec (en moyenne)
- Dépend
 - Volume pulmonaire
 - PAO_2
 - $PACO_2$
 - Phénomènes adaptatifs

Le point de rupture en apnée (breaking point)



Type d'activité de plongée et effets respiratoires

Apnée et PAO₂

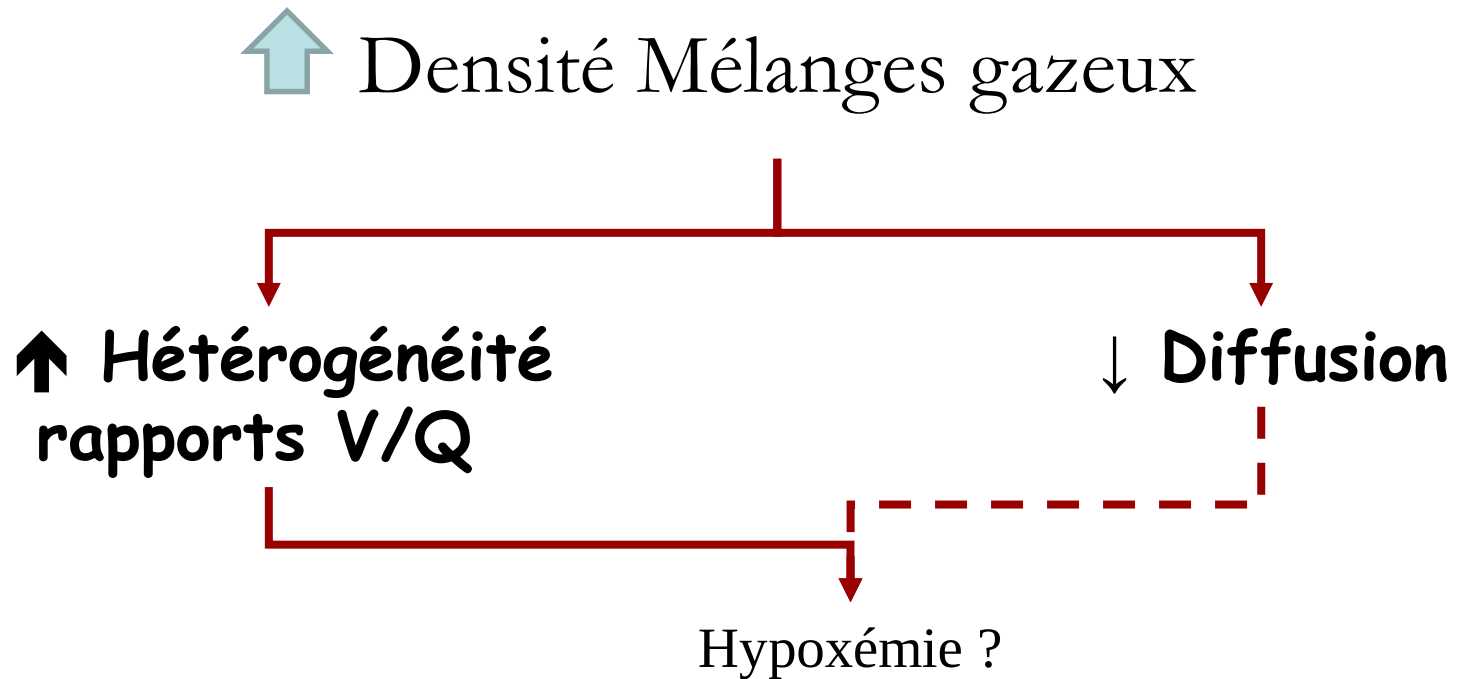
- PAO₂ double tous les 8-10 m à la descente
- Risque de syncope hypoxique à la remontée
- Transfert de gaz du sang vers l'alvéole si PAO₂ < PvO₂

Adapation chez les mammifères marins

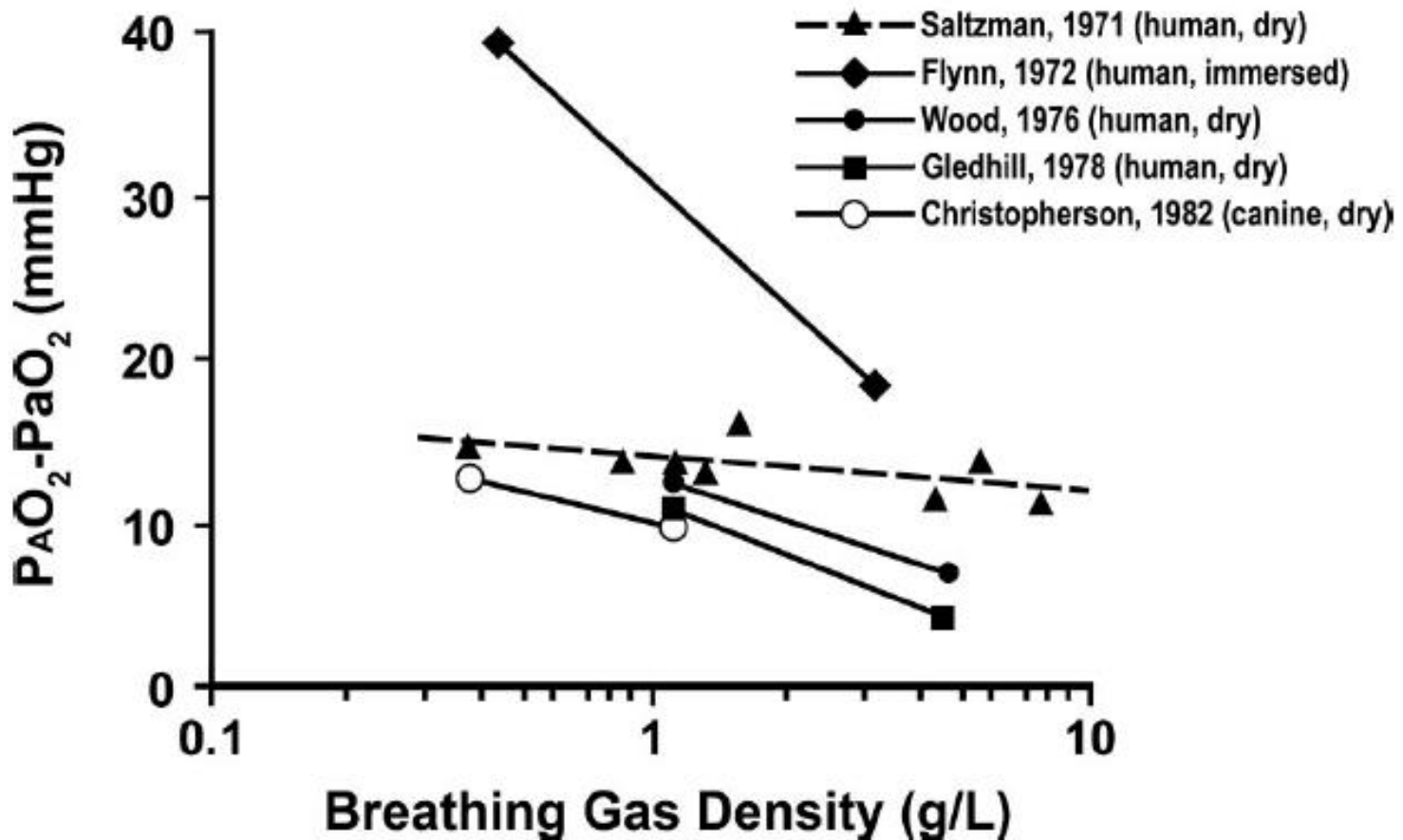
- Profondeurs
 - 1000 m (Grand cachalot)
 - 100 -150 m (Phoque de Weddell) – plusieurs minutes
- Phoque (weddell seal)
 - Collapsus pulmonaire complet dès 25-50 mètres
 - Utilisation de la rate comme réservoir de sang (10 % de la masse corporelle)
 - Hb : 25 g/l
 - Préservation de la circulation cérébrale et cardiaque
 - Acidose lactique extrême



ECHANGES GAZEUX

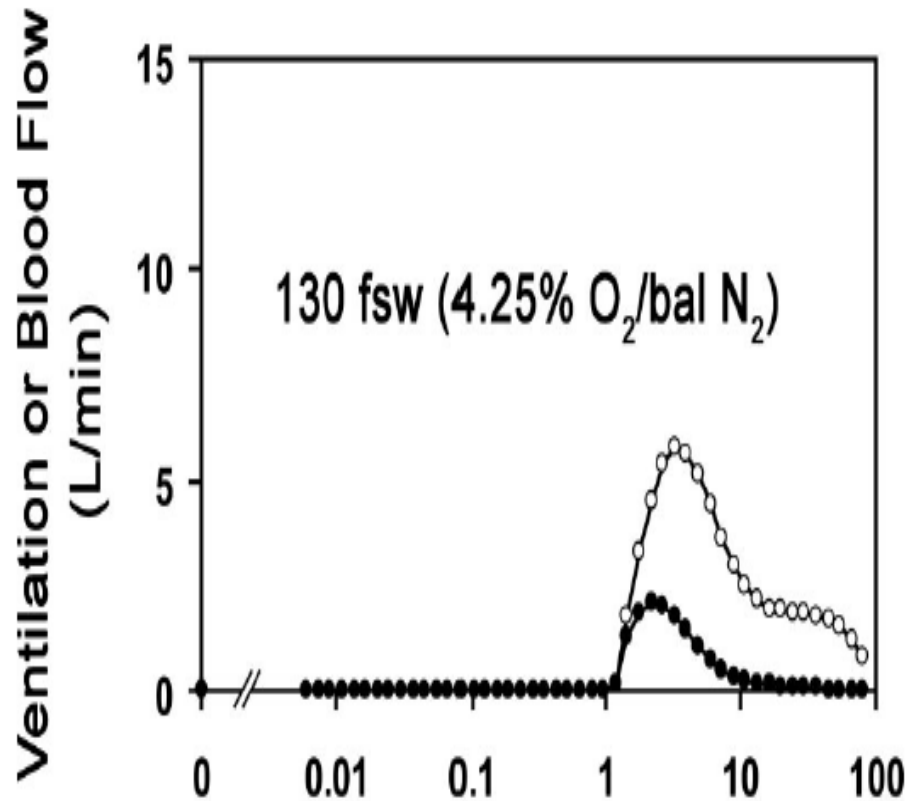
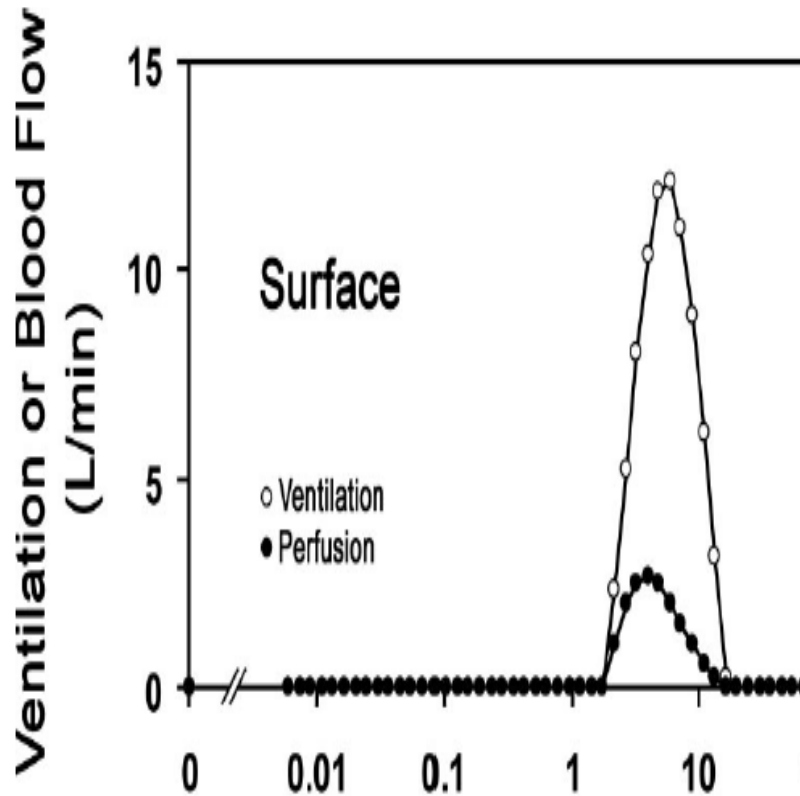


PAO₂ – PaO₂ selon la densité



Rapports VA/Q (MIGET)

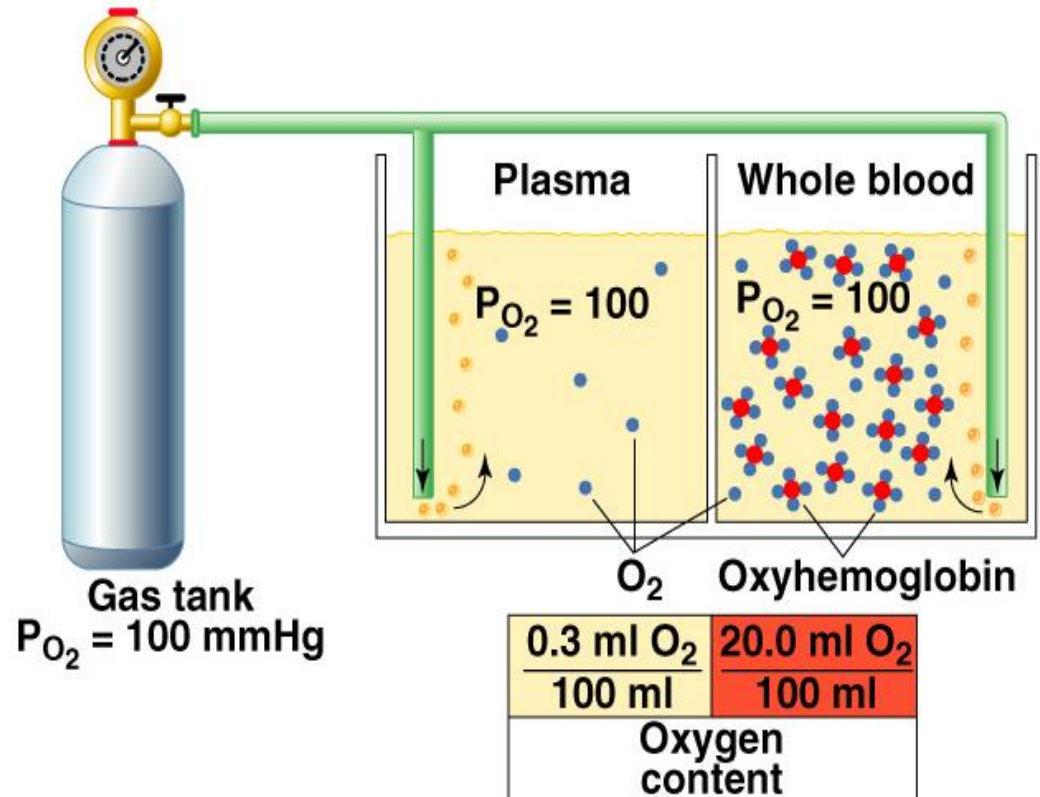
Exercice 1 ATA vs 5 ATA – Volontaire Sain



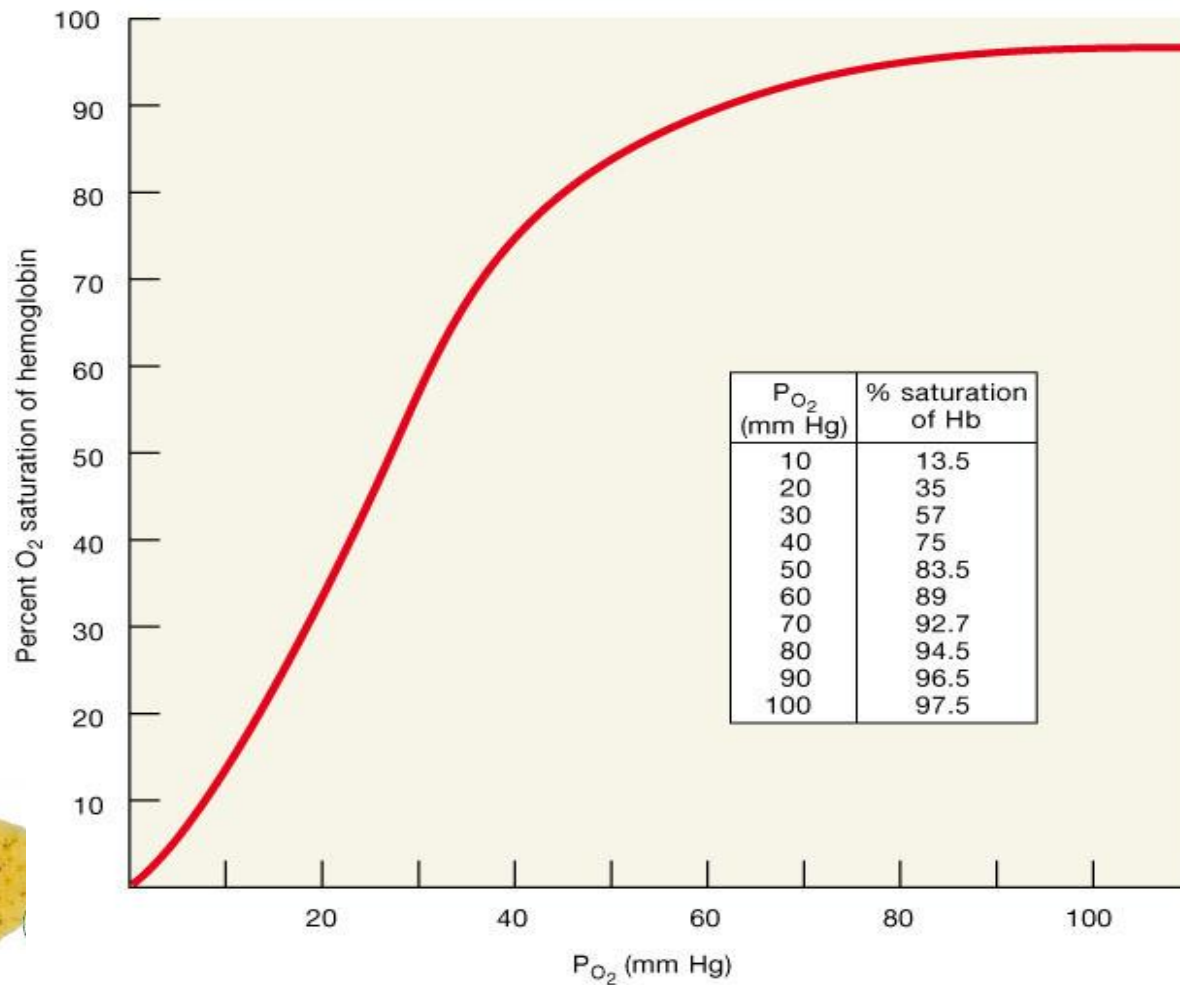
2.2.4 EFFETS DE L'HYPERBARIE SUR LE TRANSPORT DES GAZ

Hémoglobine et transport O_2

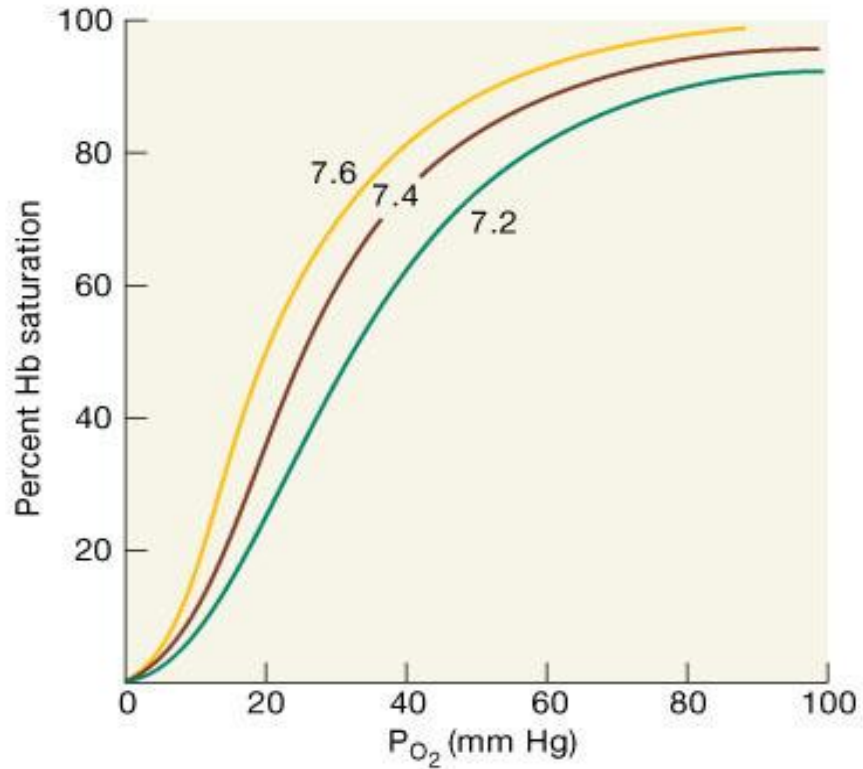
- 280 millions hemoglobine/GR.
- 4 polypeptides et 4 hèmes.
- 1 O_2 / Hème.
- Fixation réversible de l' O_2
- Transport O_2 influencé par
 - temperature
 - pH
 - P_{O_2}
 - P_{CO_2}
 - 2,3-DPG
 - Pression



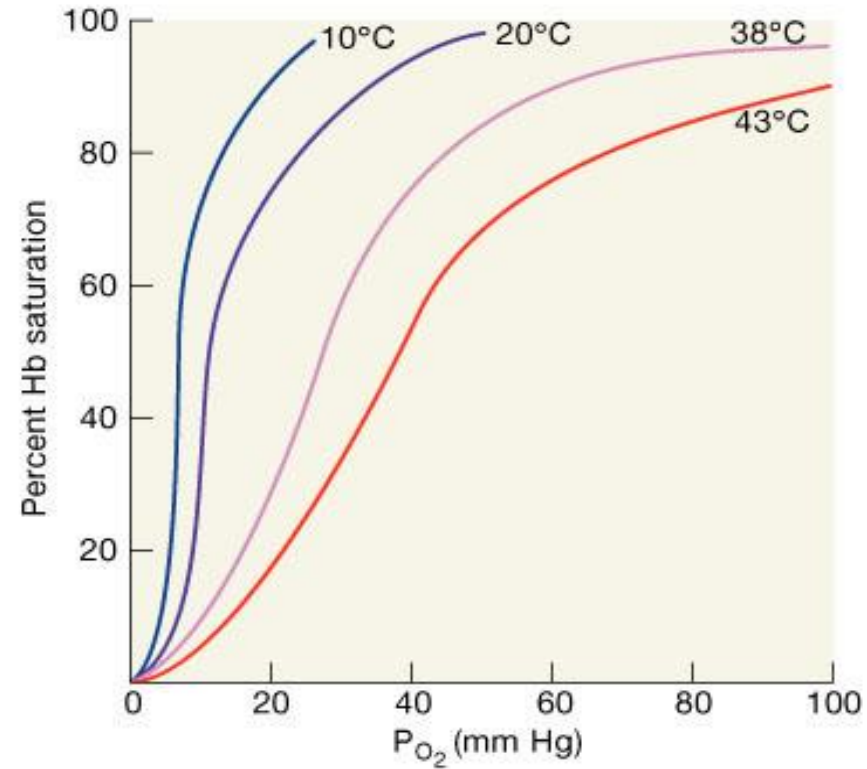
Courbe de saturation de l'Hb



Effet du pH et de la température sur l'Hb

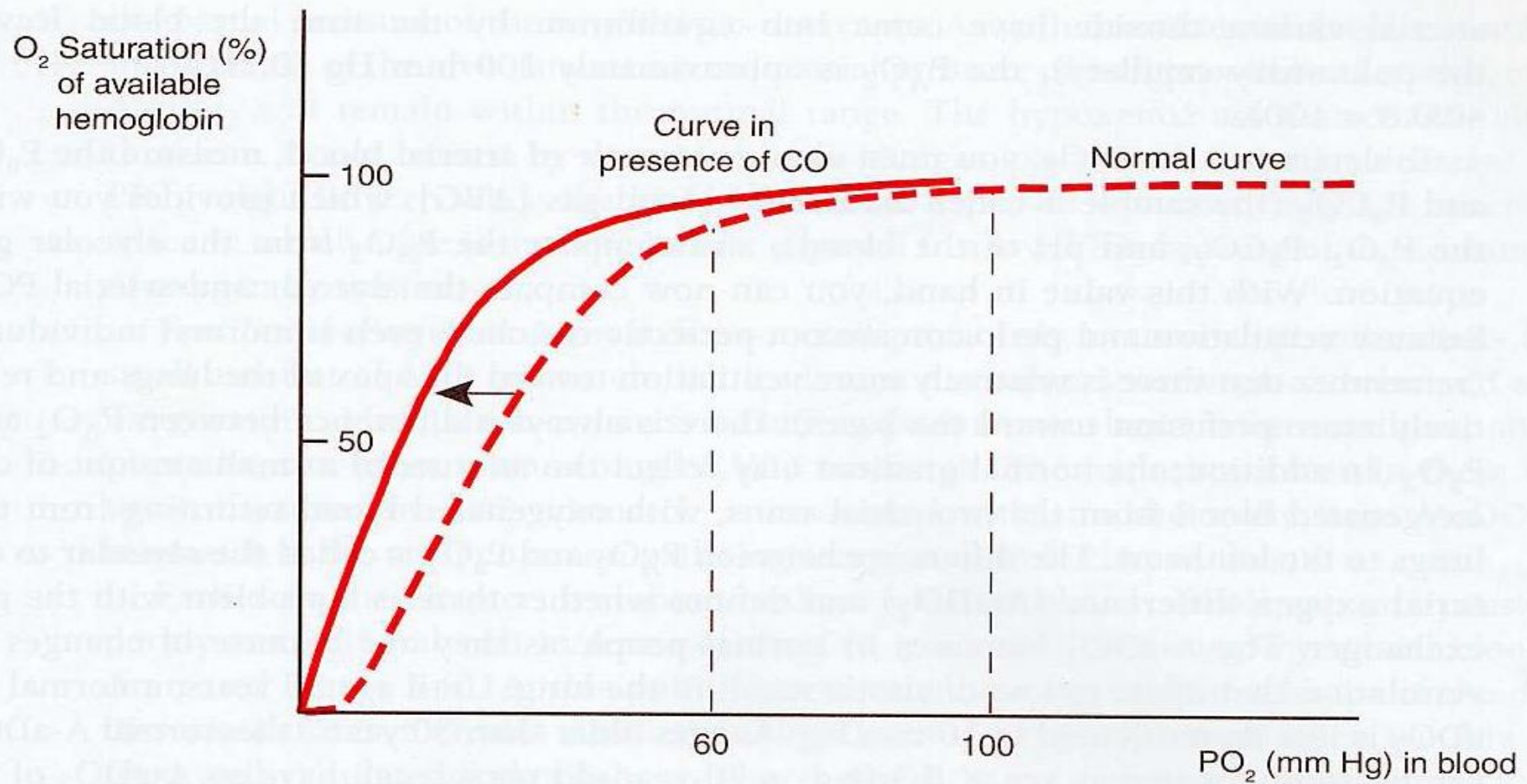


(a) Effect of pH

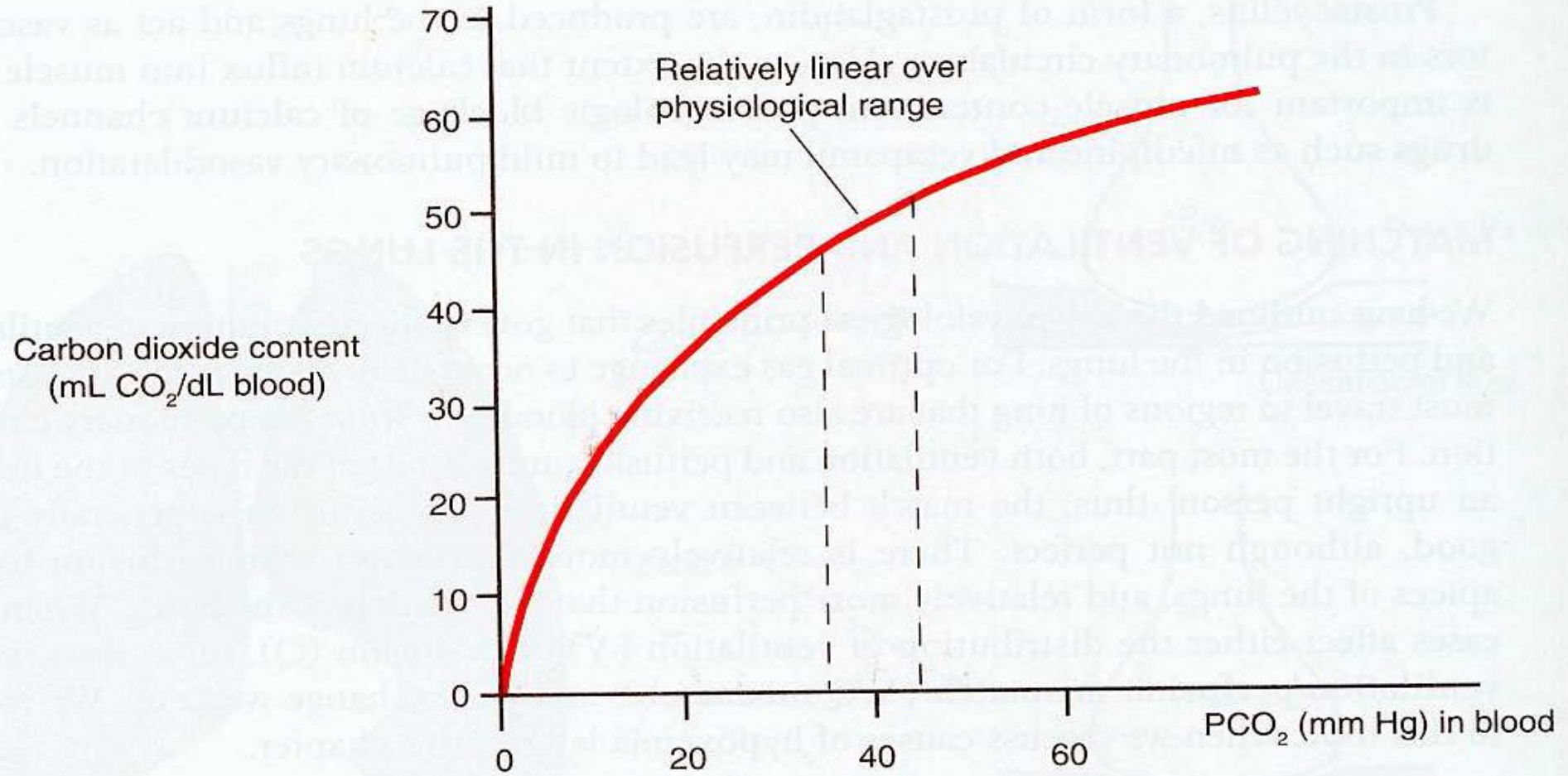


(b) Effect of temperature

Hb et CO

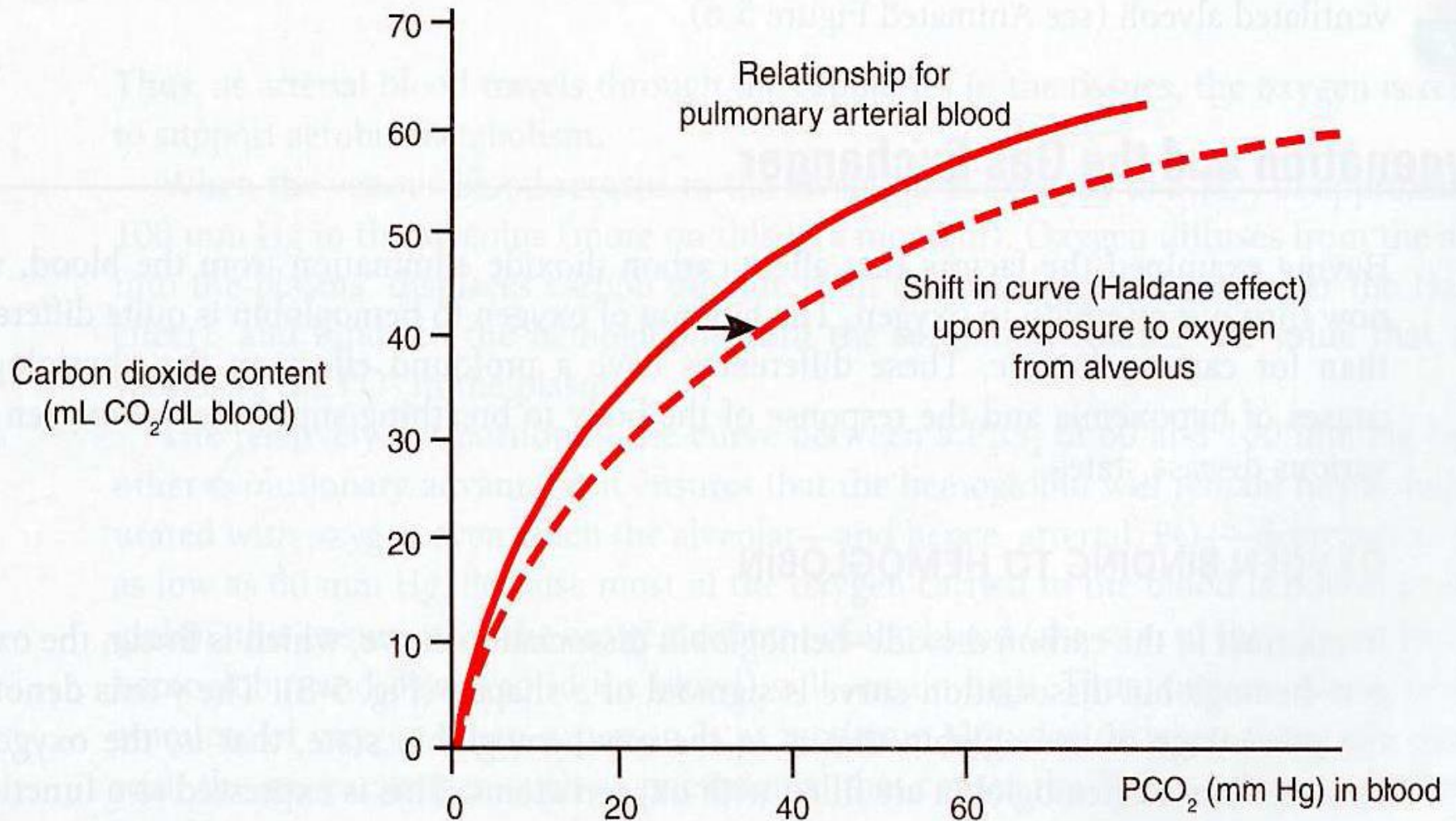


Courbe de dissociation du CO₂



Courbe de dissociation du CO₂

Effet Haldane



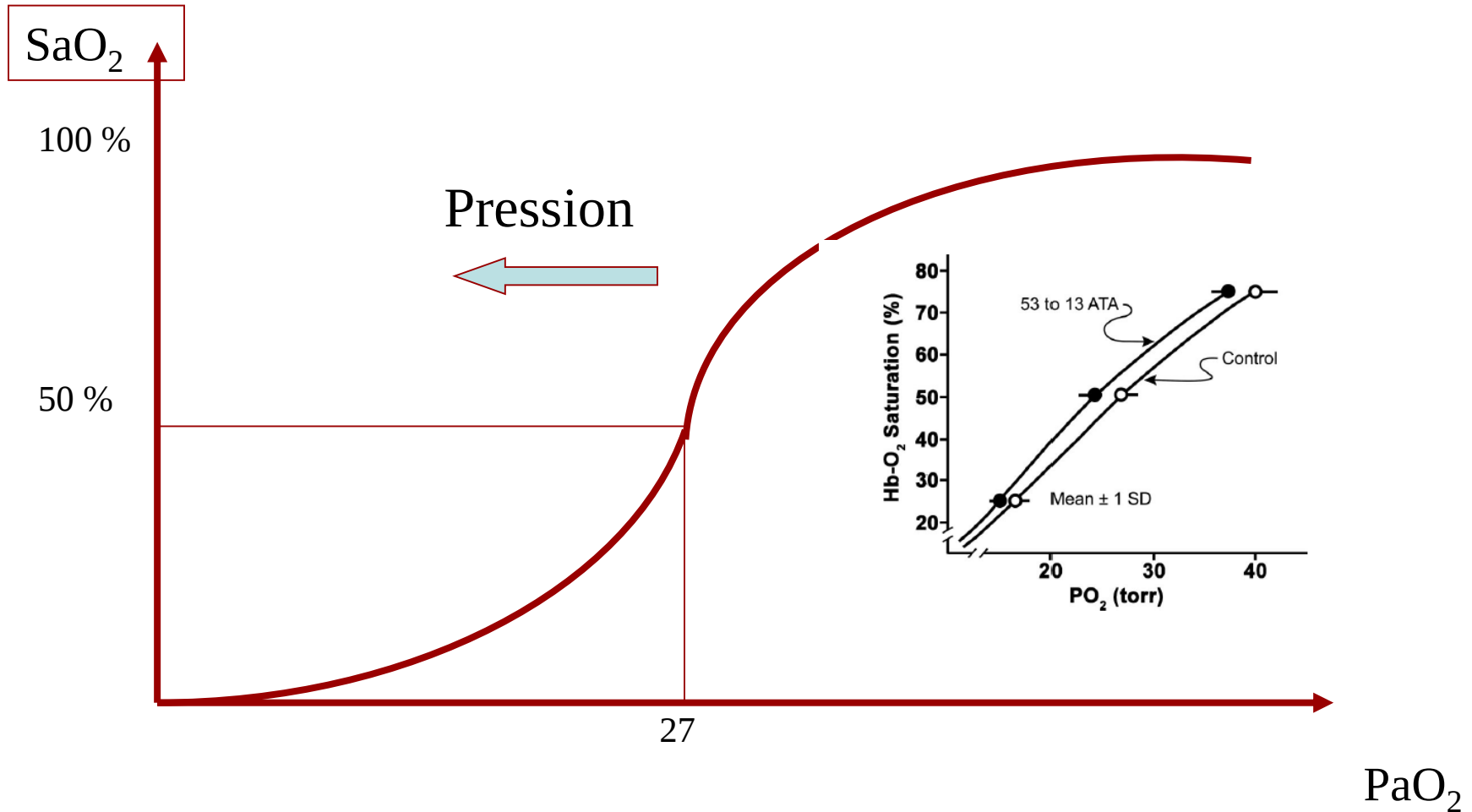
Effets de la Pression sur P50 et 2.3 DPG

	P50	2.3 DPG
Avant plongée	25.4	0.23
46 ATA		
1er jour	18.4	1.73
2ème jour	16.4	1.16
7ème jour	14.7	3.82
Retour		
2ème jour	26	0.27
7ème jour	26	

Stolp et al. Undersea Med Soc 1984. Proc of 8th symposium of Underwater Physiol : 315-326

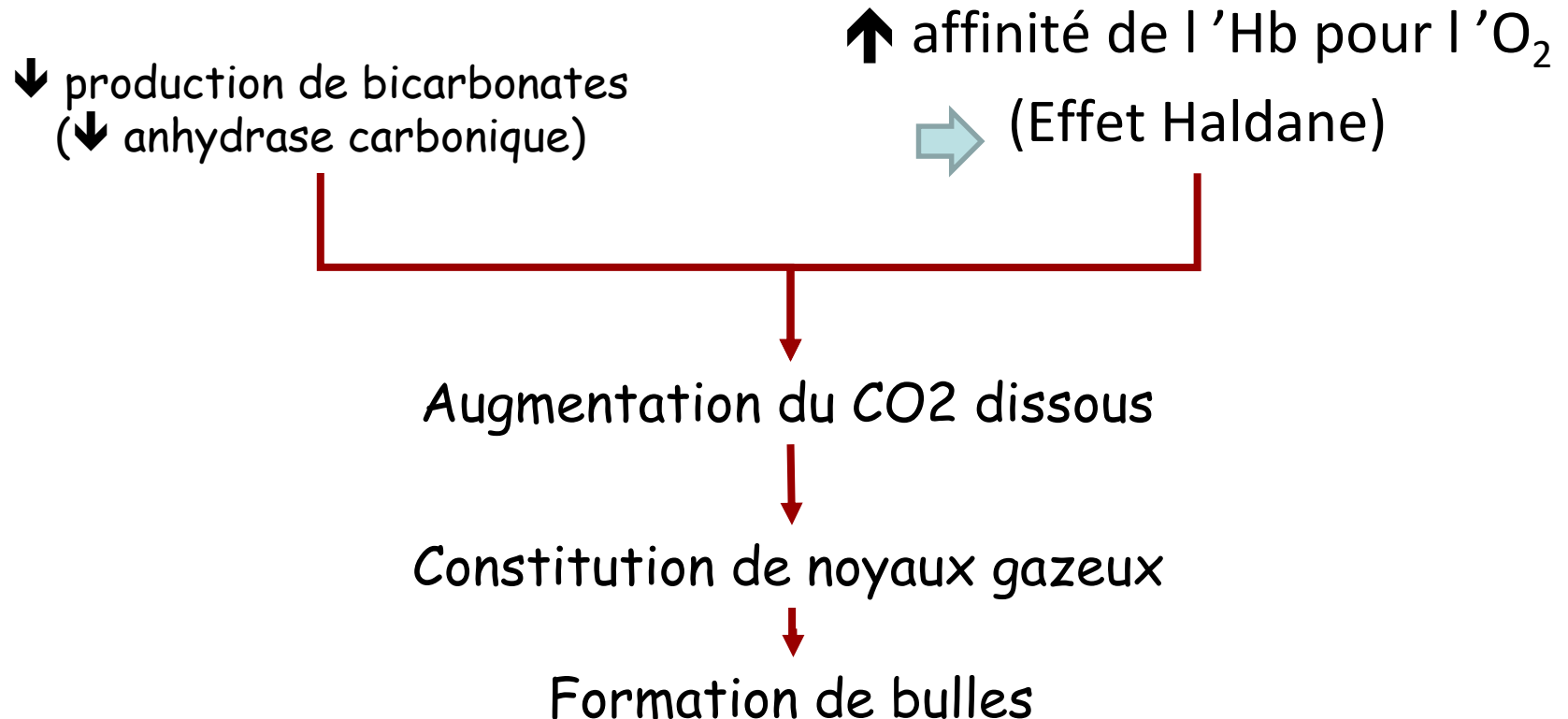
Stolp et al. Undersea Med Soc 1985 ; 12 : 21

Affinité de l'hémoglobine



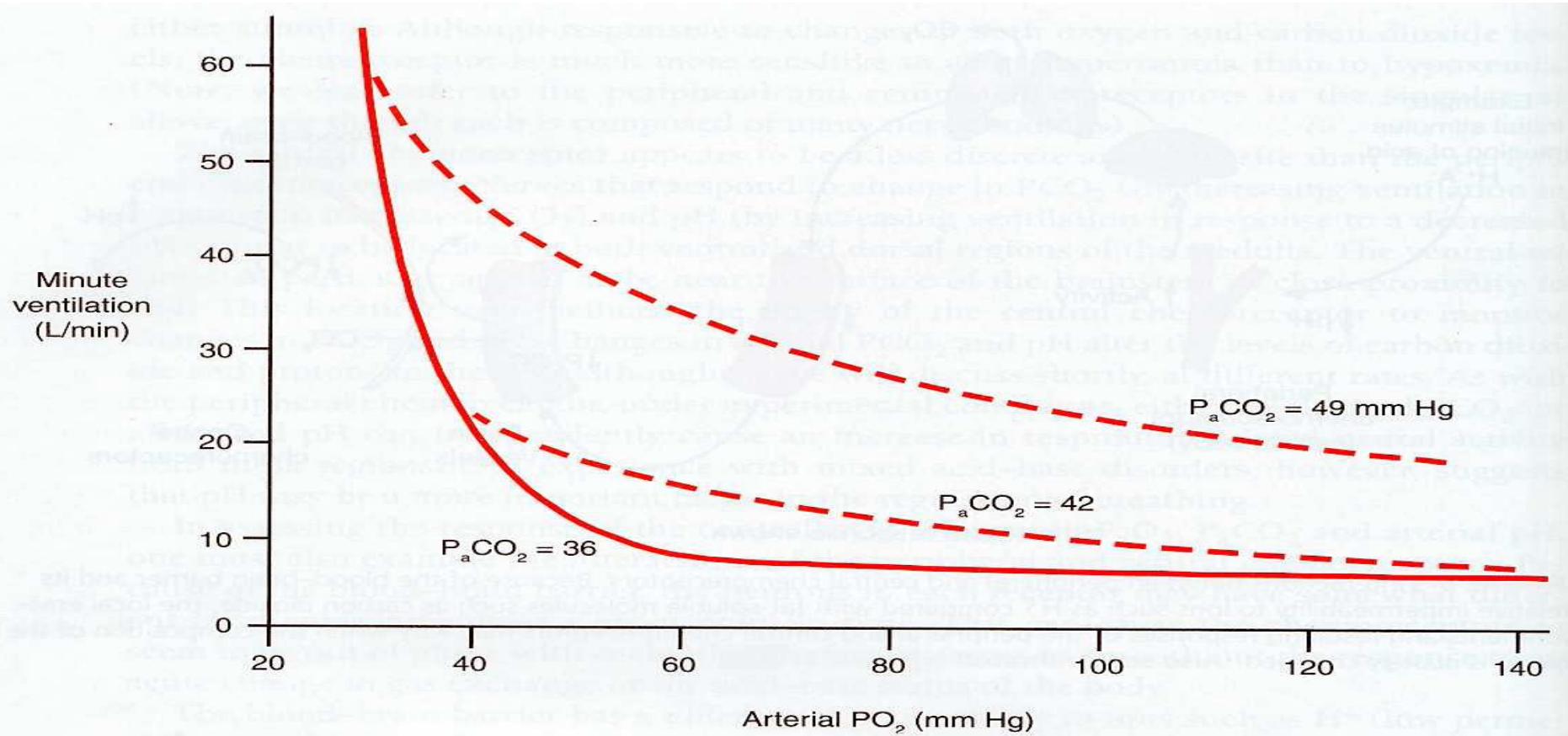
PaCO₂ - Transport du CO₂ dans le sang

Effet de la pression

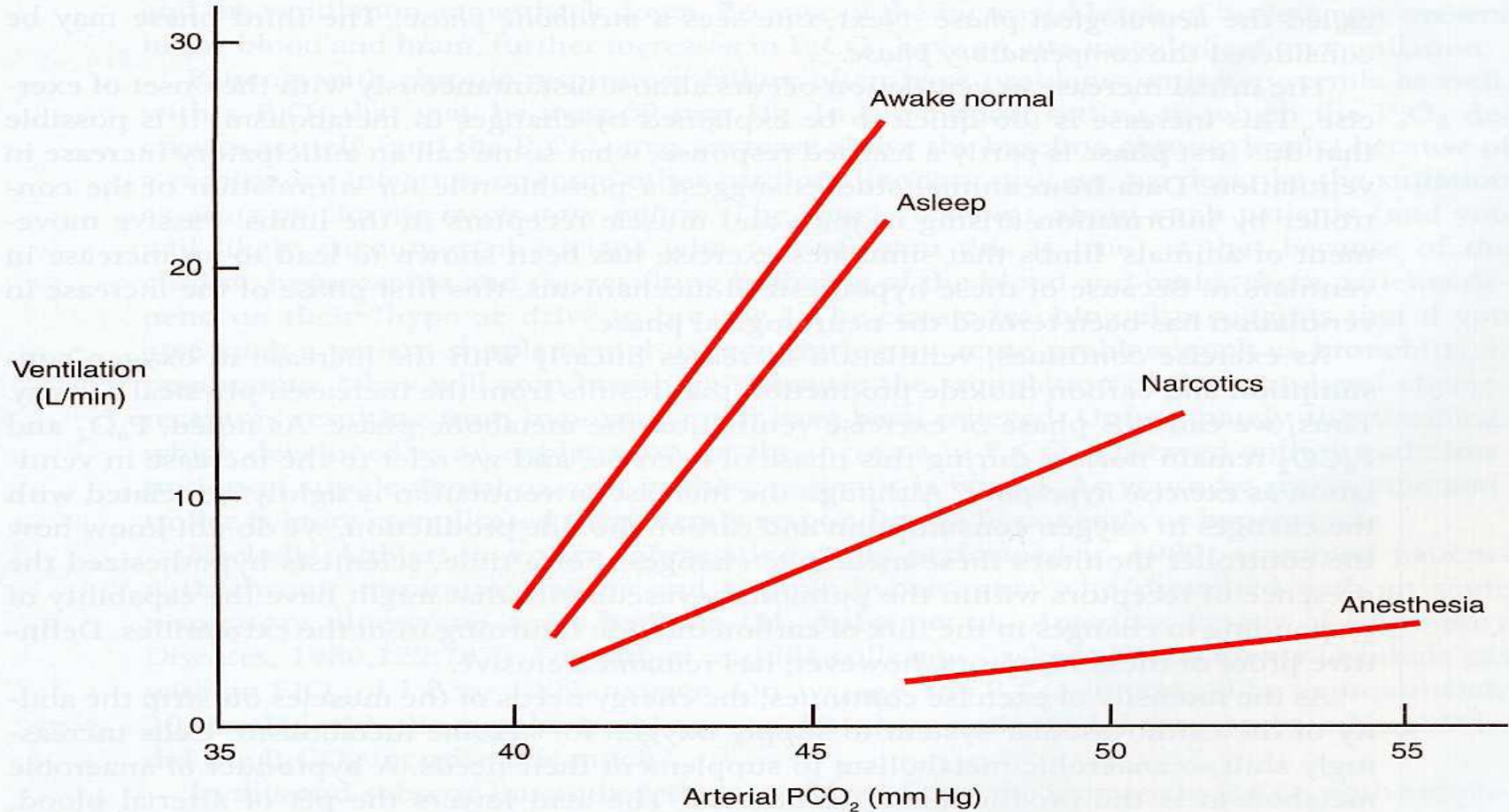


2.3 EFFETS DE L'HYPERTHERMIE SUR LA COMMANDE VENTILATOIRE

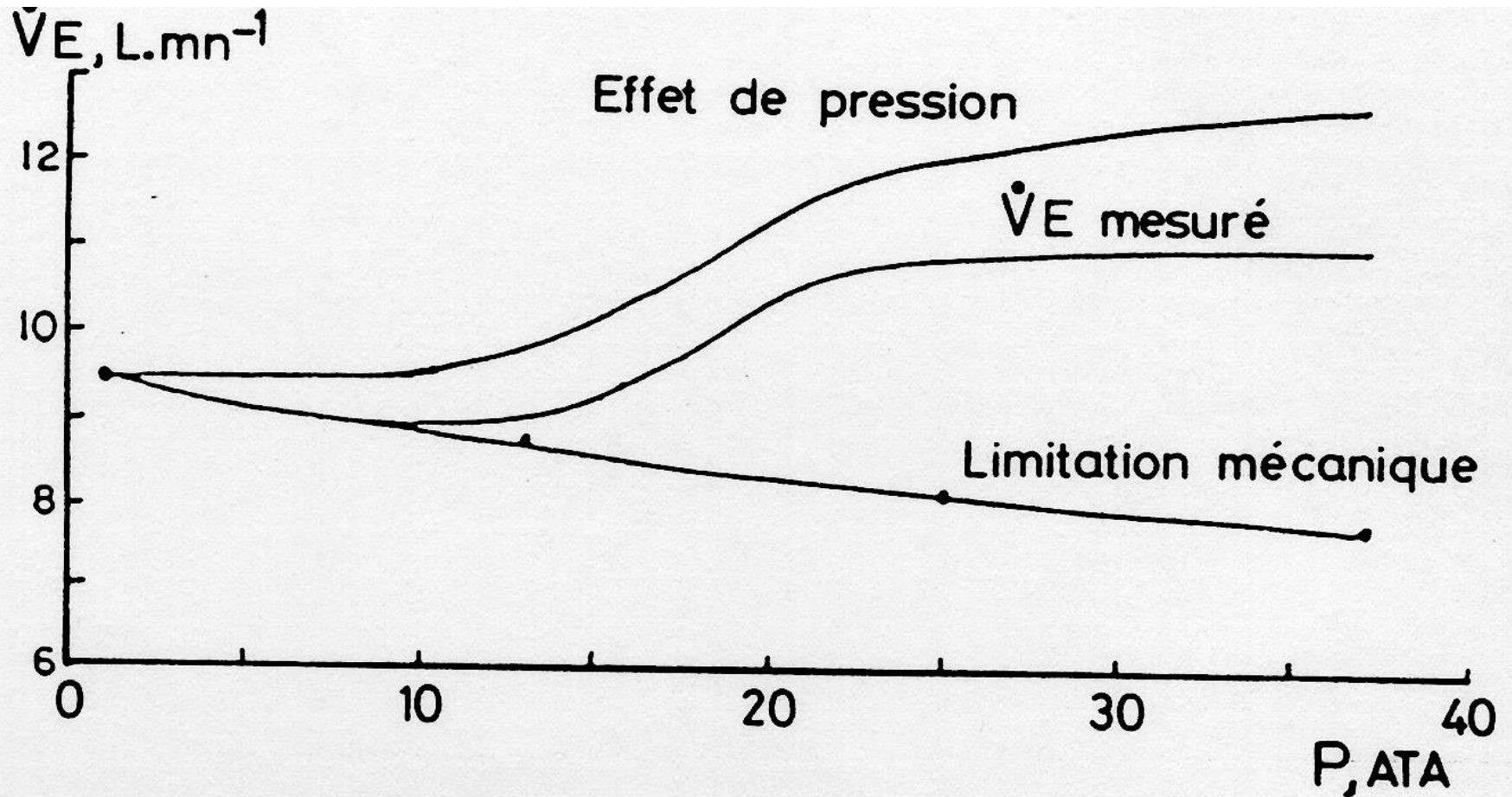
Réponse à l'hypoxie



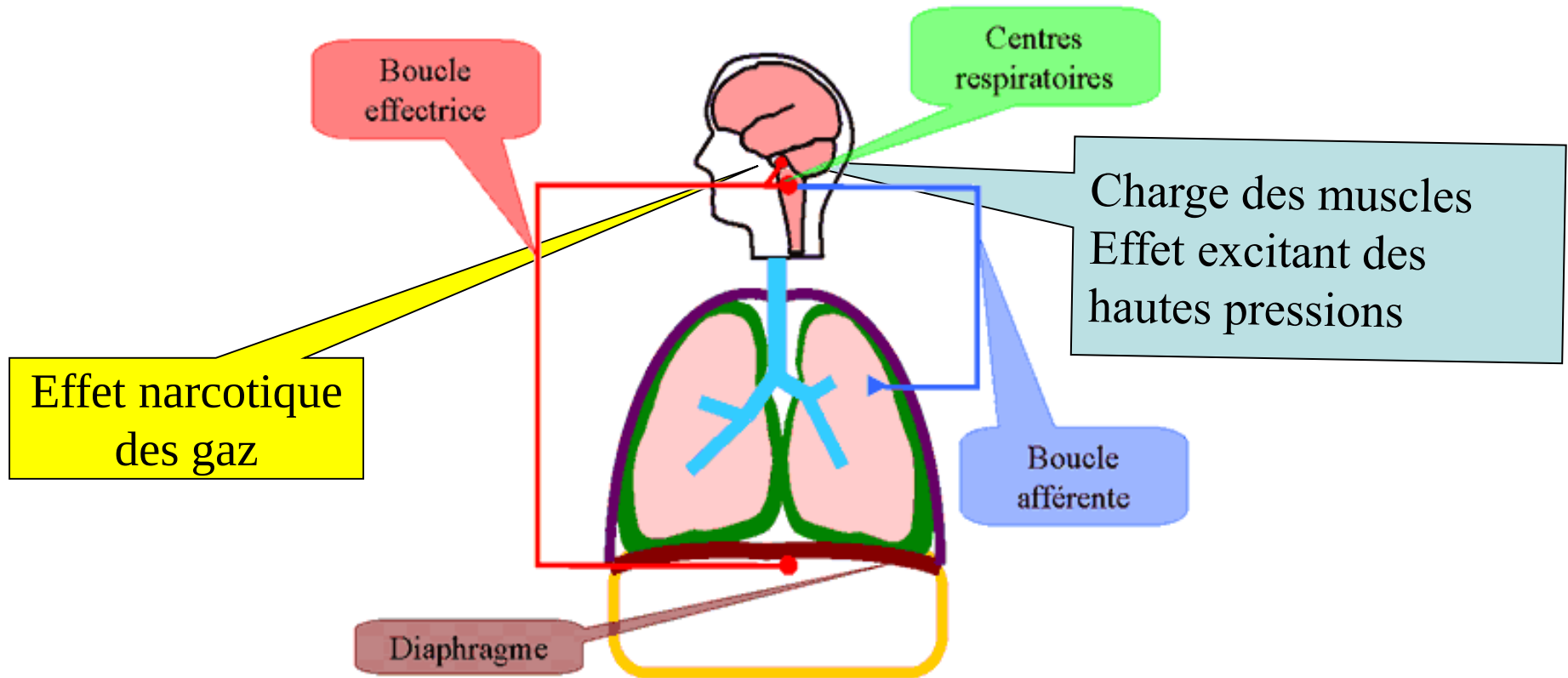
Réponse à l'hypercapnie



Effets de hautes pression de He-O₂ sur la ventilation de repos



Effet sur la commande centrale

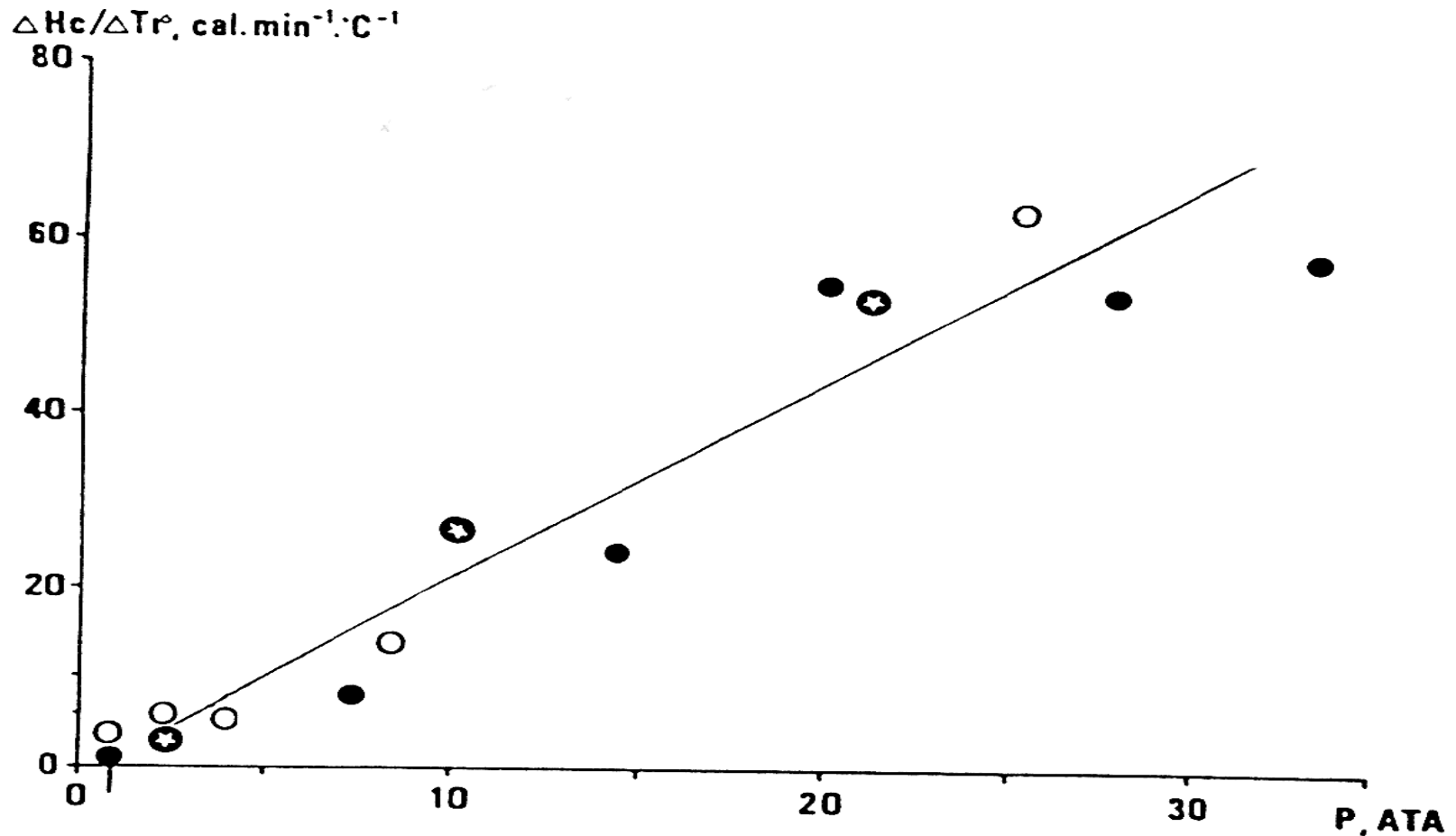


2.4 EFFETS DE L'HYPERBARIE SUR LES ECHANGES CALORIQUES RESPIRATOIRES

Température et humidification des gaz en normobarie

- Gaz alvéolaire
 - Température corporelle
 - Humidifié à 100%
- Perte Calorique :
 - 15 % de la déperdition thermique par convection (Hcv)
- Dépend de la Conductivité des Gaz et de la densité

Pertes thermiques respiratoires par convection respiratoire et augmentation de la densité

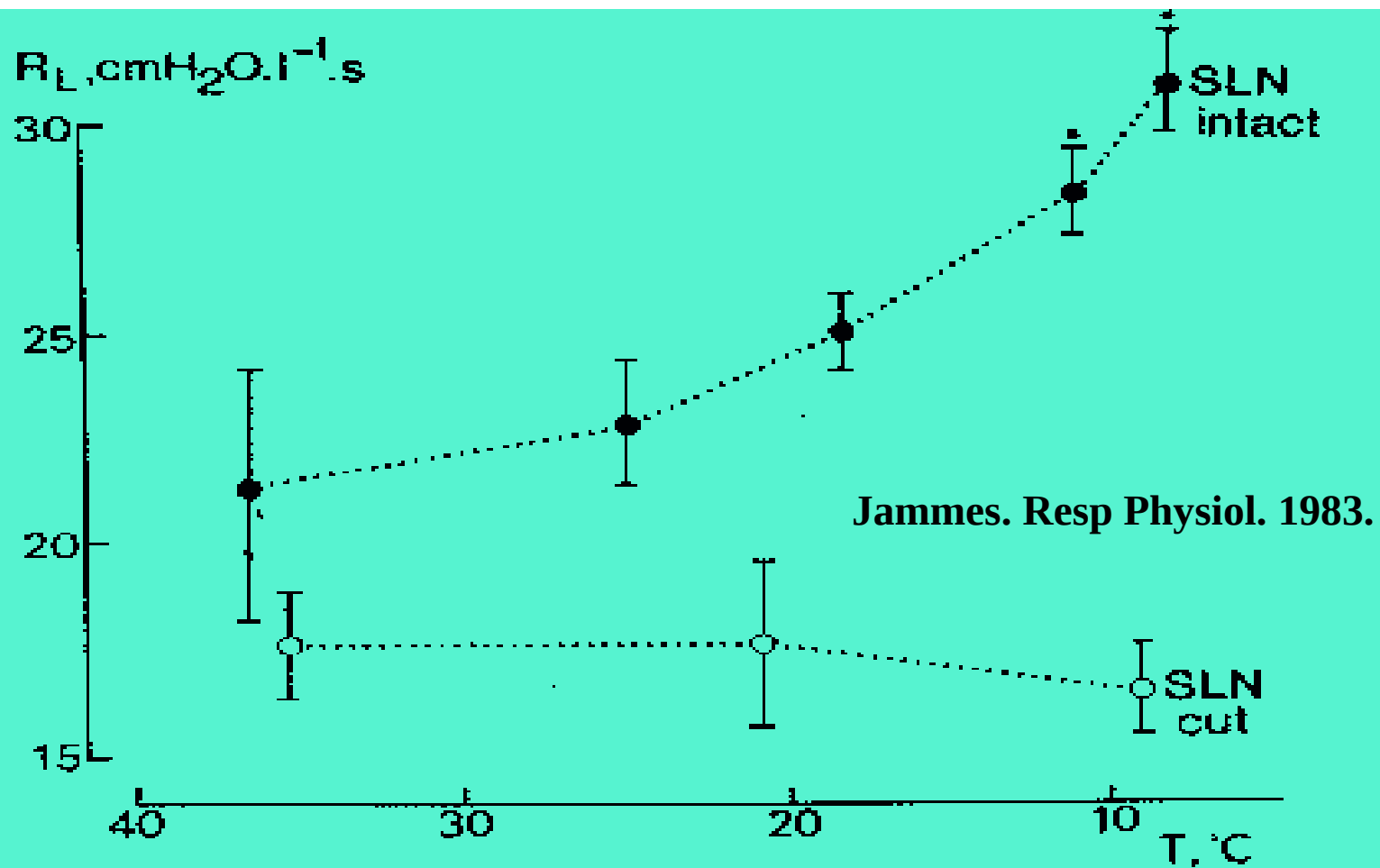


30 ATA : Confort thermique si T°C ambiante = 30 °C

Effets des gaz froids et secs

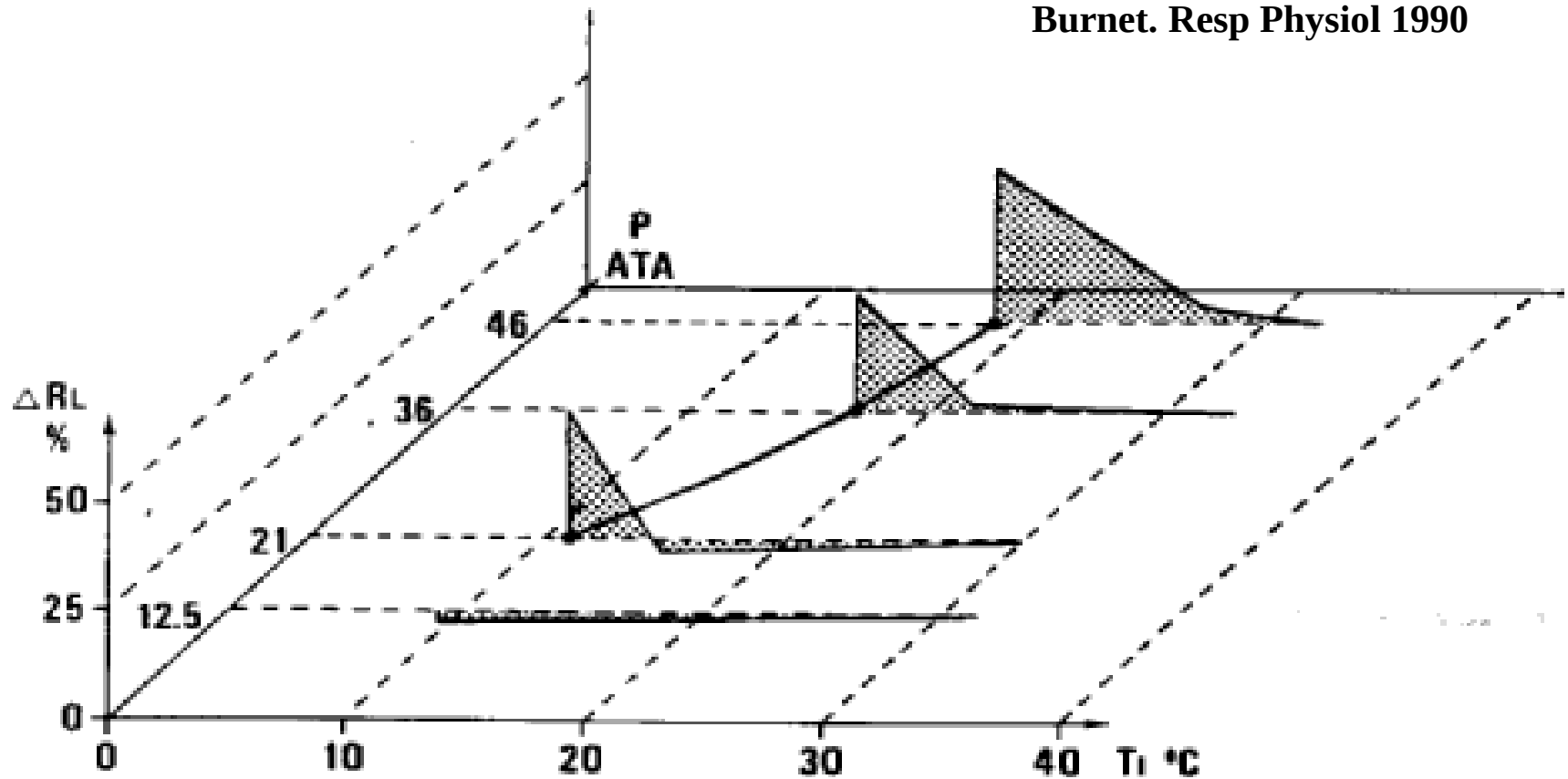
- Hypothermie
- Diminution FR, augmentation Vt
- Bronchospasme : augmentation Rinsp
- Lésions mucociliaires

Effet bronchoconstricteur des gaz froids (Animal)



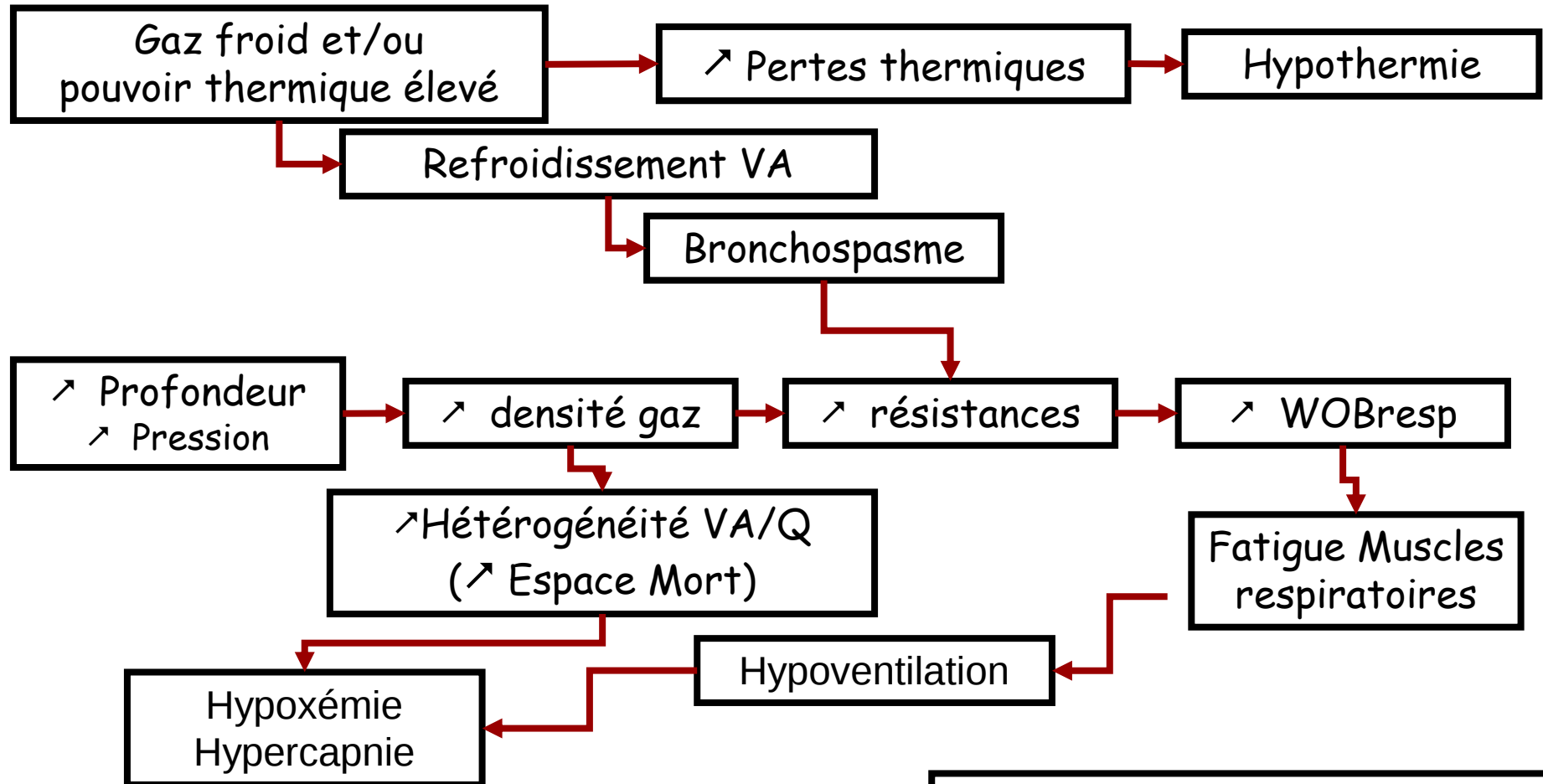
Effets des gaz froids et secs

Burnet. Resp Physiol 1990



2.5 SYNTHESIS

Effets de la pression sur la fonction respiratoire



40 m : effet densité des gaz
80 à 120 m : + effets thermiques

Grandes contraintes ventilatoires en milieu hyperbare

- **Mécanique ventilatoire : R+++, C, I**
- **Risque Hypercapnie**
- **Déperditions thermiques ventilatoires**
- **Commande ventilatoire : Narcose - SNHP**
- **Transport des gaz**

2.5 CONSEQUENCES PRATIQUES

Fonction respiratoire et Aptitude à la plongée

- Evaluation pulmonaire indispensable
- Plongée Contre Indiquée
 - Asthmatique
 - Emphysémateux
- EFR indispensable si doute
 - Test de réactivité bronchique (métacholine)
 - TLCO