

# **Chapitre 1 – La respiration, une fonction en interaction directe avec le milieu de vie**



Souffle de baleine

# Les gaz respiratoires dans la vie animale



Consommation d'oxygène par divers animaux au repos ou en activité

Espèce	Poids (grammes)	Consommation de O <sub>2</sub> (ml.kg <sup>-1</sup> .heure <sup>-1</sup> )
Paramécie	0,000001	500
Moule	25	22
Écrevisse	32	47
Papillon (Vanesse)	0,3	600
au repos		100.000
en activité		100
Poisson (Carpe)	200	100
Souris	20	2.500
au repos		20.000
courant		
Homme	70 000	200
au repos		4000
activité maximale		



# La teneur en gaz est donnée en pression partielle

Pression atmosphérique

$$P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 101,3 \text{ kPa} \approx 100 \text{ kPa}$$

Air sec : 79% N<sub>2</sub> + 20,95% O<sub>2</sub> + 0,04% CO<sub>2</sub> + Ar

Pression partielle = fraction du gaz x P<sub>atm</sub>

$$P_{\text{O}_2} = ??? \text{ kPa}$$

# La teneur en gaz est donnée en pression partielle

Pression atmosphérique

$$P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 101,3 \text{ kPa} \approx 100 \text{ kPa}$$

Air sec : 79% N<sub>2</sub> + 20,95% O<sub>2</sub> + 0,04% CO<sub>2</sub> + Ar

Pression partielle = fraction du gaz x P<sub>atm</sub>

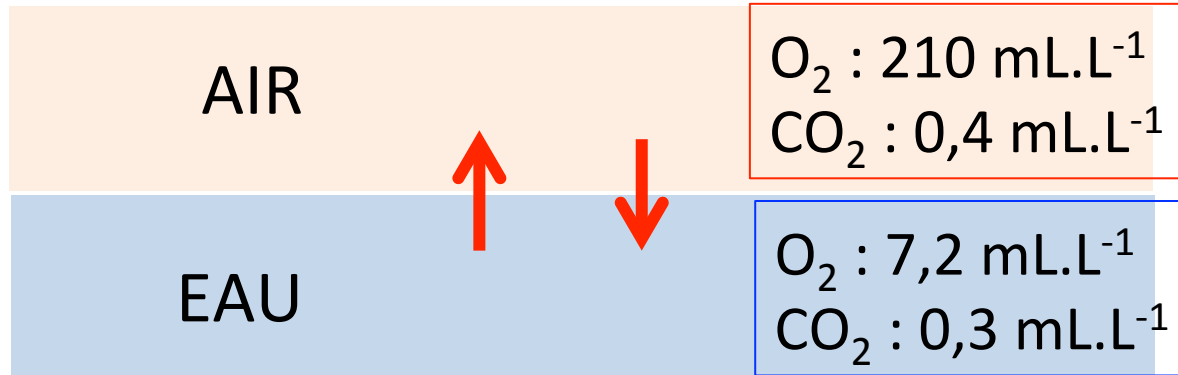
$$PO_2 \approx 0,21 \times 100 = 21 \text{ kPa}$$

*Attention : à 6 000 m d'altitude, P<sub>atm</sub> = 50 kPa...*



# Les gaz dans l'air et dans l'eau

Les gaz se dissolvent dans l'eau jusqu'à ce que les pressions partielles soient égales dans les deux milieux (du moins en surface).



La quantité d'un gaz dissoute dans l'eau dépend :

- de la pression partielle dans le milieu aérien ;
- de sa solubilité.

# Solubilité des gaz respiratoires

D'après la **loi de Henry**, la concentration  $C$  d'un gaz dans un liquide en équilibre avec une phase gazeuse où il possède une pression  $P$  vaut :

$$C = \alpha \cdot P \quad \text{avec } \alpha \text{ coefficient de solubilité du gaz}$$

en mL.L <sup>-1</sup>	Dioxygène			CO <sub>2</sub>	
	air	eau douce	eau de mer 3,6%	air	eau douce
0°C	210	10,2	8,0	0,4	
12°C	200	7,7	6,1	0,39	3,6
24°C	190	6,2	4,9	0,38	

$\alpha$  dépend de la nature du milieu, de la température et de la salinité.

# Vitesse de diffusion

La vitesse de diffusion d'un soluté A de concentration C à travers une surface S est donnée par la première loi de Fick :

$$\frac{dA}{dt} = - D \cdot S \cdot \frac{dC}{dx} \quad \text{avec } D = \text{coefficient de diffusion}$$

En intégrant sur une épaisseur e, on obtient le flux qui traverse la surface S

$$\text{Flux} = - D \cdot S \cdot \frac{\Delta C}{e} \quad \text{ou}$$

$$\text{Flux} = - k \cdot S \cdot \frac{\Delta P}{e}$$

$$D_{O_2, \text{air}} = 0,196 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

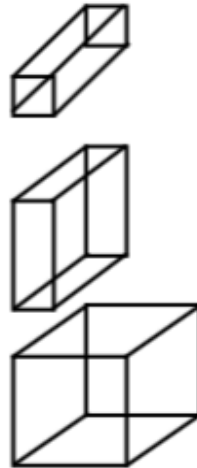
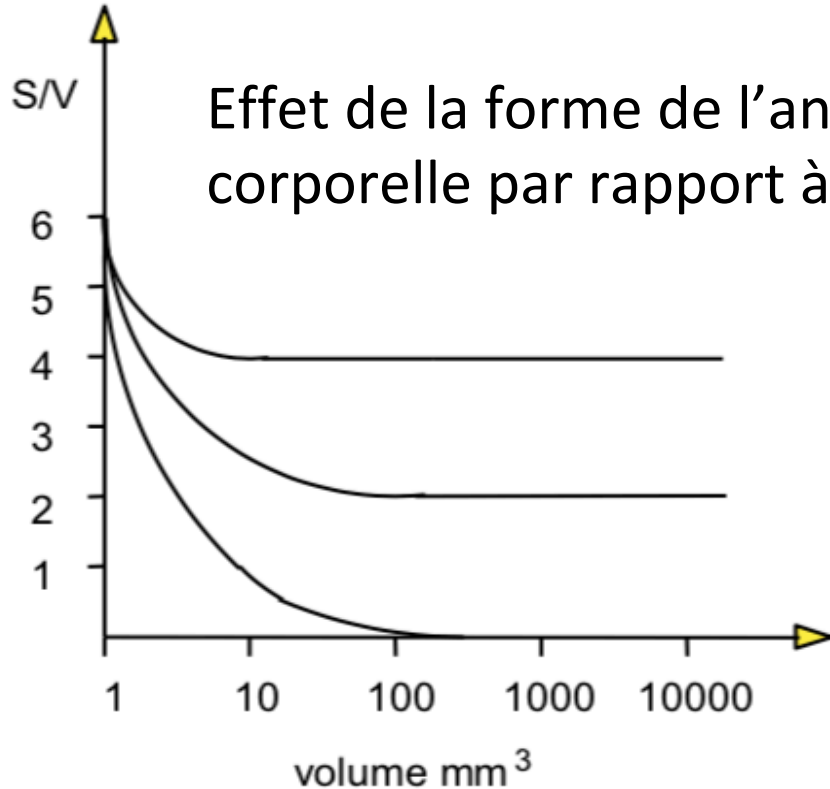
$$D_{O_2, \text{eau}} = 0,0000183 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{où } k = \alpha \cdot D$$

avec  $\alpha$  coefficient de solubilité du gaz

Et k, constante de diffusibilité en  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$

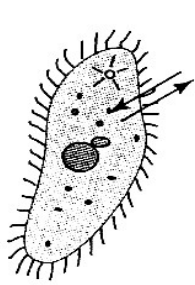
# La diffusion simple au niveau de la surface de l'animal



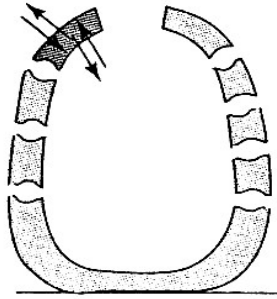
$$\text{Flux} = -k \cdot S \cdot \frac{\Delta P}{e}$$

La diffusion est limitée par la distance (1 cm maximum)

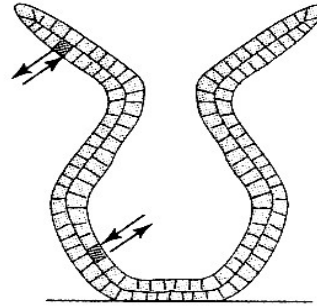
# La diffusion simple



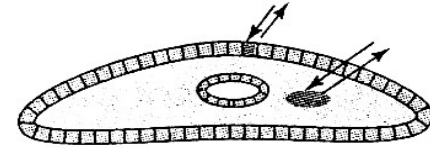
Protozoaire



Spongiaire  
(coupe)



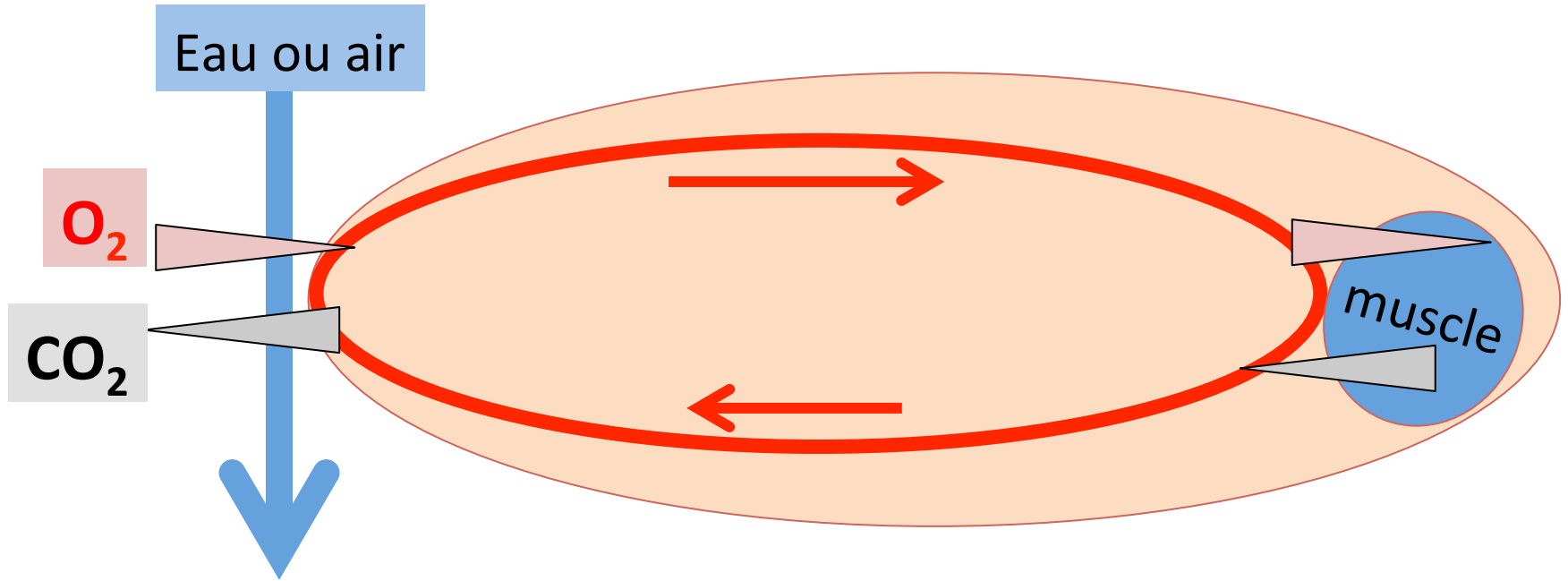
Cnidaire  
(coupe)



Plathelminthe  
(coupe)

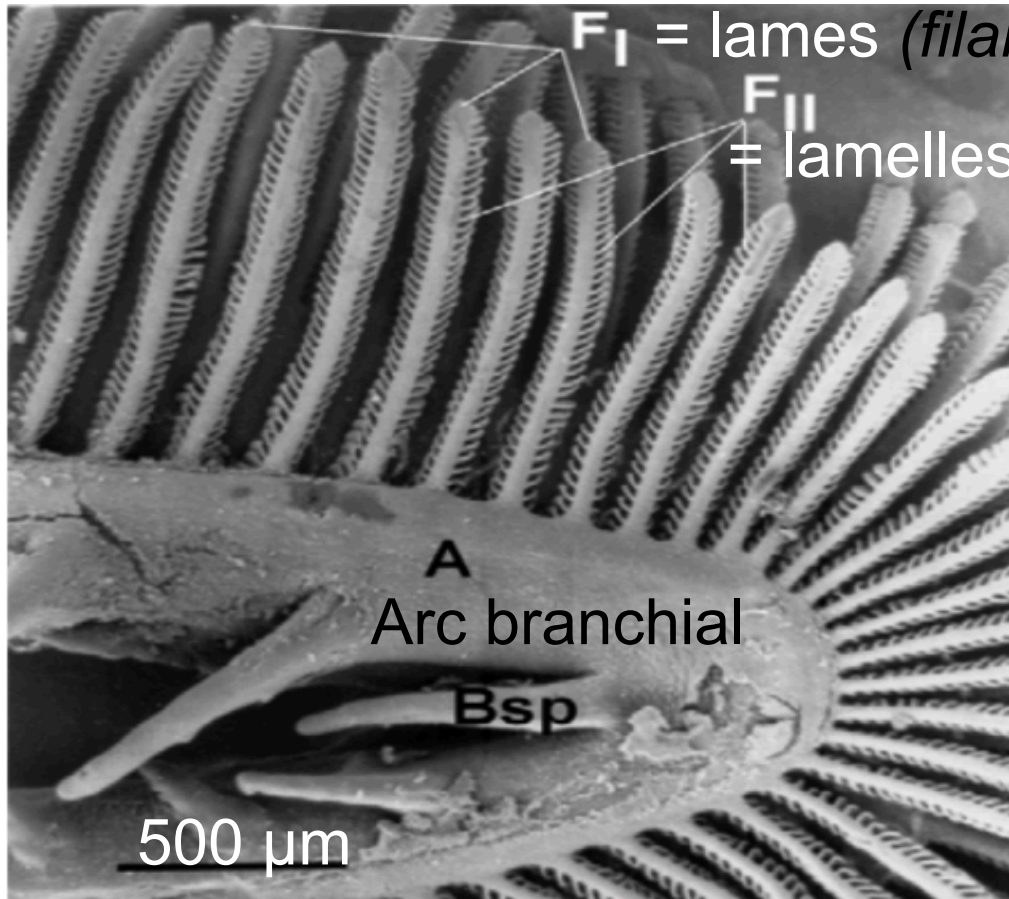


# Des échangeurs spécialisés et une convection



# **1. Des échanges gazeux réalisés au niveau d'échangeurs**

# Une vaste surface



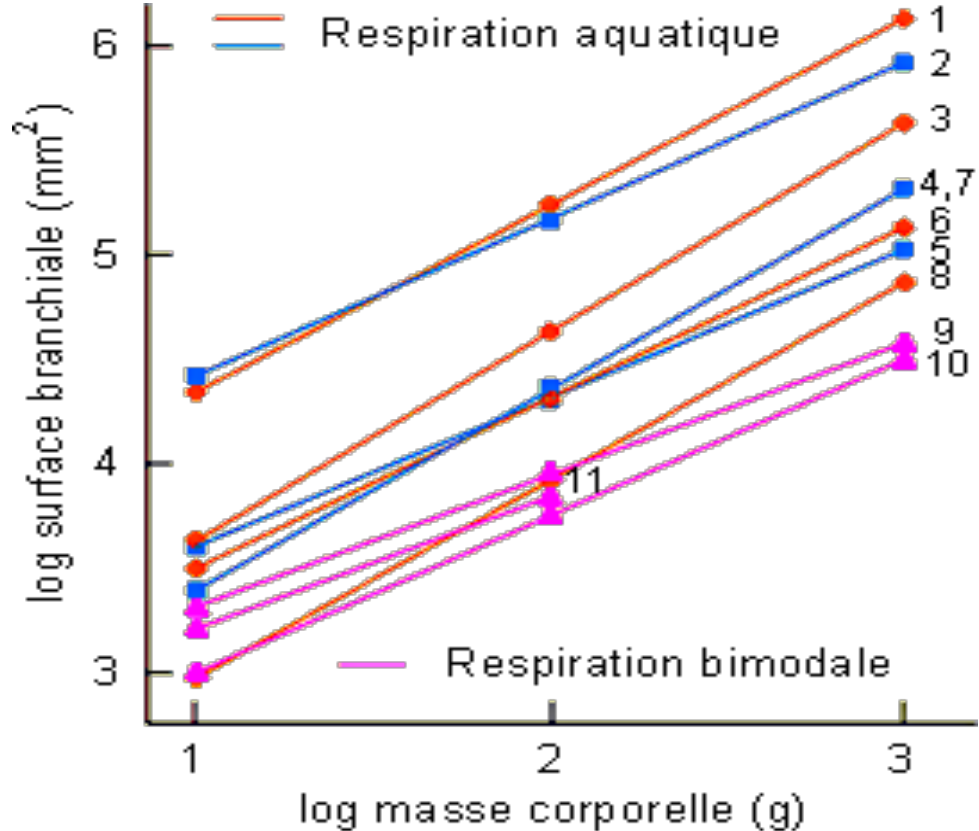
Bsp = branchiospine

*MEB d'une branchie de Truite arc-en-ciel*

(Cliché S. Chilmonczyk)



# Une surface branchiale liée à la masse et à l'activité



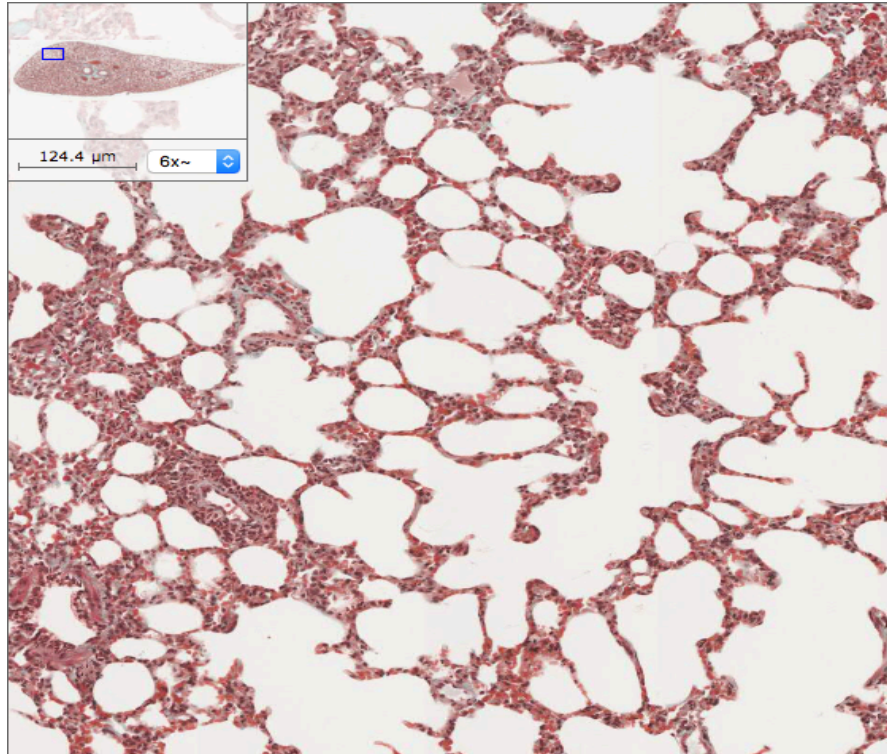
Poisson très actif

Poisson peu actif

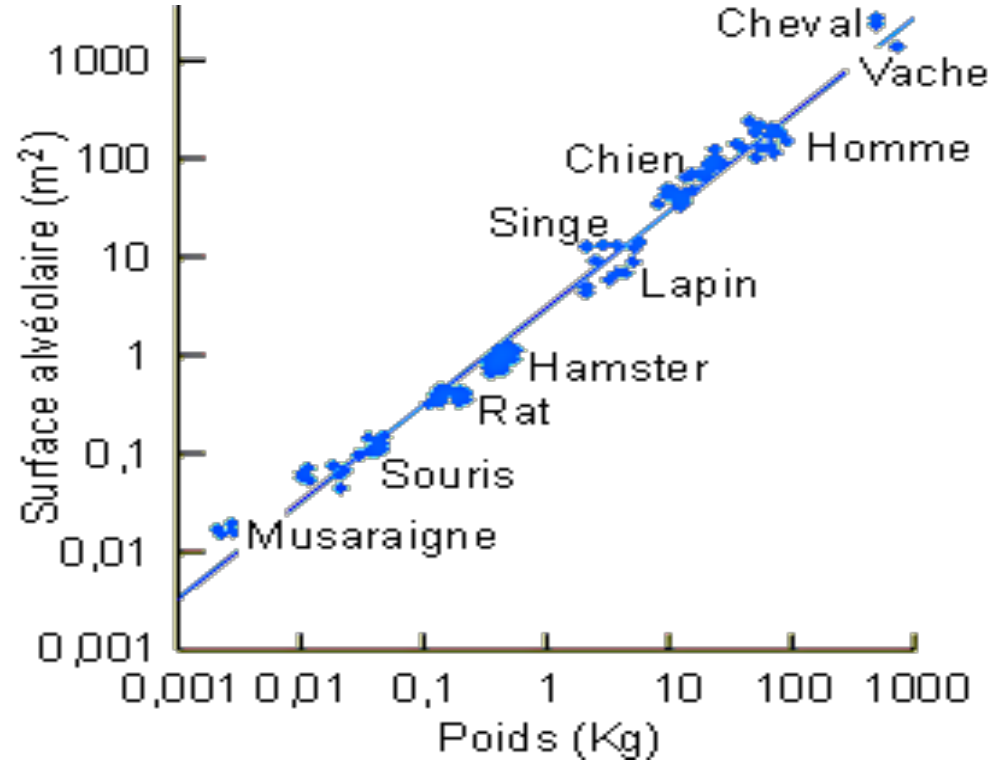
Poissons respirant aussi par la peau

1: Thon albacore, 2: Mahi-mahi,  
3 : Maquereau, 4 : Saumon,  
5 : Sambre, 6 : Poisson crapaud  
huître, 7: Petite roussette, 8 : Raie  
torpille, 9 : Anabas, 10 : Silure  
fossile, 11: Poisson tête de serpent.

# Une vaste surface liée à la masse de l'animal

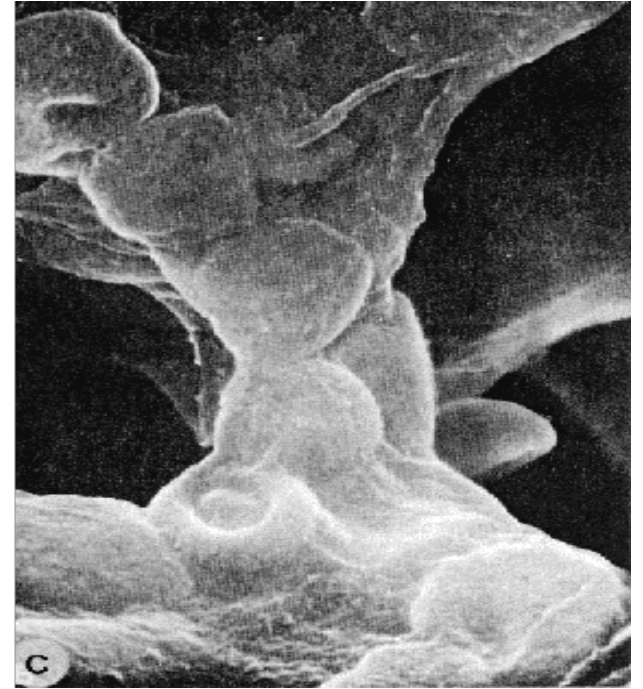


Coupe de poumon de chien (histology.be)



85 m<sup>2</sup> pour l'Homme

# Une fine épaisseur : cas des Mammifères

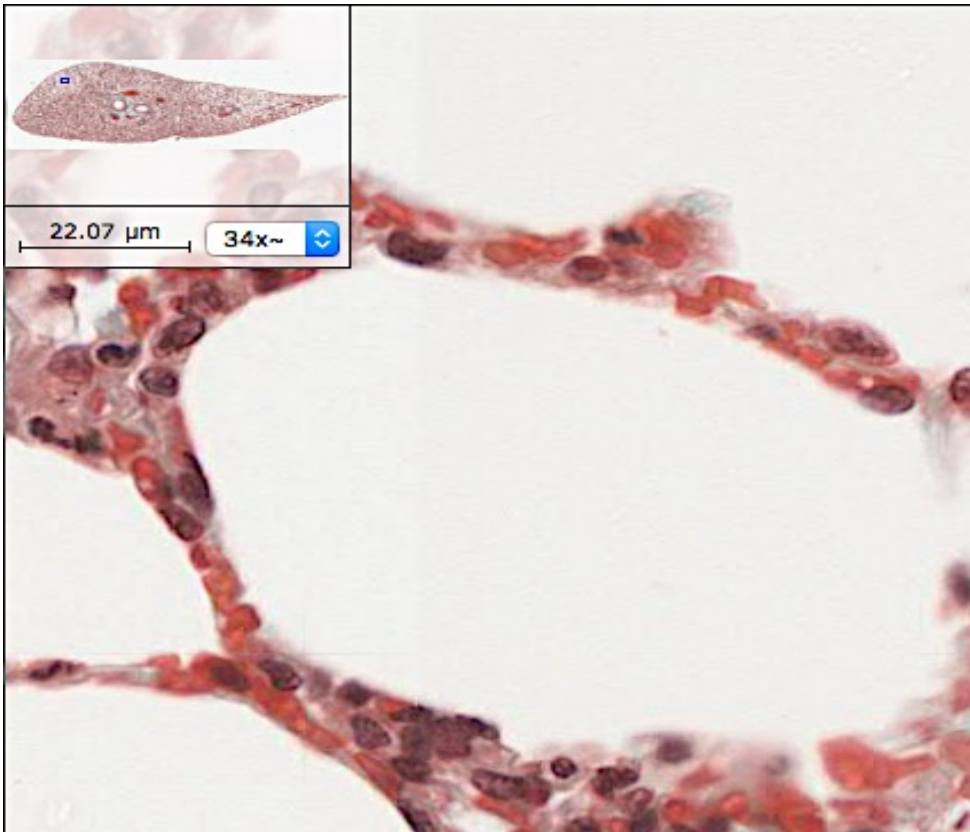


MEB x 7230

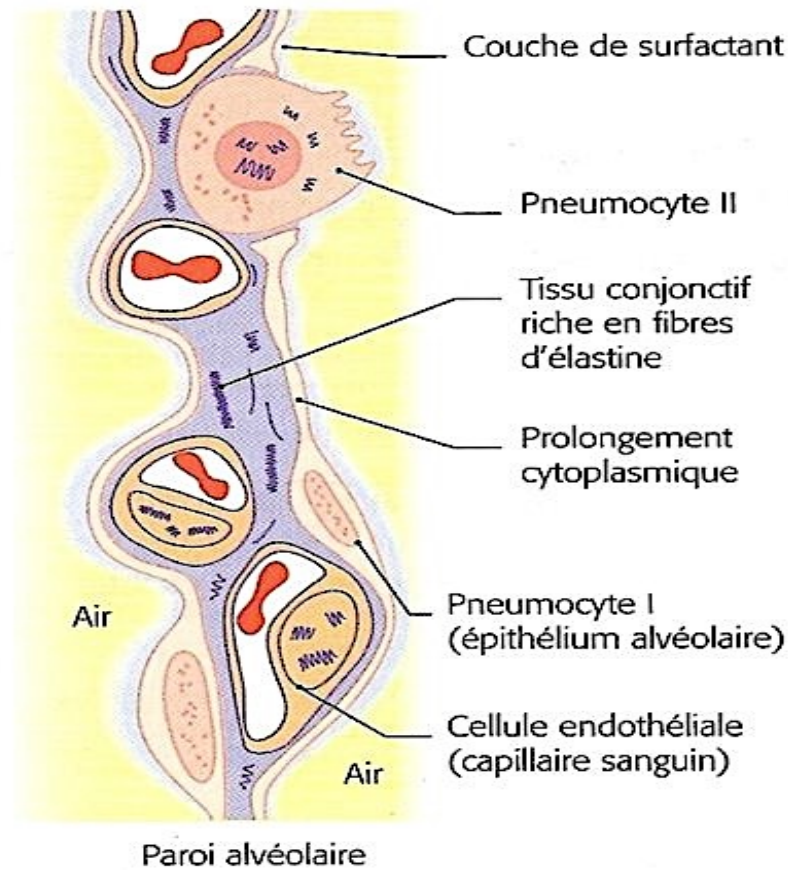
*Observation en MET de coupe transversale de poumon de Chien.  
L'ensemble de l'image fait 0,15 mm de large.*

Source : Junqueira 1992

# Une fine épaisseur

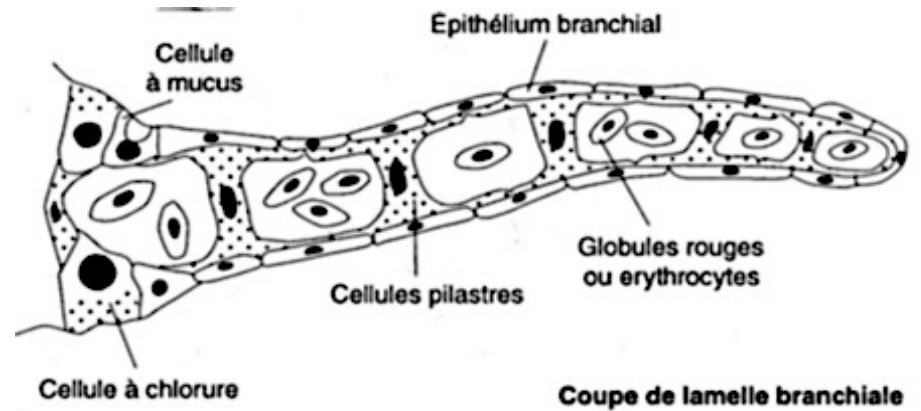
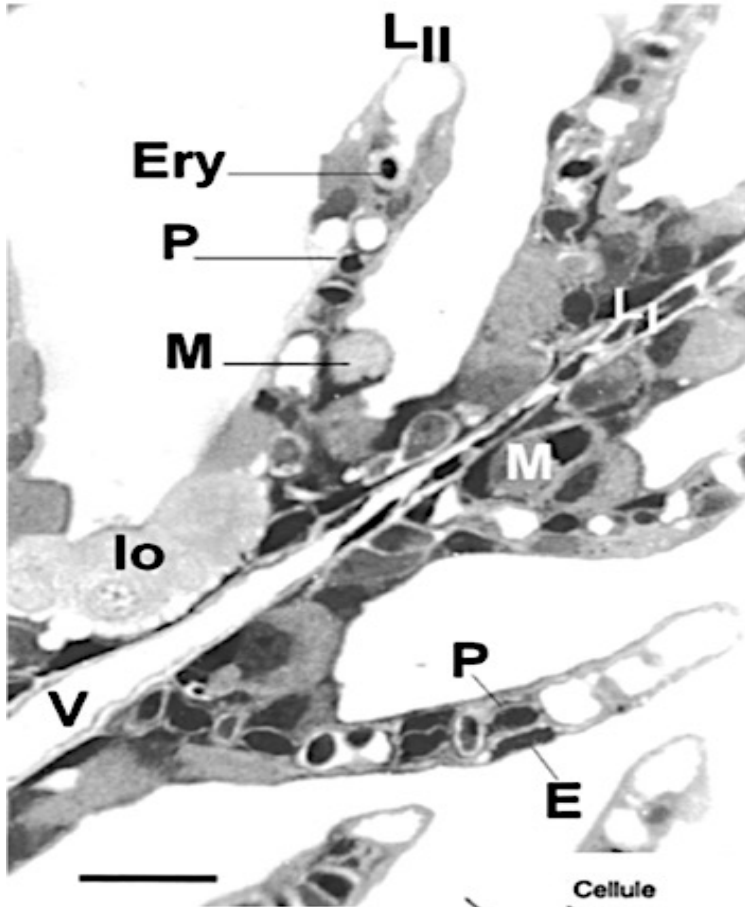


Coupe de poumon de chien (histology.be)



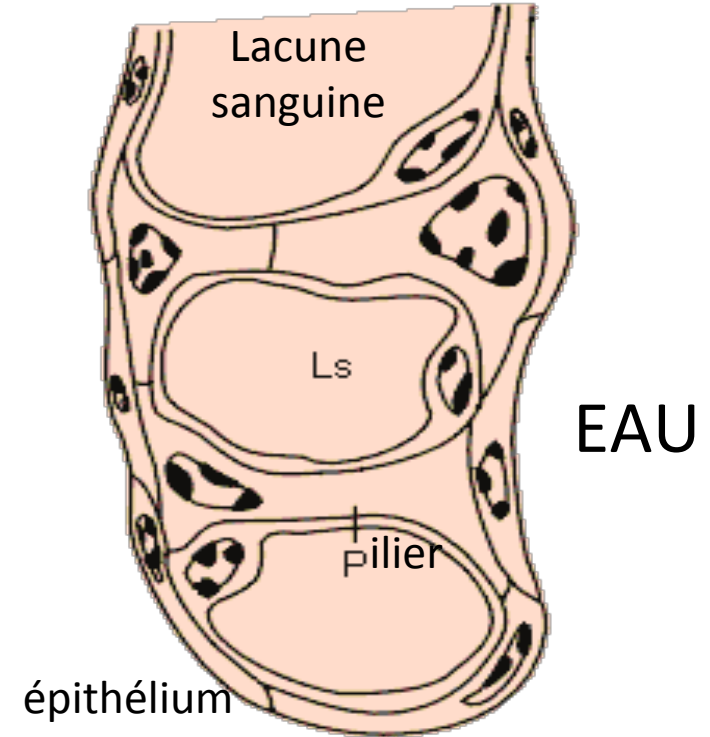
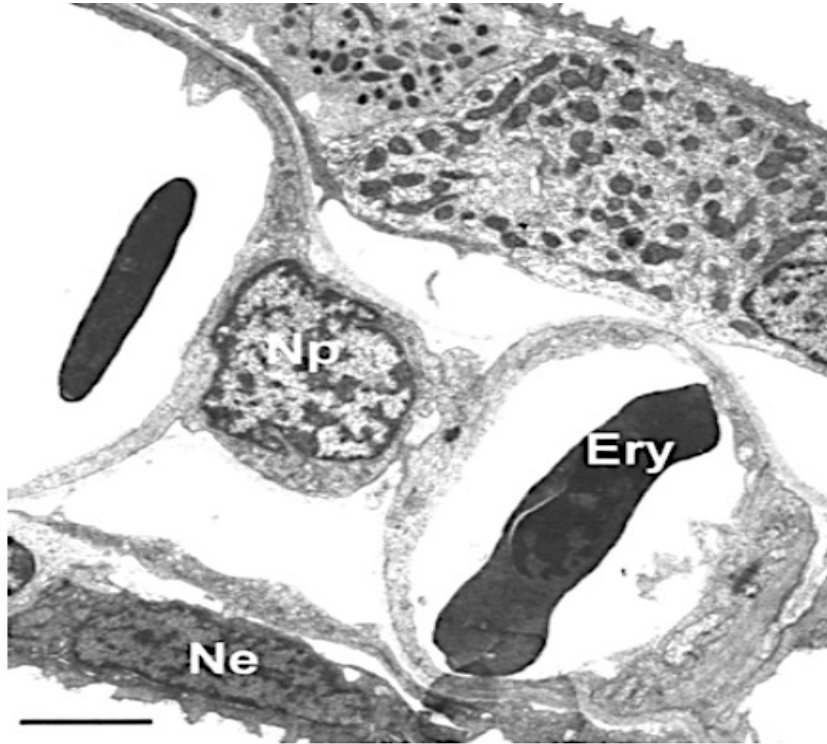


# Une fine épaisseur : exemple des Téléostéens



CT de **lamelles** (LII) montrant un vaisseau sanguin (V) dans la lame et les différents types cellulaires : Io, ionocyte ou cellule à chlorure à la base des lamelles ; **E, cellule épithéliale respiratoire** ; M, mucocyte ; **P, cellule pilastre** ; **Ery, érythrocyte** ;  
barre = 25  $\mu\text{m}$

# Une fine épaisseur : exemple des Téléostéens



Electromicrographie d'une coupe transversale ultrafine de lamelle branchiale : Ery, érythrocyte ; Ne, noyau d'un épithéliocyte branchial ; Np, noyau d'une cellule pilastre. Barre = 1  $\mu\text{m}$  (Cliché S. Chilmonczyk)

# Bilan

- Vaste surface
- Fine épaisseur
- Renouvellement des fluides de chaque côté de l'échangeur

$$\text{Flux} = -k \cdot S \cdot \frac{\Delta P}{e}$$

## **2. Des surfaces développées en lien avec le milieu de vie**



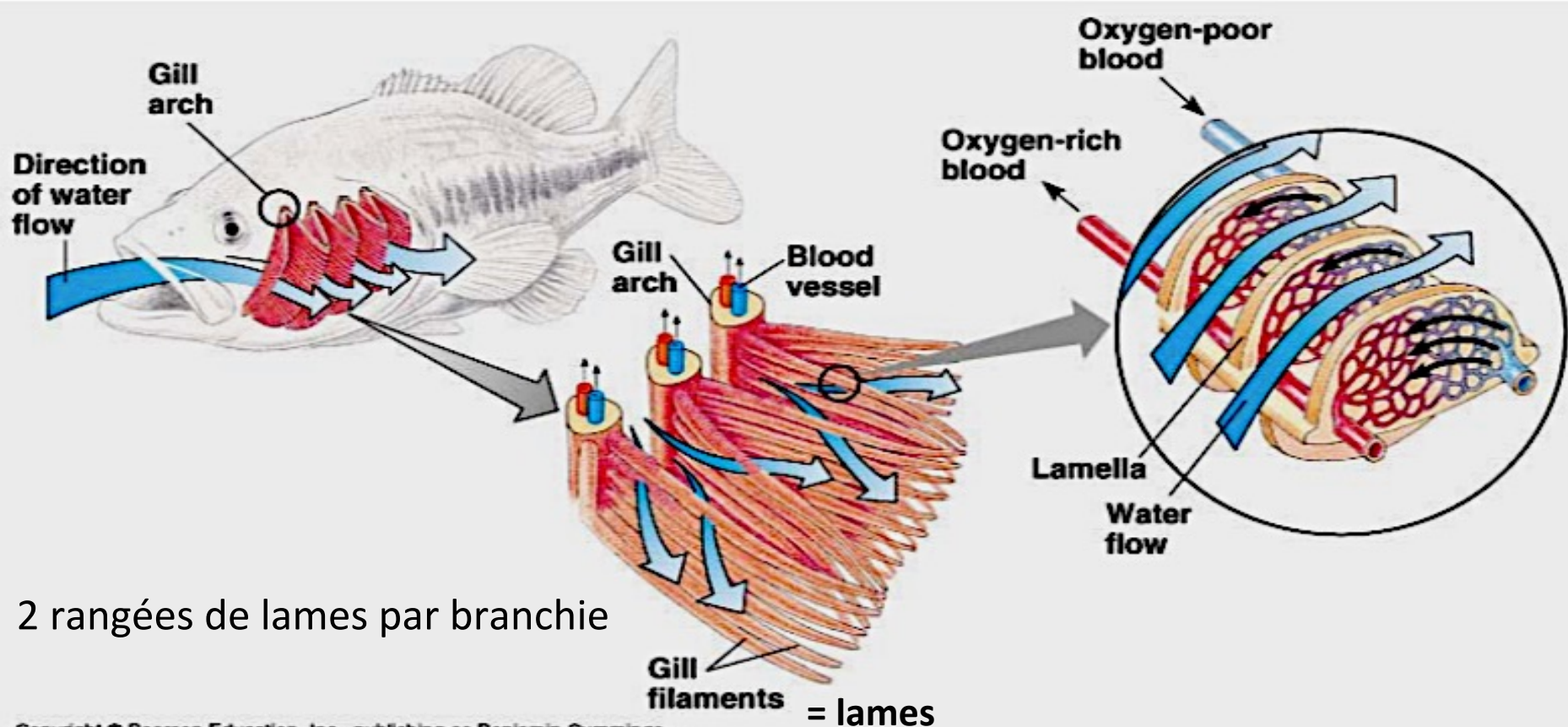
# Des milieux différents

	<b>AIR</b>	<b>EAU (à 20°C)</b>
Solubilité en mL.L <sup>-1</sup>	210	6,5 (eau douce) 5,2 (eau de mer)
Densité	0,0013	1
Viscosité en cP (= mPa.s)	0,02	1
$k_{O_2}$ en nmol.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .Pa <sup>-1</sup>	7,8	$3,8.10^{-5}$
$k_{CO_2}$ en nmol.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .Pa <sup>-1</sup>	6,2	$6,8.10^{-4}$
capacité thermique (J.°C <sup>-1</sup> )	1,2	$4,2.10^{-3}$
teneur en eau en ppm V	0, 4 à 40 000	$10^6$

## **2.1. La respiration en milieu aquatique**

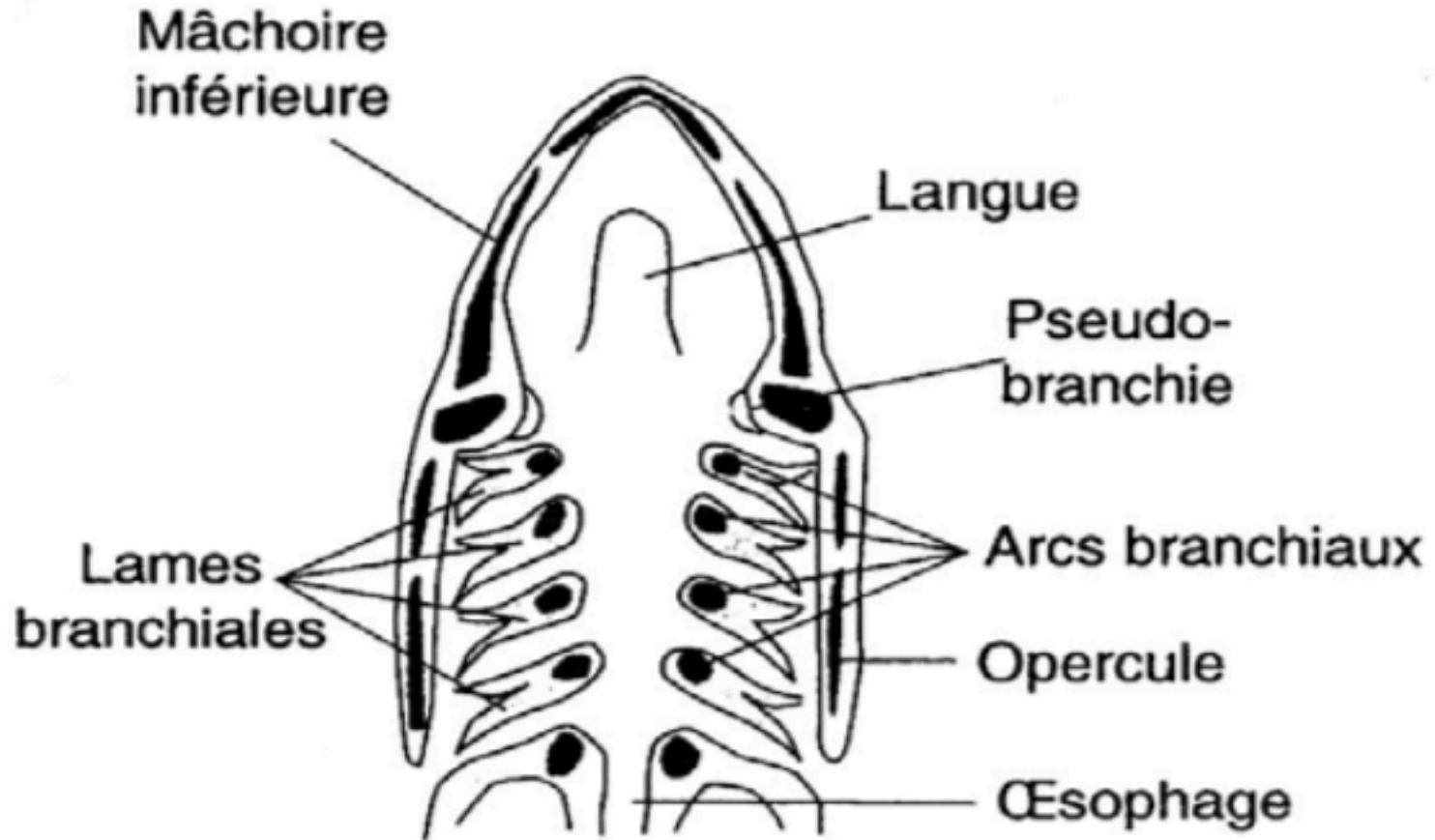
### **a. Les poissons Téléostéens**

# Les branchies des Téléostéens

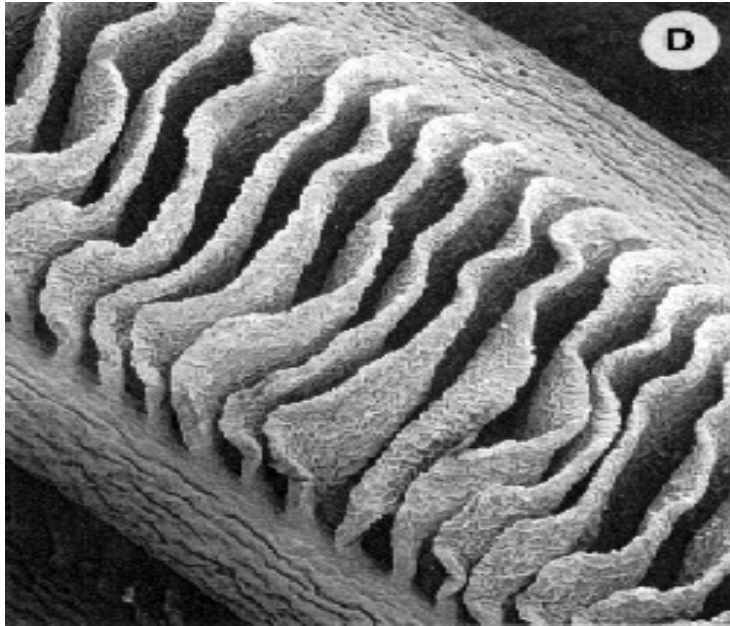


2 rangées de lames par branchie

# Les branchies d'un Téléostéen

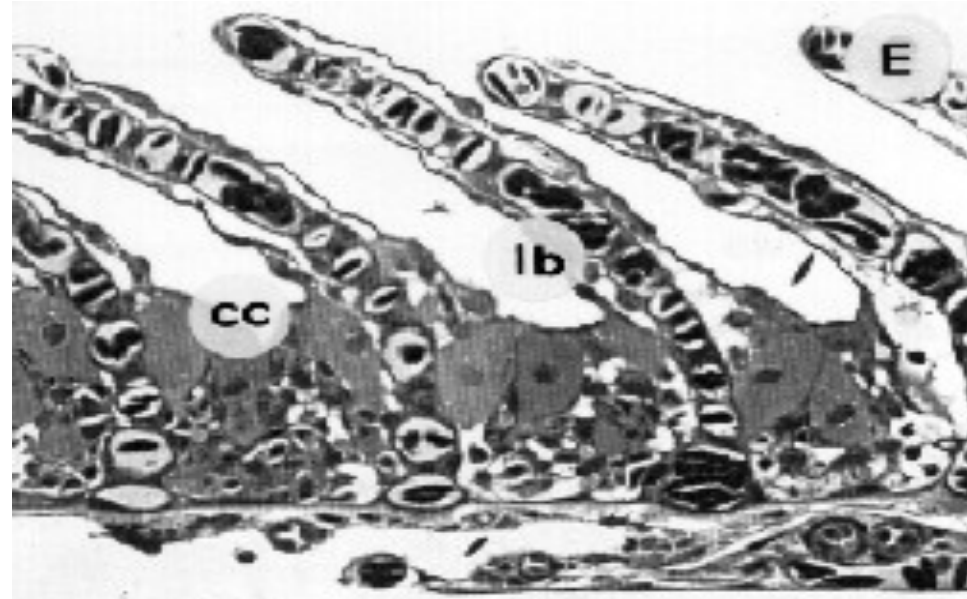


# Branchies de Téléostéen



Segment de lame branchiale de sole (MEB). On compte de 20 à 80 lamelles par mm de lame branchiale chez les téléostéens.

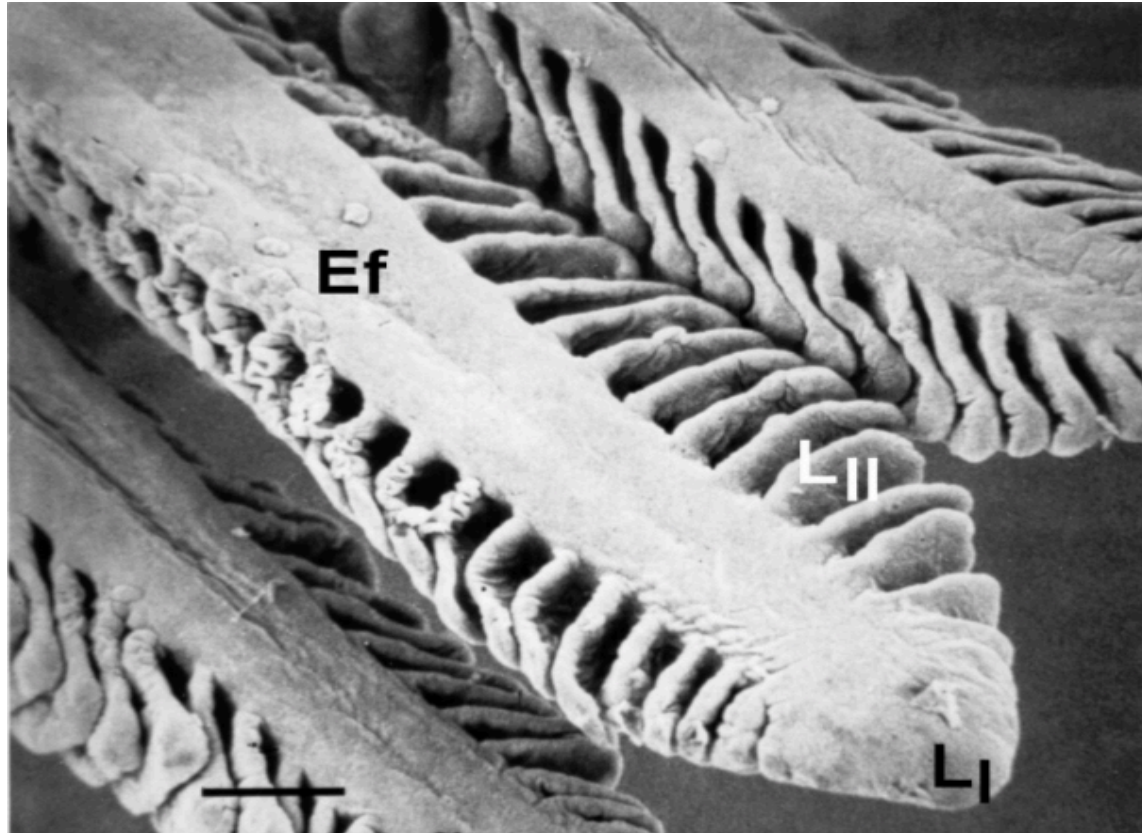
½ lame branchiale  
d'anguille marine  
(MET)



CC: cellule à chlorure, LB: lamelle branchiale

Source : Dr P. Laurent (1996)

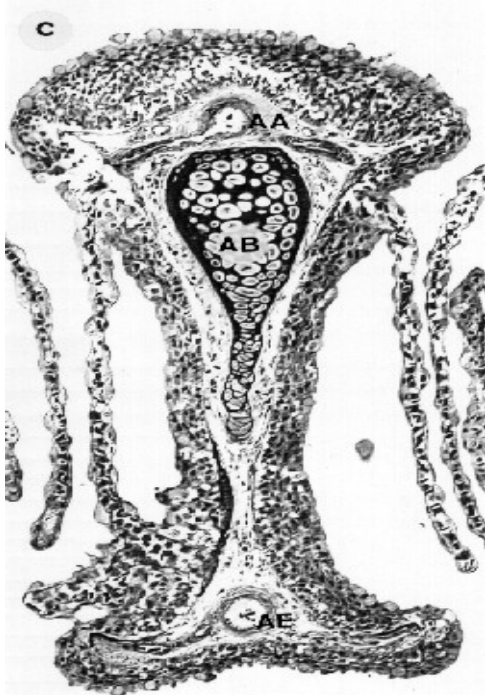
# Lame branchiale (Ef) et lamelles branchiales $L_{II}$



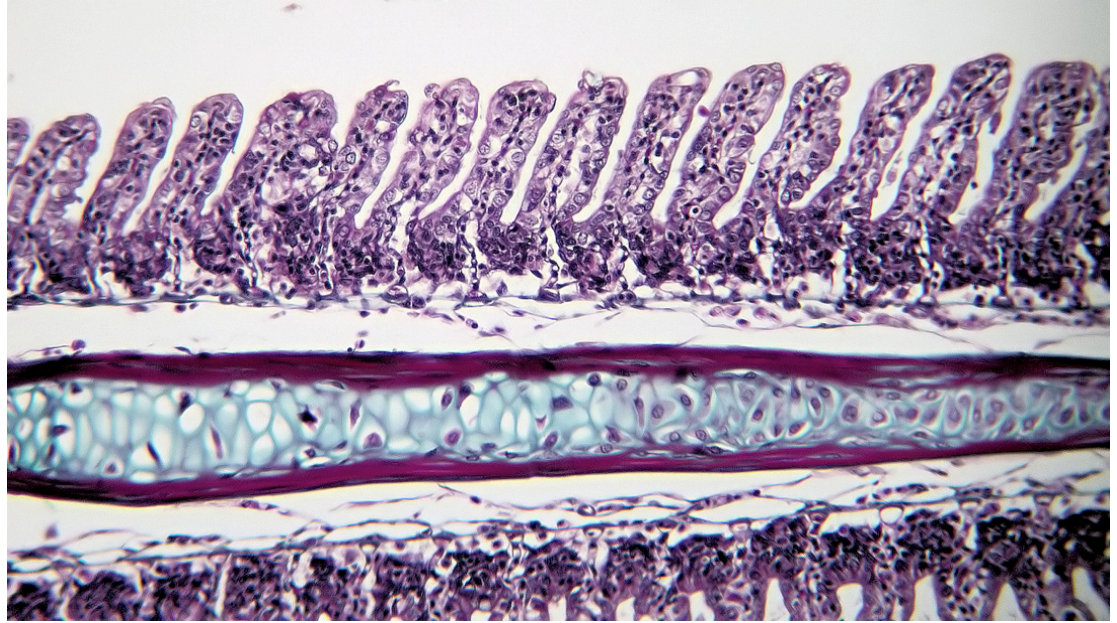
barre = 50  $\mu\text{m}$  (Cliché S. Chilmonczyk)



# Soutien des surfaces d'échange

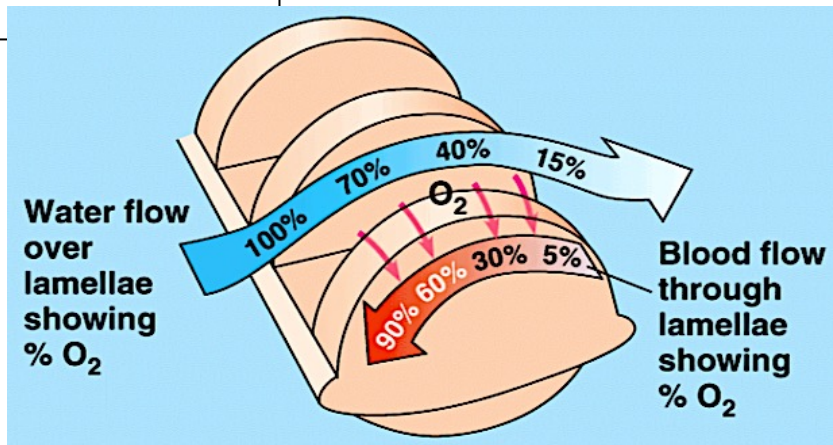
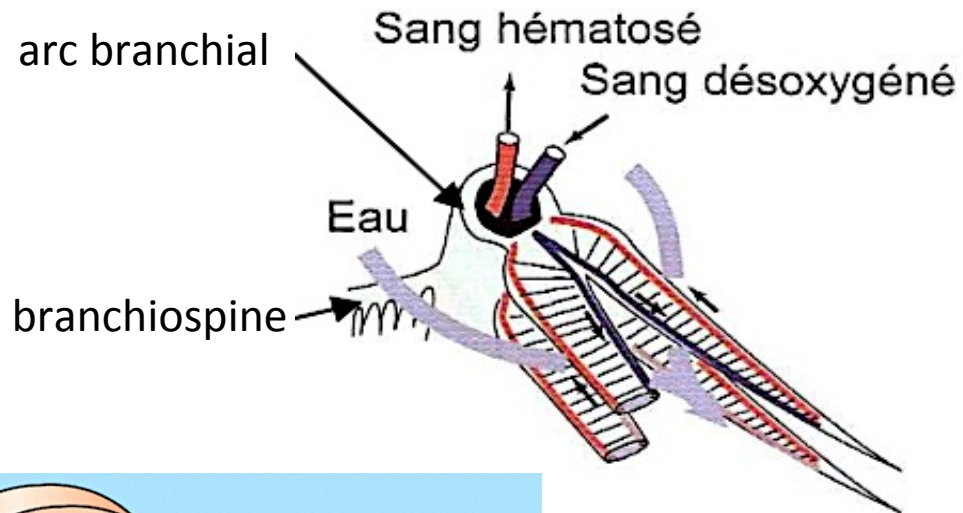
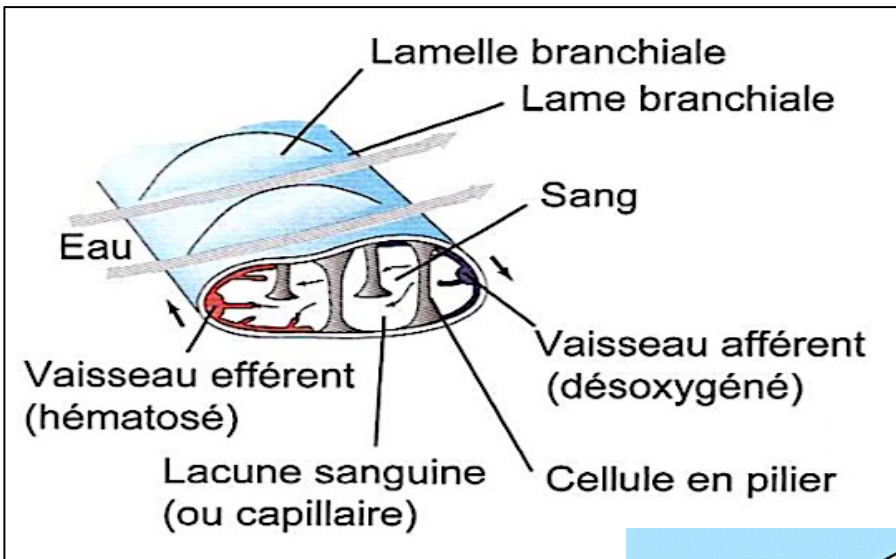


CT d'une lame branchiale de truite (MET)  
AB: arête branchiale, AA: artériole afférente, AE: artériole efférente,



Baguette de cartilage dans la lame branchiale

# Le contre-courant

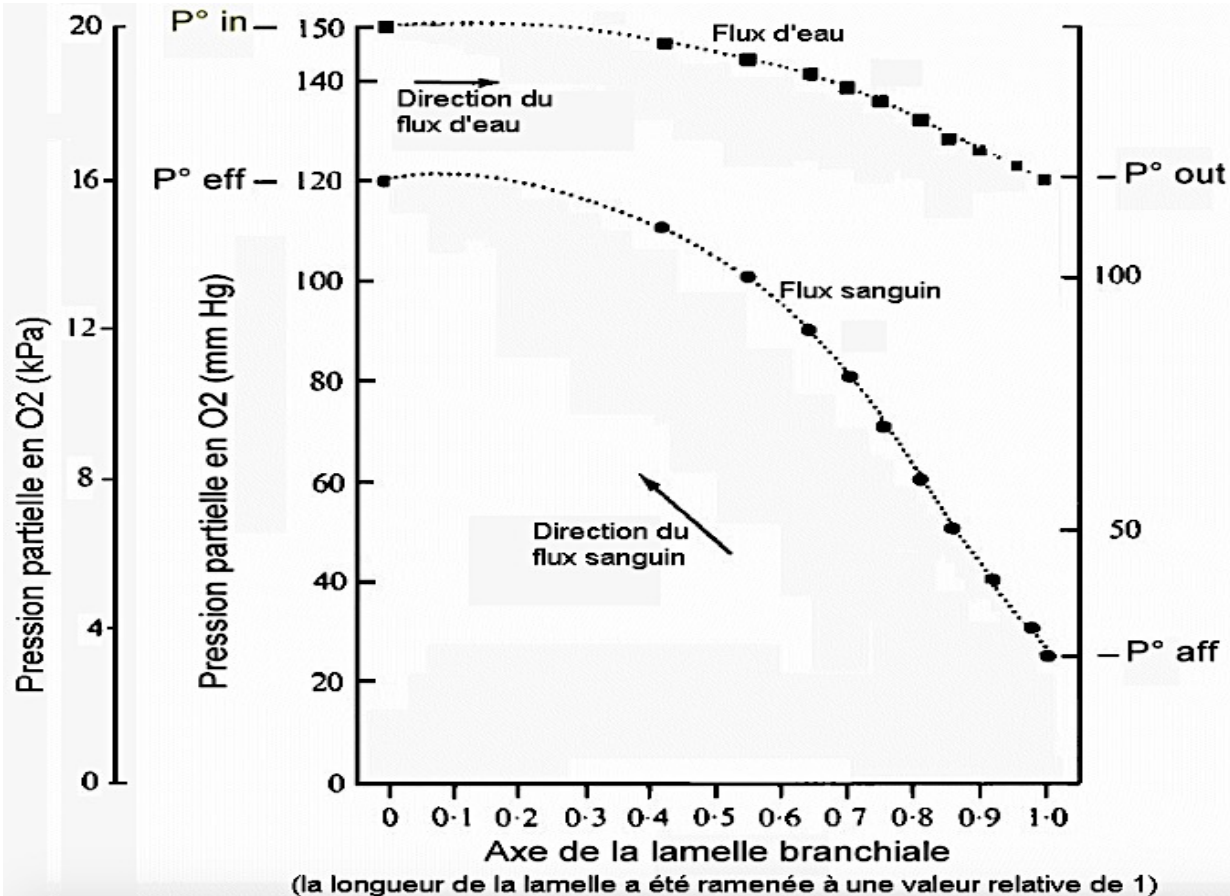


Source : Daniel Richard

Source : Pearson Education



# Le contre-courant



P<sup>o</sup> in: pression partielle en O<sub>2</sub> de l'eau entrant dans la cavité branchiale

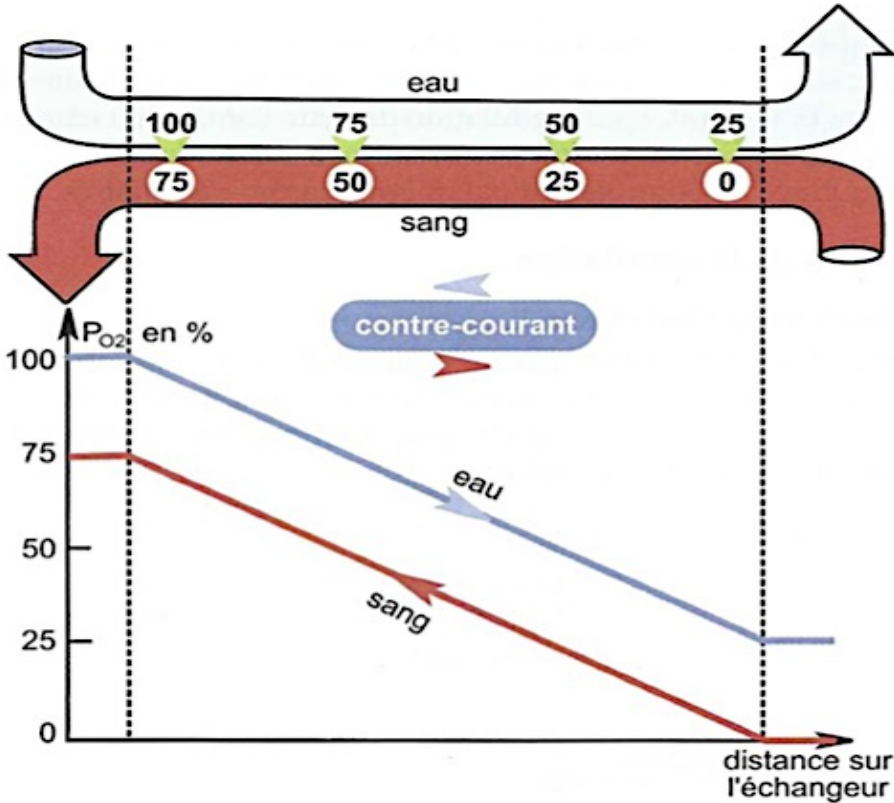
P<sup>o</sup> out: pression partielle en O<sub>2</sub> de l'eau sortant dans la cavité branchiale

P<sup>o</sup> eff: pression partielle en O<sub>2</sub> du sang sortant de la branchie

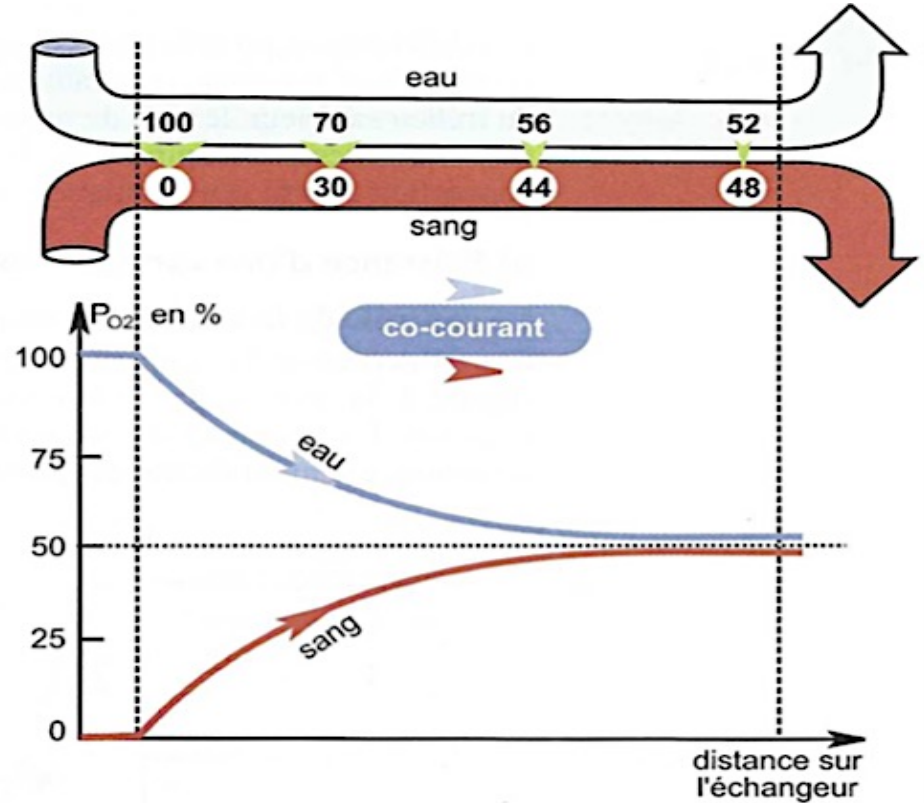
P<sup>o</sup> aff: pression partielle en O<sub>2</sub> du sang entrant dans la branchie

D'après : G.M. Hughes, *Journal of experimental biology*, 56, 481-492 (1972)

# Le contre-courant maintient la valeur de $\Delta P$

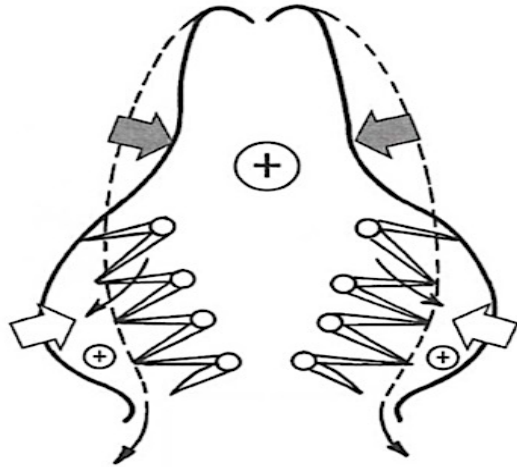


Branchie de Poisson avec contre-courant

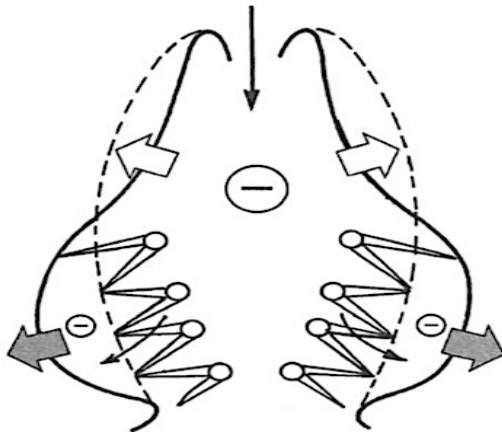


Branchie d'Ecrevisse sans contre-courant

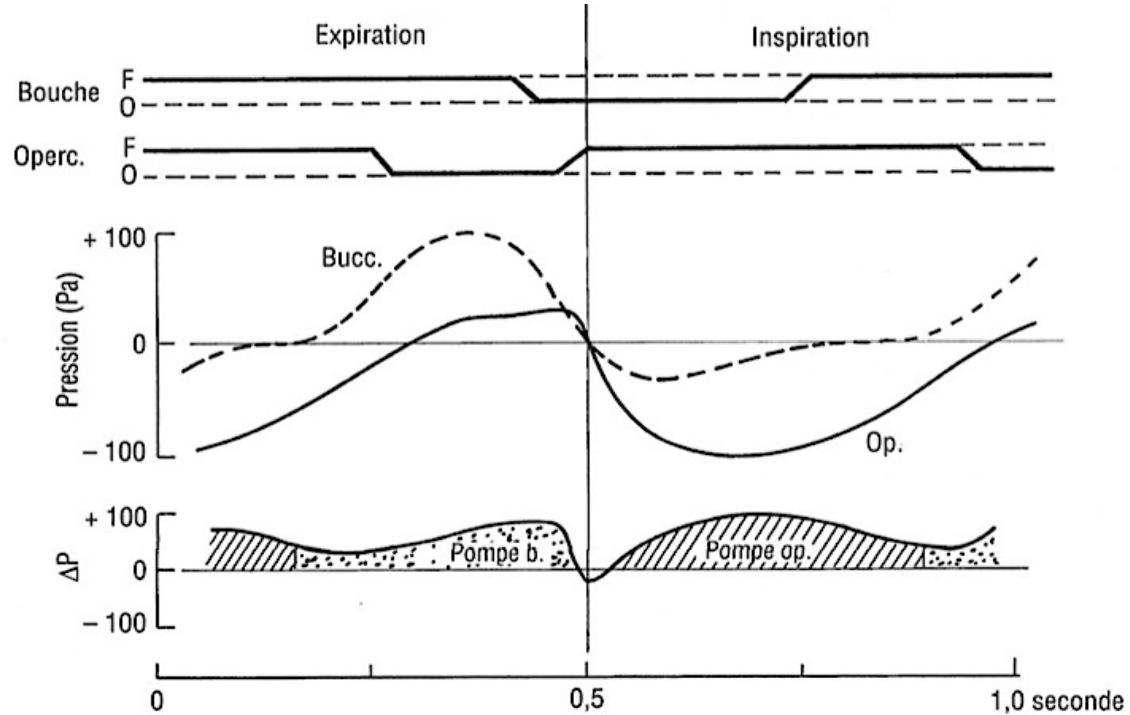
Compression buccale



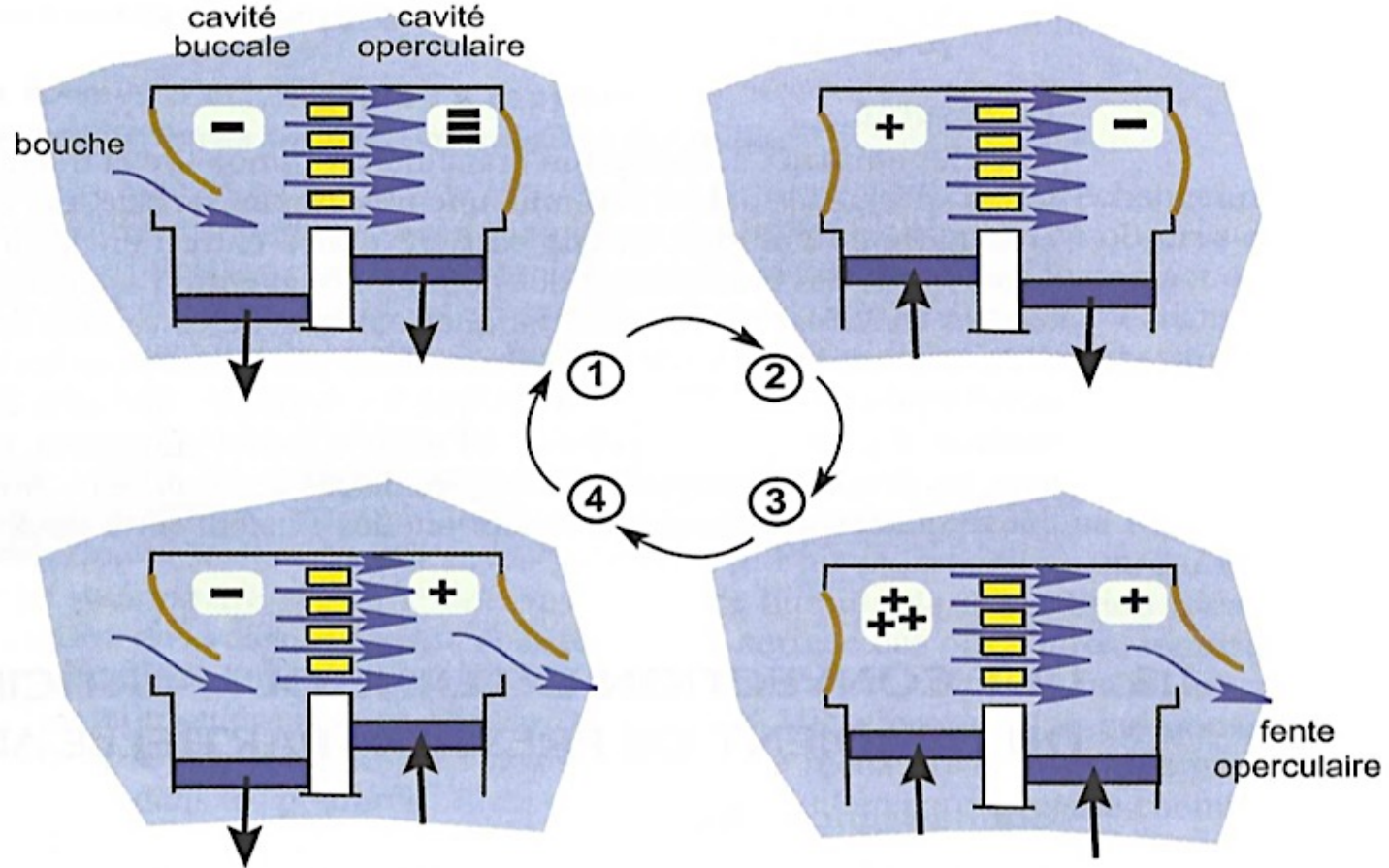
Dilatation operculaire



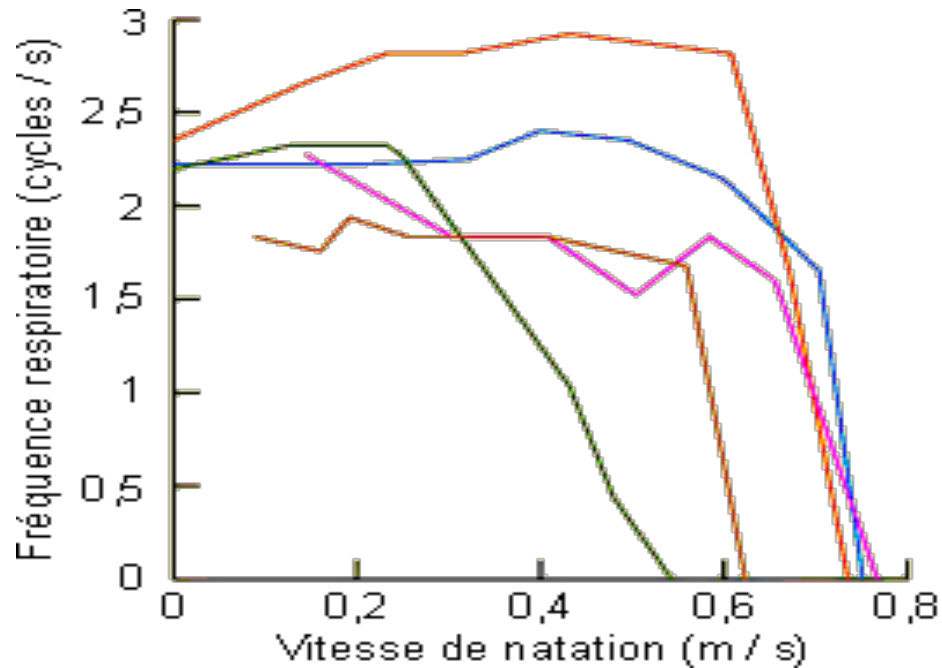
# Mécanique ventilatoire



# La ventilation branchiale, une pompe musculaire

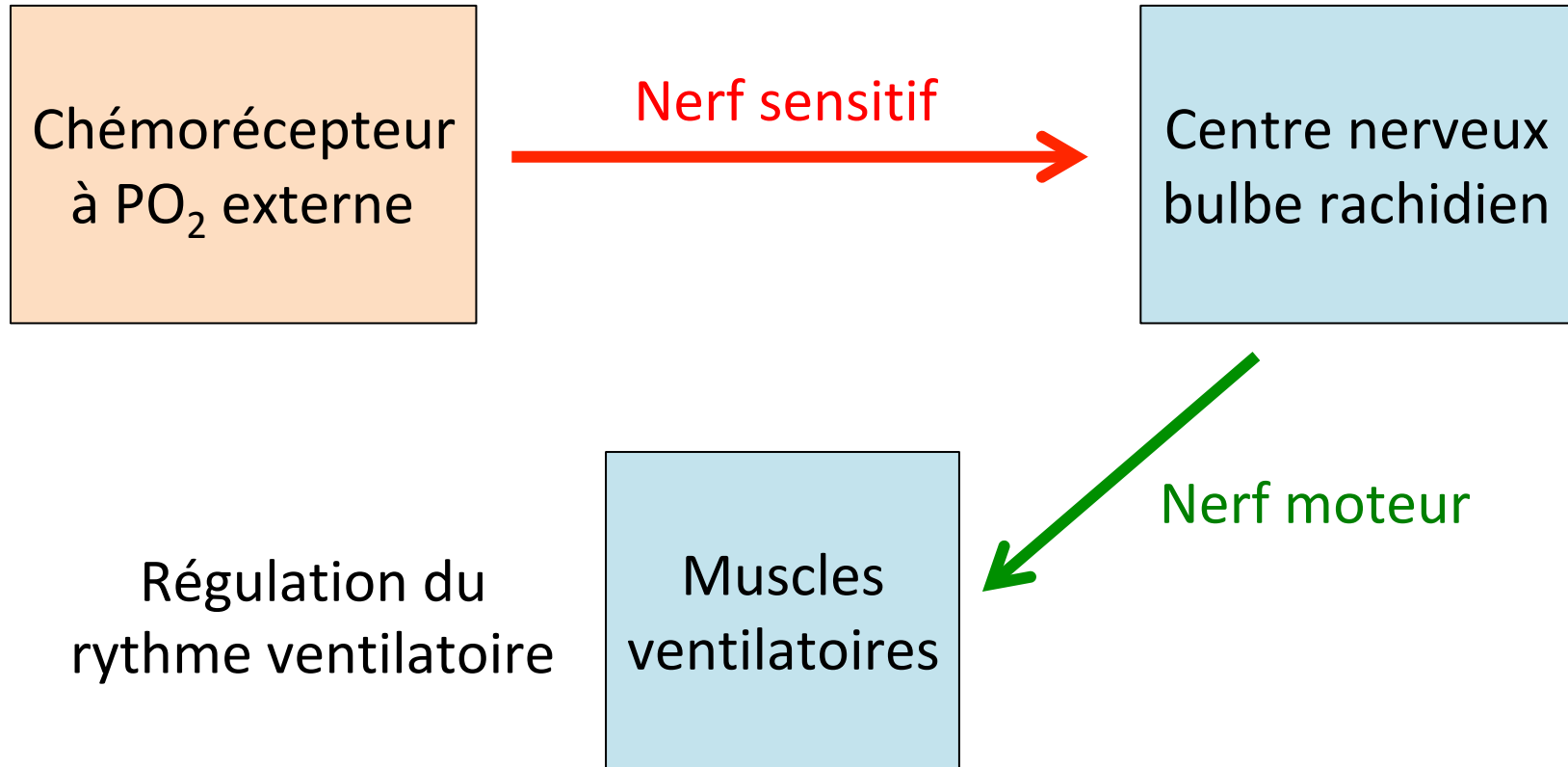


# Contrôle de la ventilation



Résultats obtenus sur 5 maquereaux différents

# Régulation de la ventilation des Téléostéens



# Bilan

- Vaste surface flottant dans la cavité branchiale
- Soutien des lames par du cartilage
- Contre-courant
- Ventilation unidirectionnelle coûteuse en énergie en raison de la viscosité de l'eau
- Régulation de la ventilation en fonction de la quantité de dioxygène dans l'eau

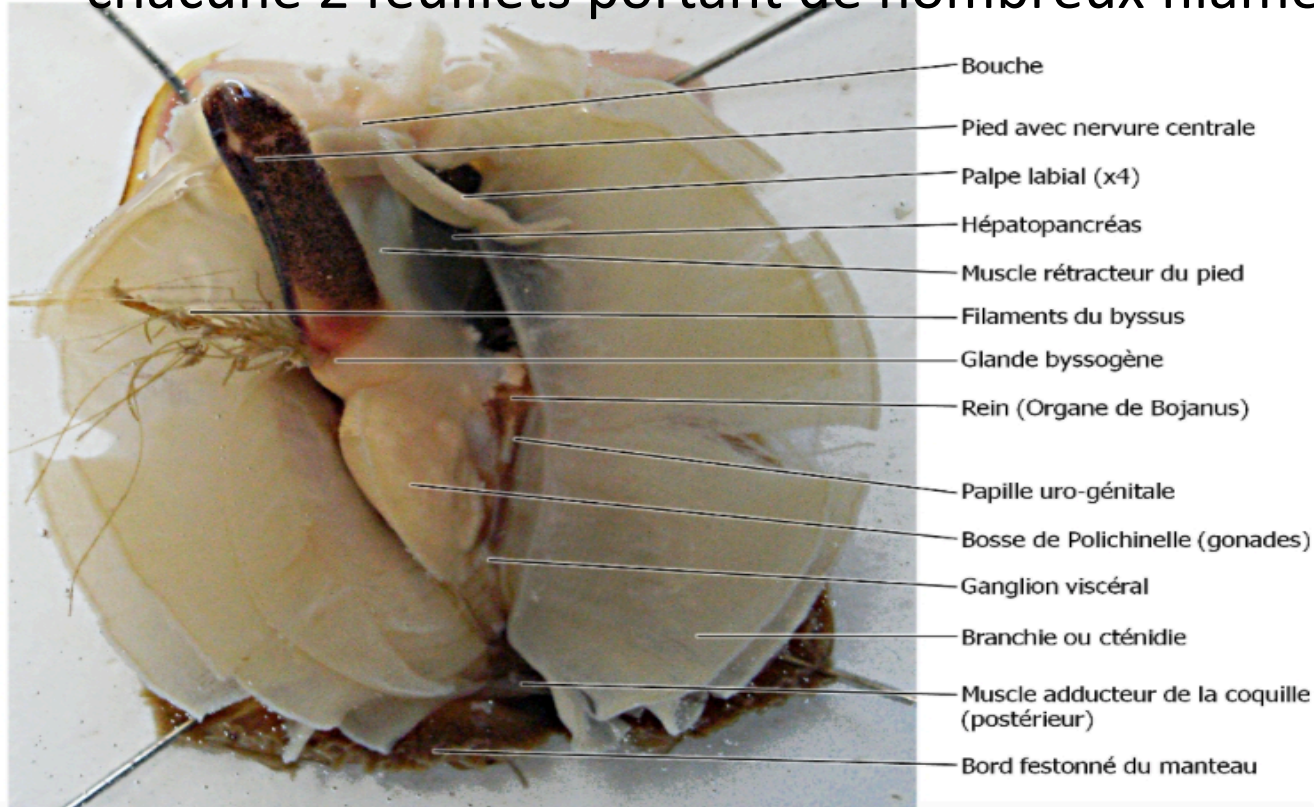
# **2.1. La respiration branchiale**

## **b. Les Mollusques Bivalves**

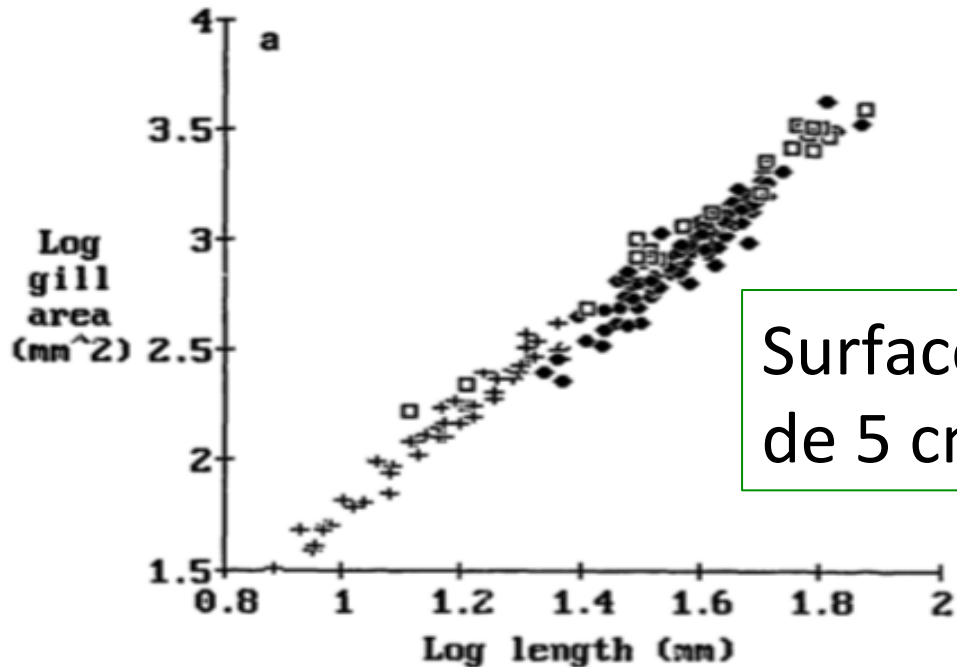


# Une vaste surface

Cavité palléale avec 2 branchies, chacune à 2 lames ayant chacune 2 feuilletts portant de nombreux filaments

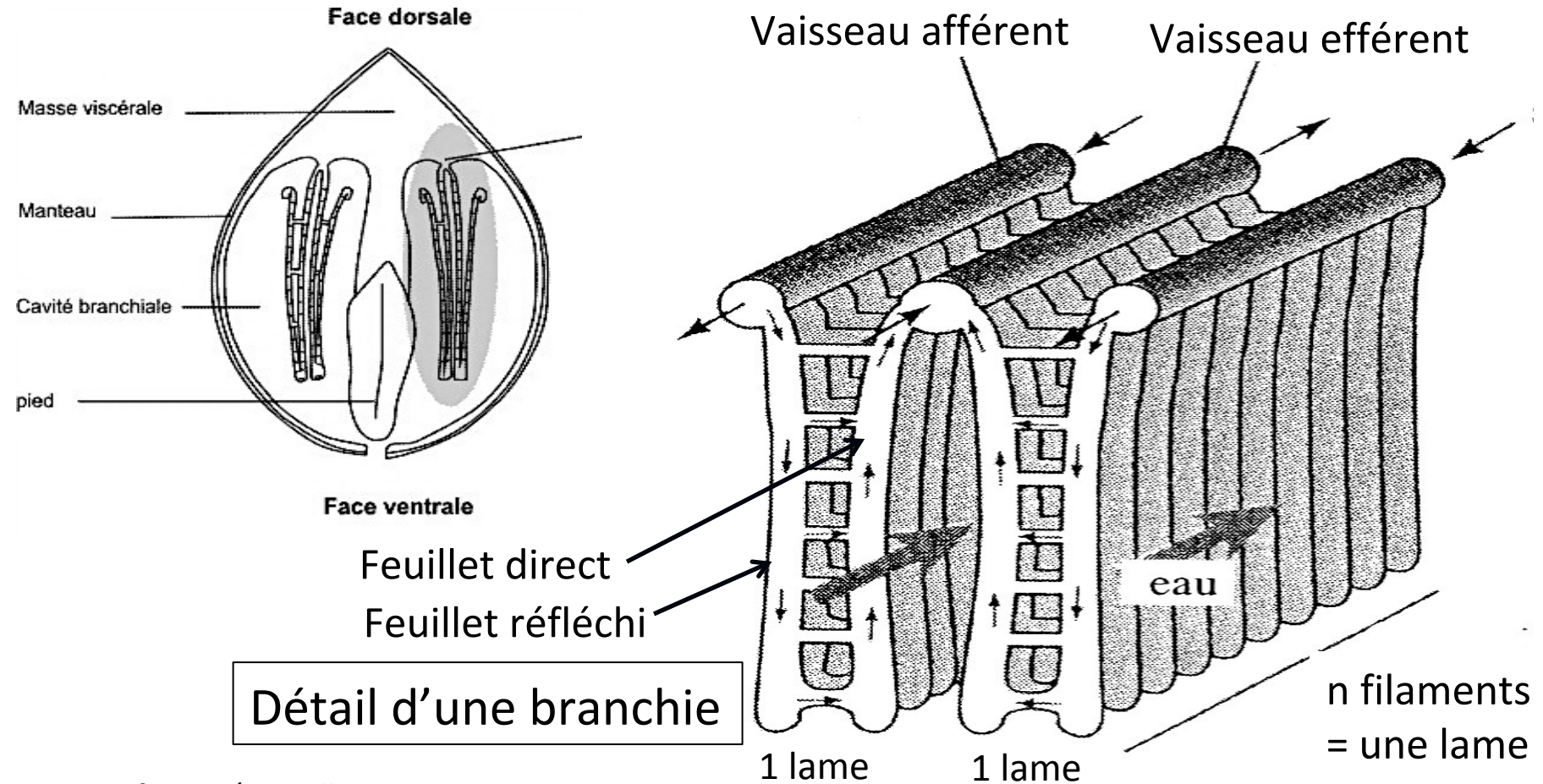


# Une vaste surface

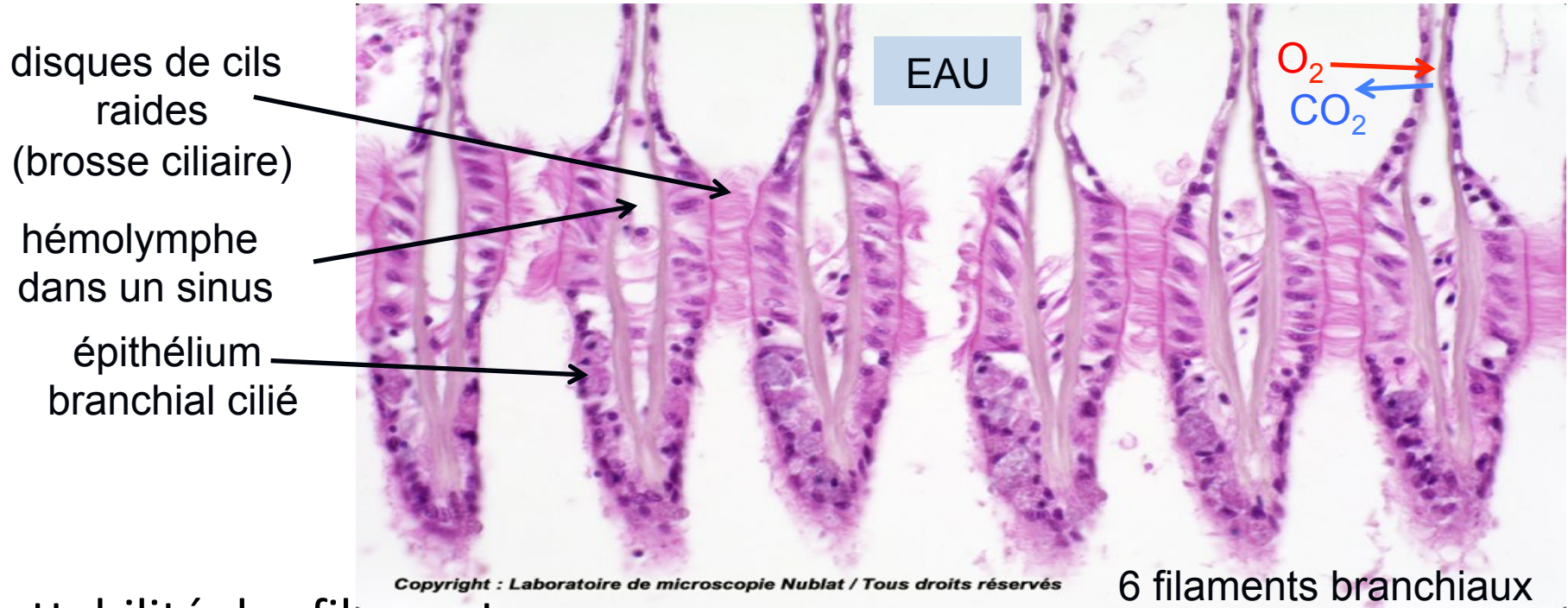


Surface branchiale d'une Moule  
de 5 cm de long = 20 cm<sup>2</sup>

# Une vaste surface



# Une fine épaisseur



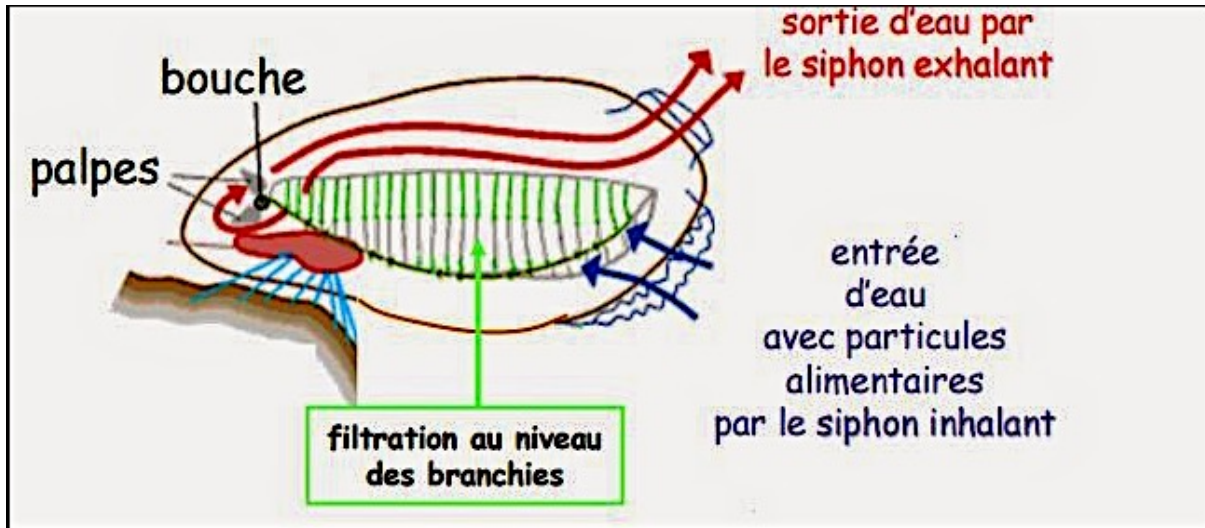
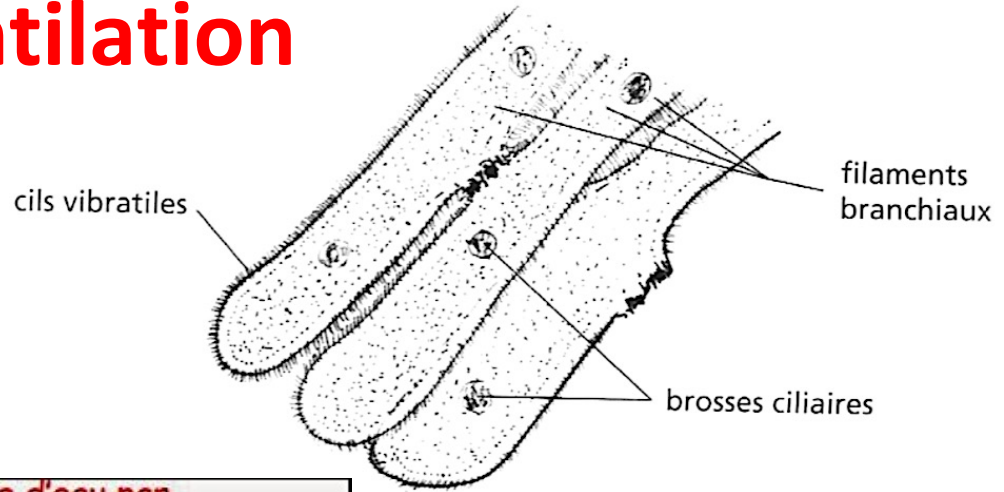
Flottabilité des filaments

Maintien : pas d'écrasement grâce aux disques ciliés + baguette de chitine possible dans les sinus d'hémolymphe

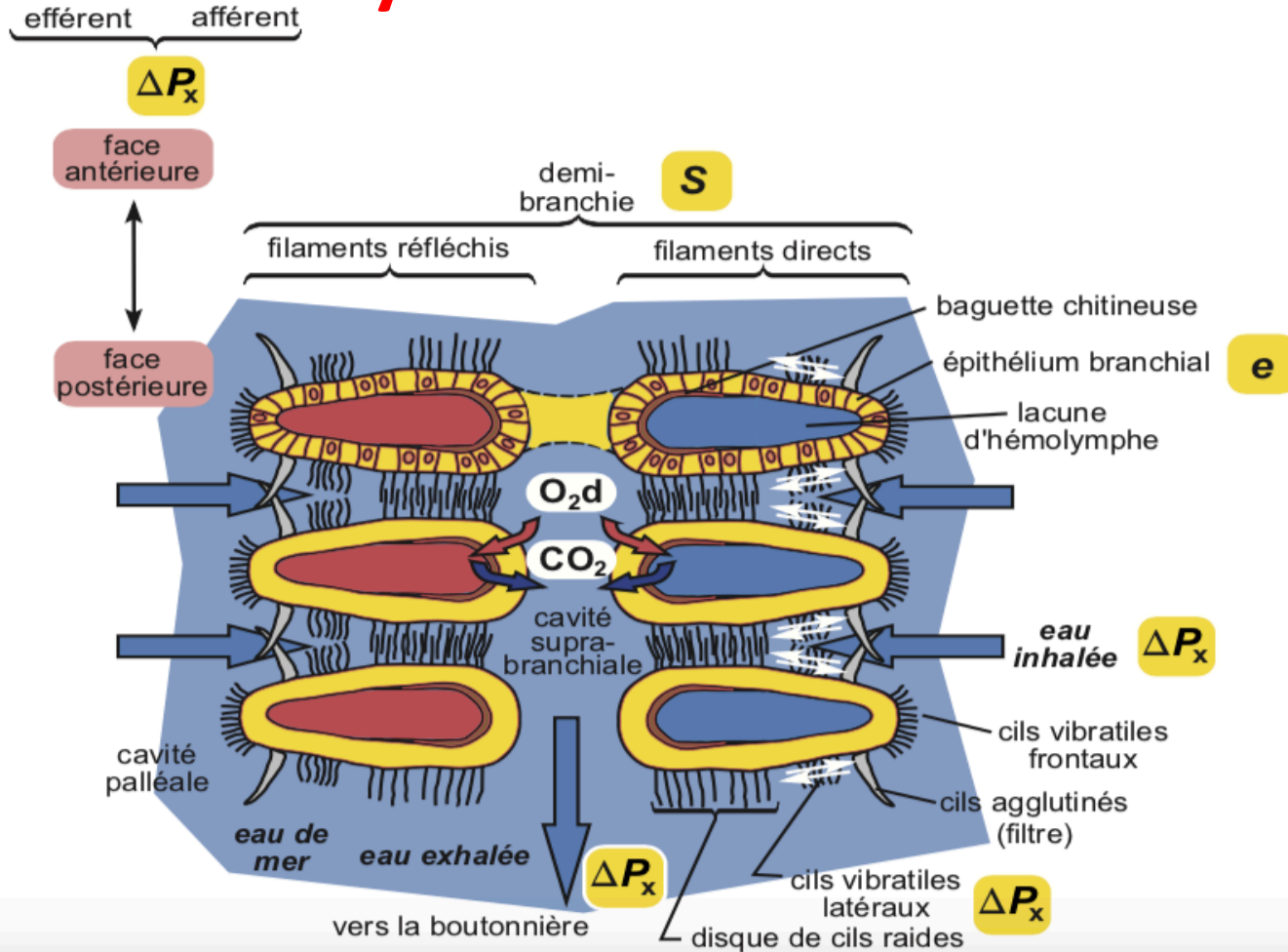


# Ventilation

- Flux unidirectionnel
- Épithélium cilié
- 2 à 5 L par heure



# Un système à contre-courant



# Bilan

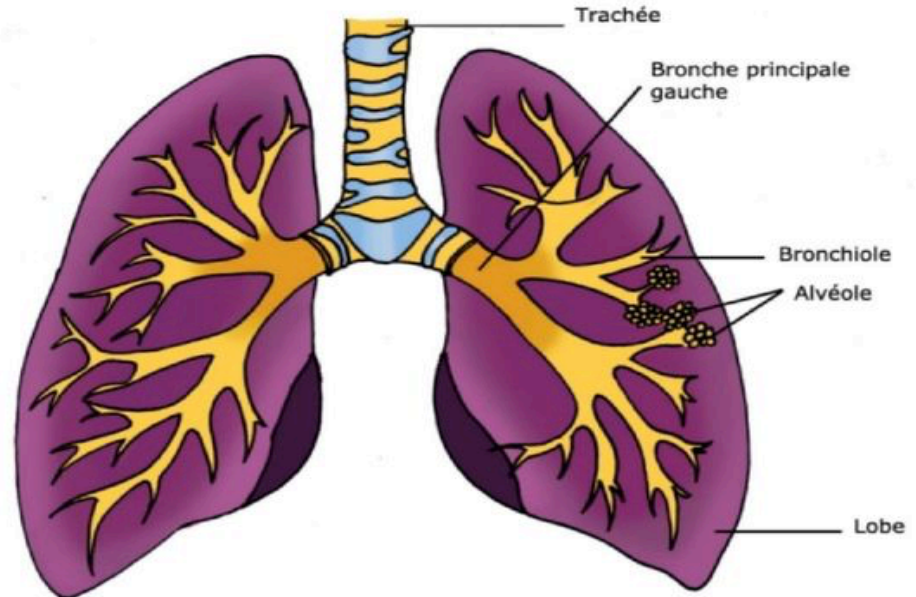
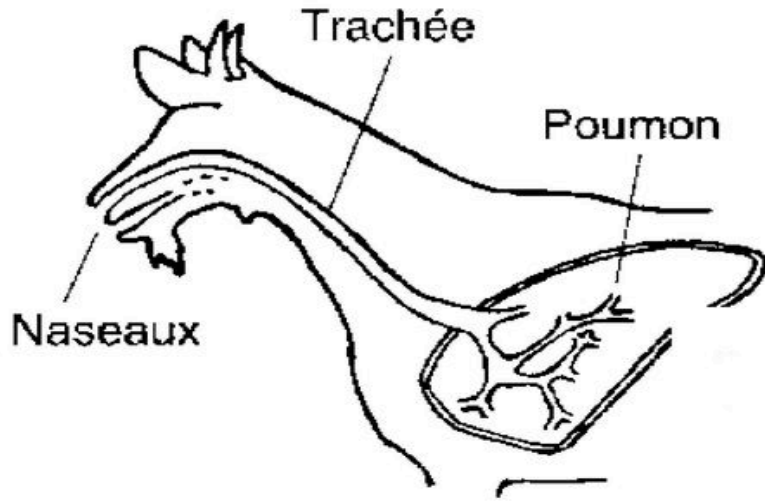
- Vaste surface flottant dans la cavité palléale
- Contre-courant
- Ventilation unidirectionnelle coûteuse en énergie en raison de la viscosité de l'eau
- Régulation de la ventilation en fonction de la quantité de dioxygène dans l'eau
- Fermentation à marée basse



## **2.2. La respiration en milieu aérien**

### **a. La respiration pulmonaire des Mammifères**

# Une vaste surface internalisée



## Poumons humains

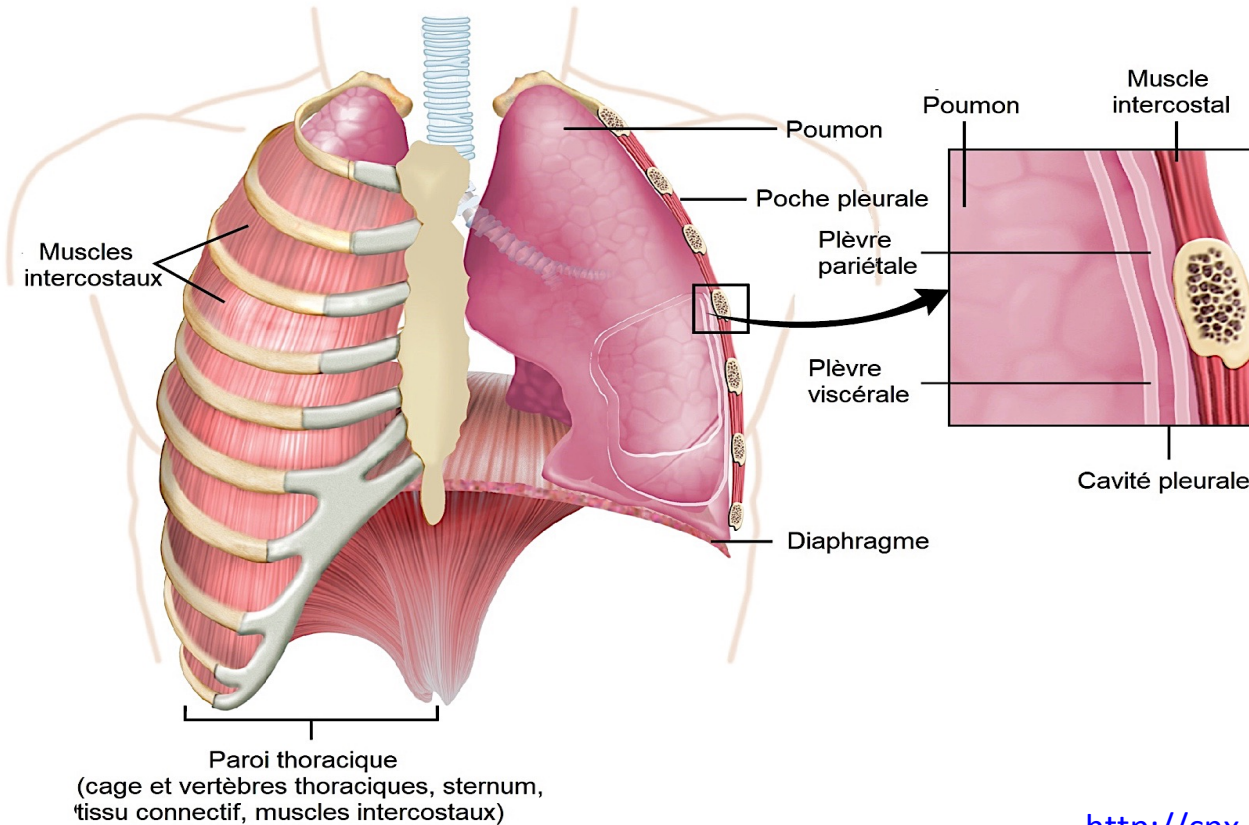
300 millions d'alvéoles

4 litres

85 m<sup>2</sup>

# Une vaste surface soutenue

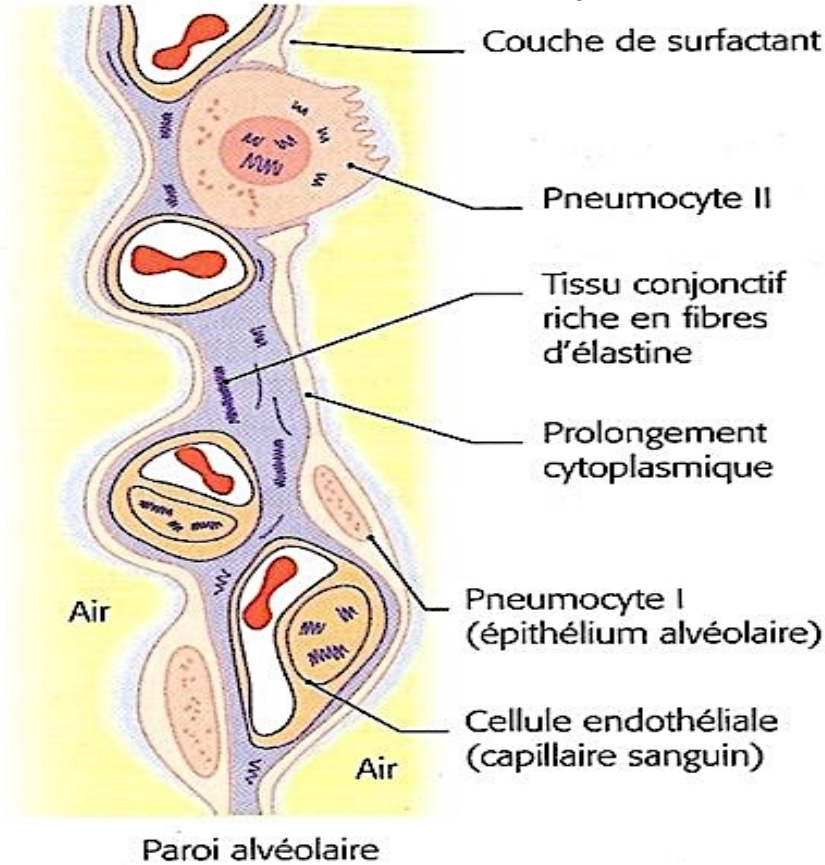
## Cage thoracique avec plèvre



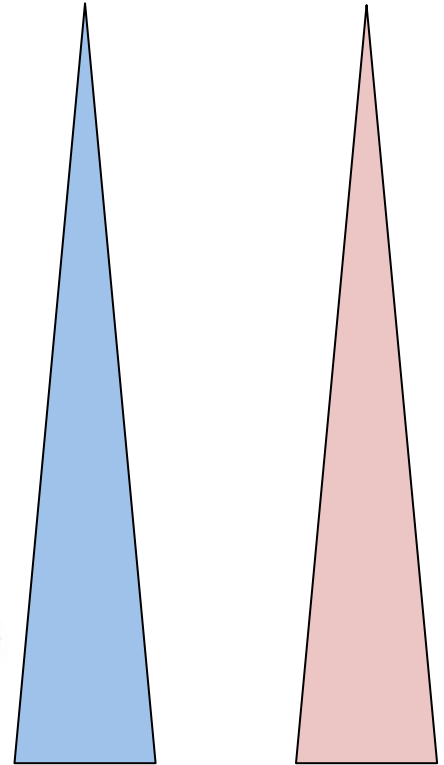
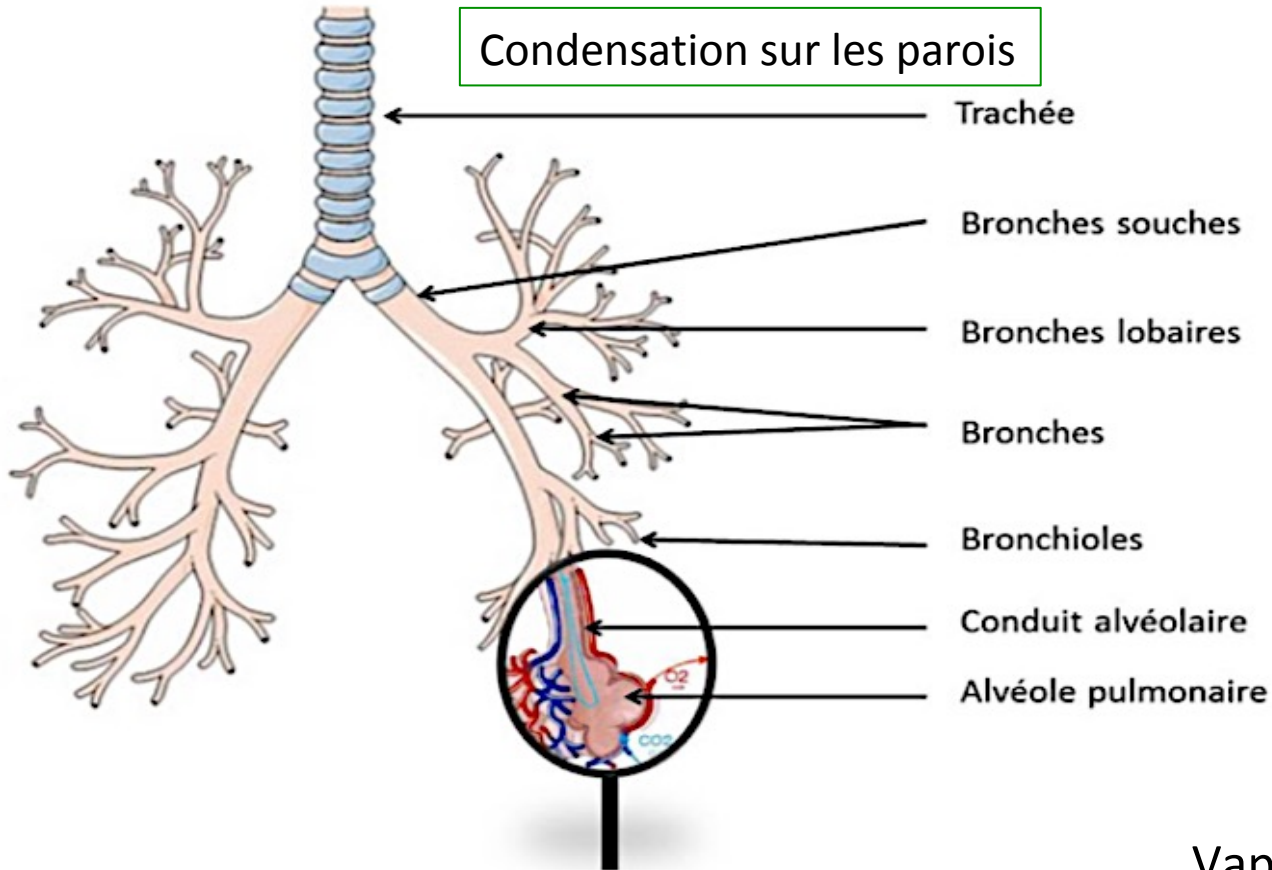
# Une vaste surface soutenue

Surfactant tapissant les alvéoles

Tensioactif qui maintient les alvéoles ouvertes



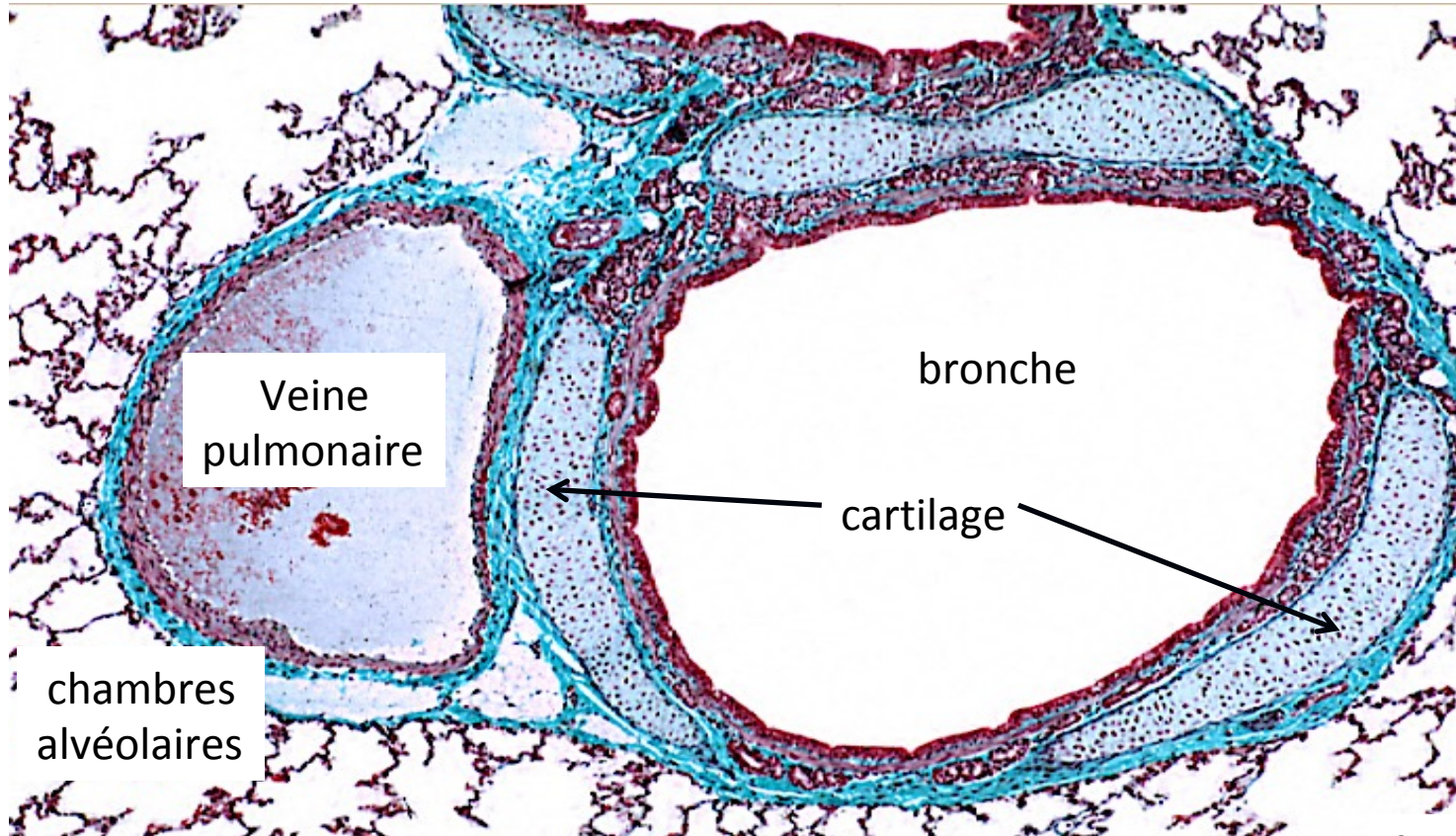
# Des voies respiratoires longues



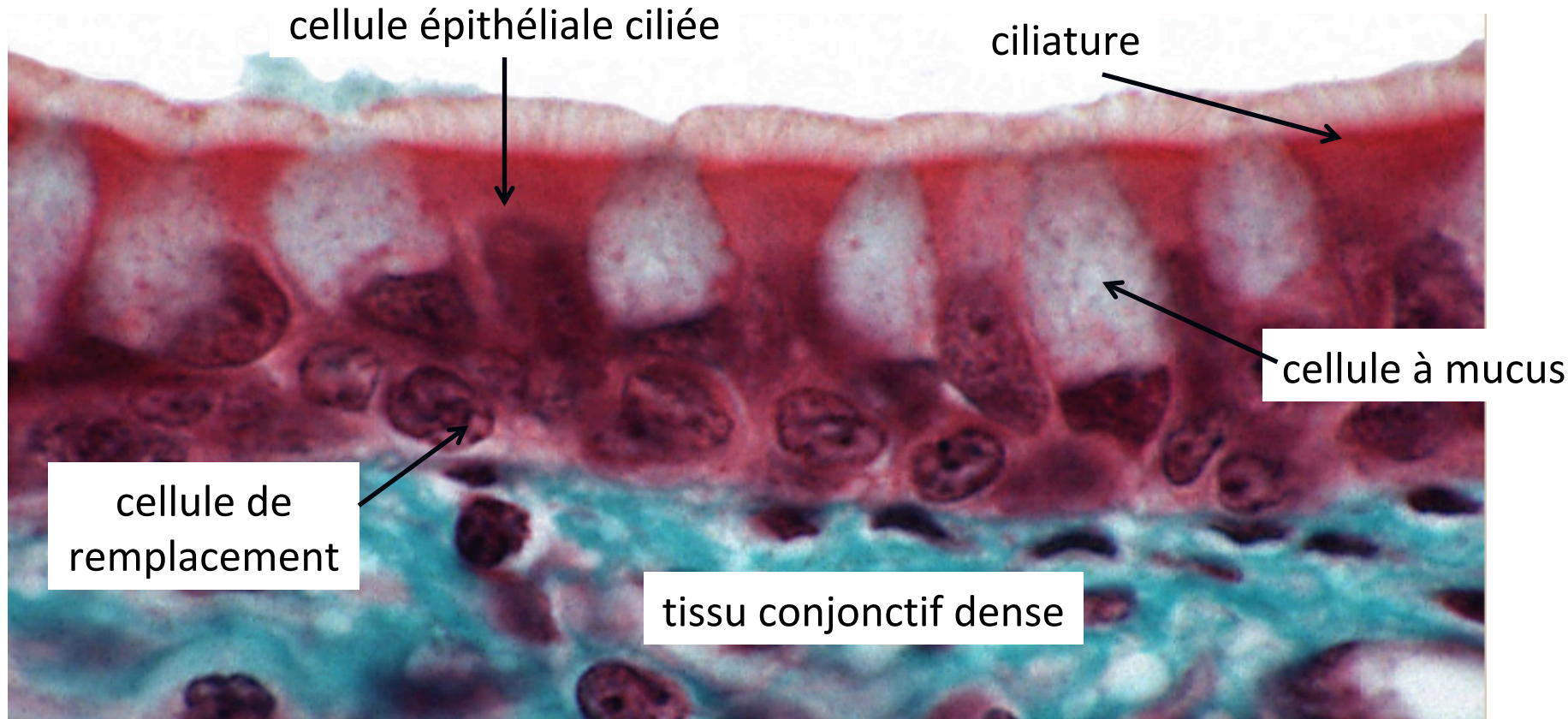
Vapeur d'eau    Température



# Des voies respiratoires soutenues



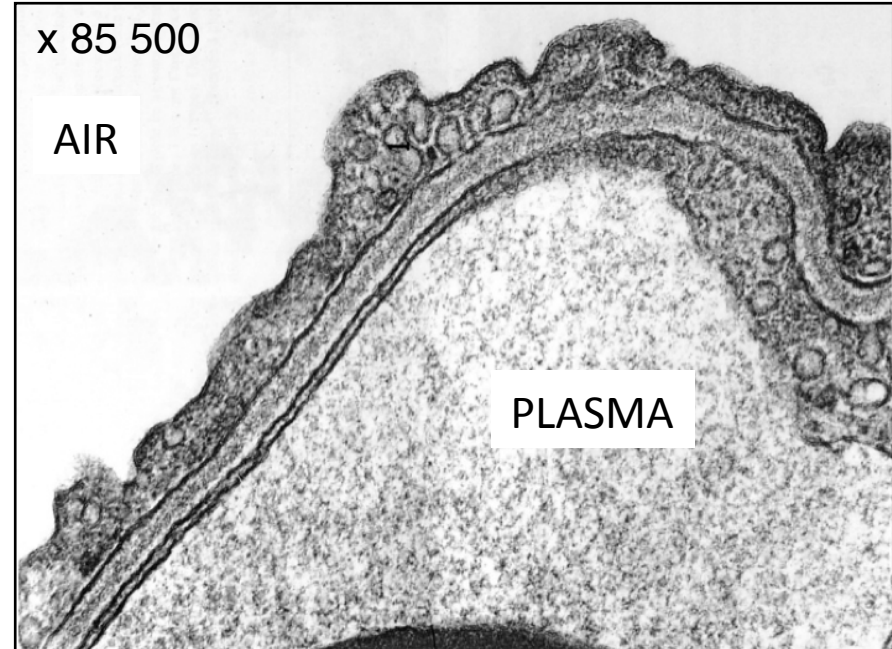
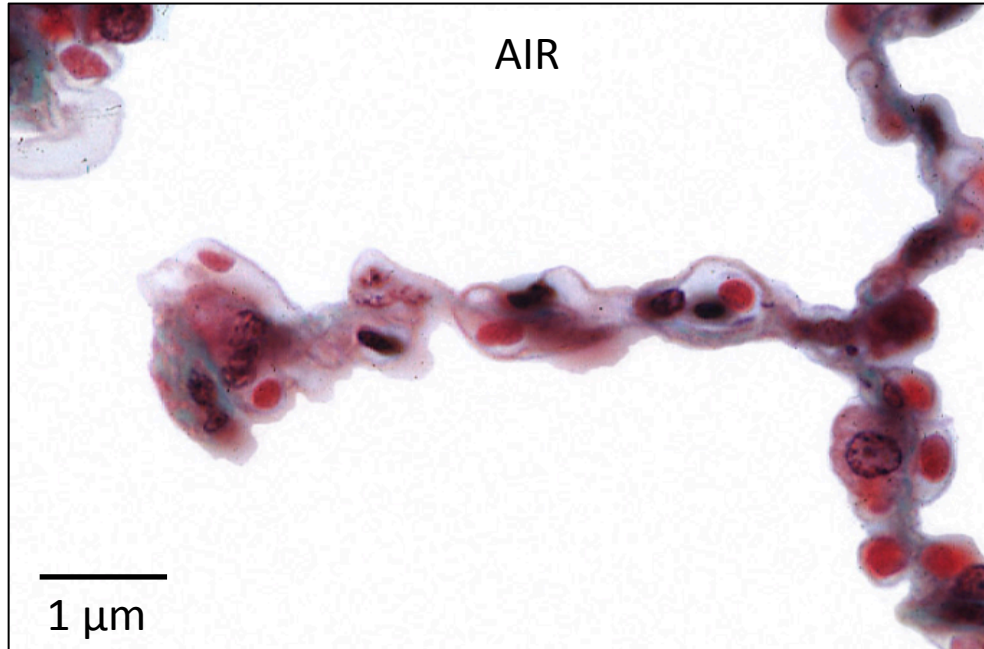
# Épithélium de bronche : protection



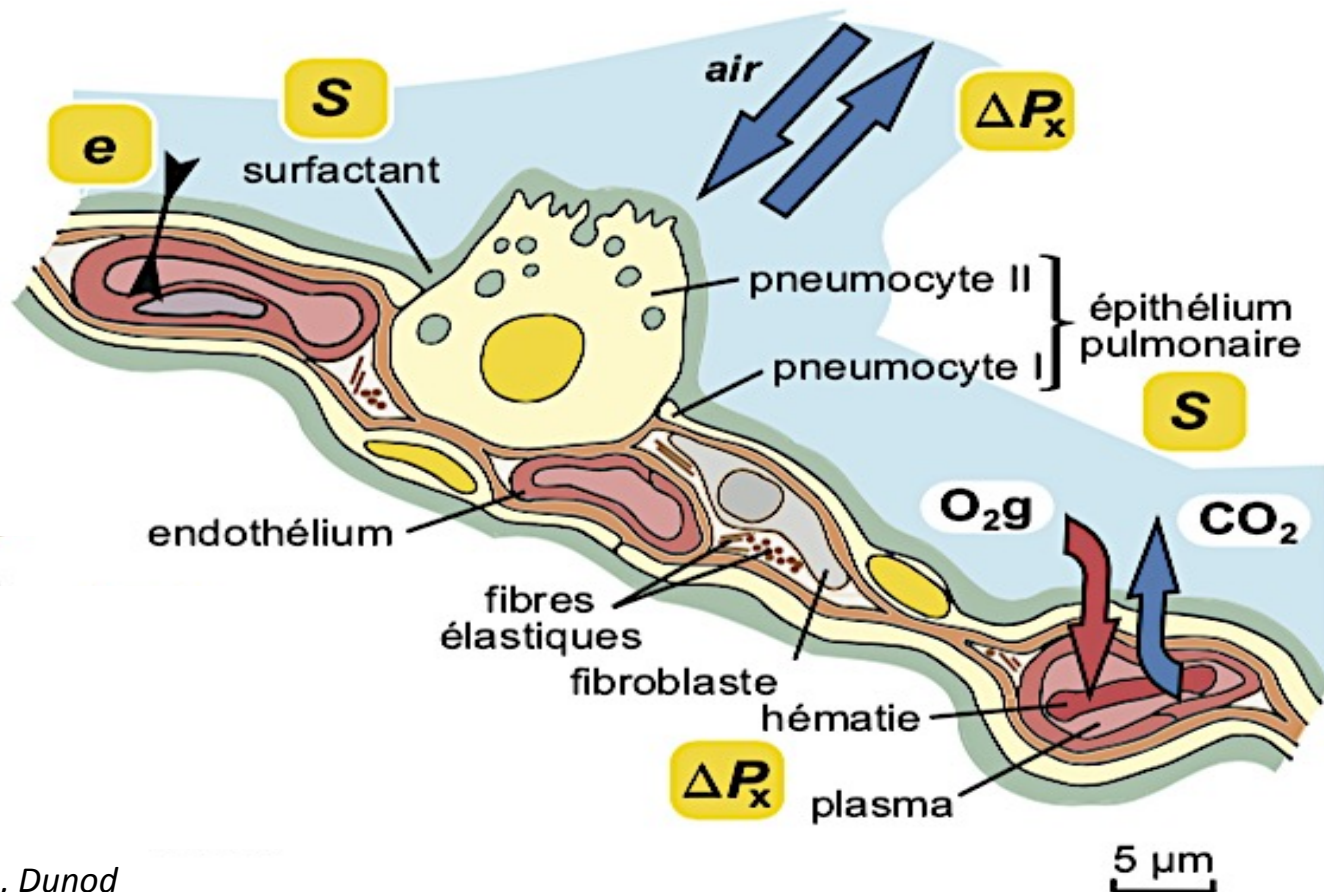


# Une fine épaisseur

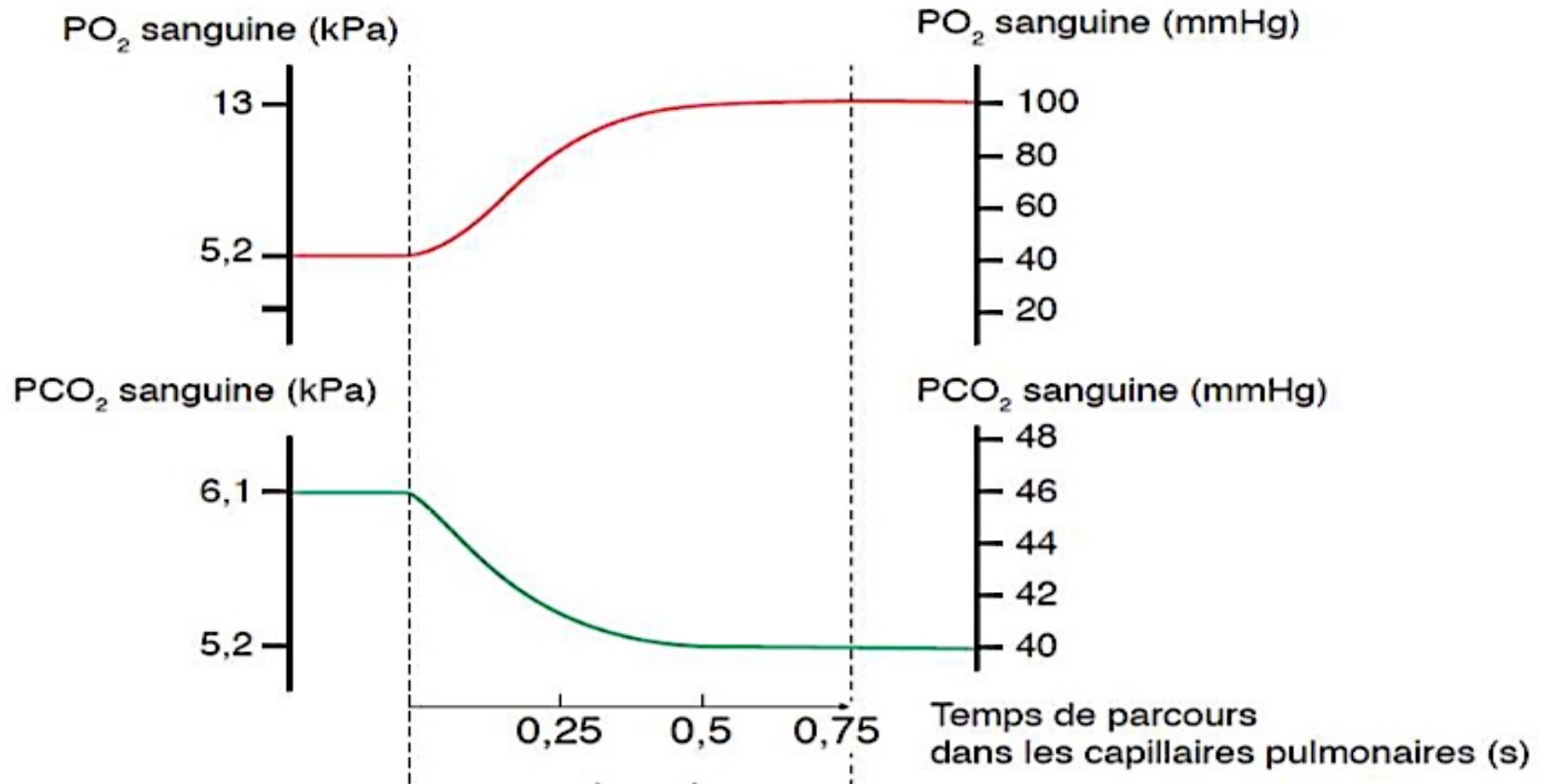
## Barrière alvéolaire (MET)



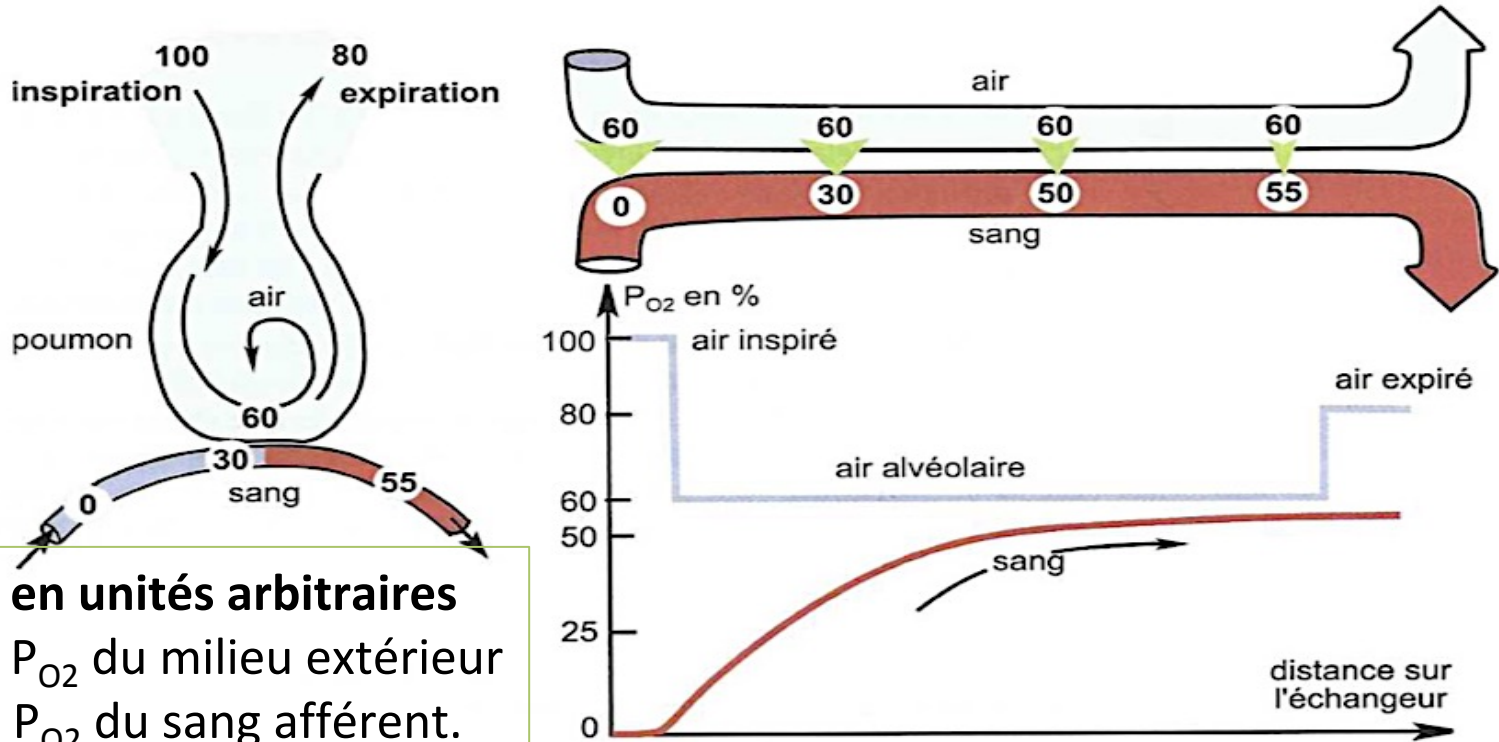
# La paroi alvéolo-capillaire



# Les échanges gazeux dans une alvéole



# Une ventilation bidirectionnelle



## Pressions en unités arbitraires

100 est la  $P_{O_2}$  du milieu extérieur  
et 0 est la  $P_{O_2}$  du sang afférent.

La composition en gaz de l'alvéole reste quasiment constante : le renouvellement est partiel

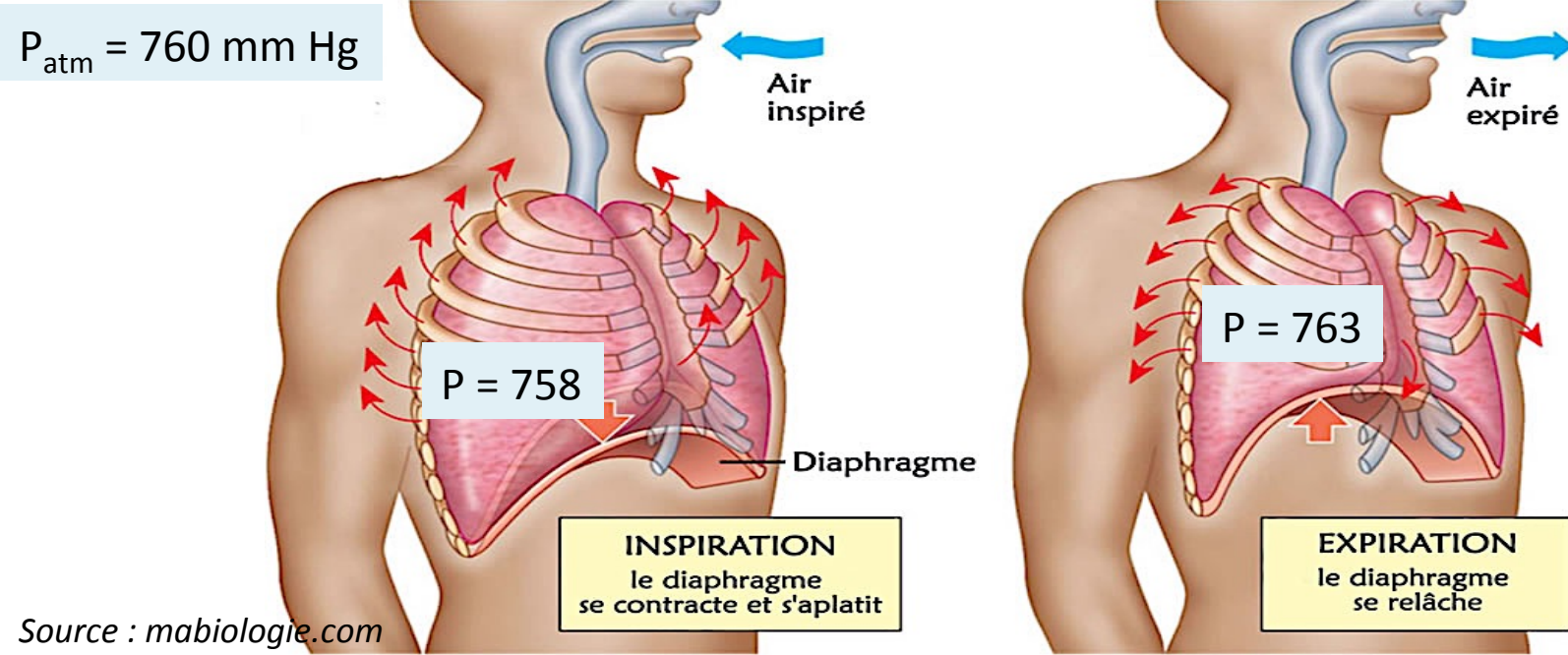
# Une ventilation musculaire

Temps actif de contraction des muscles intercostaux et du diaphragme

=> dilatation de la cage thoracique : l'air entre

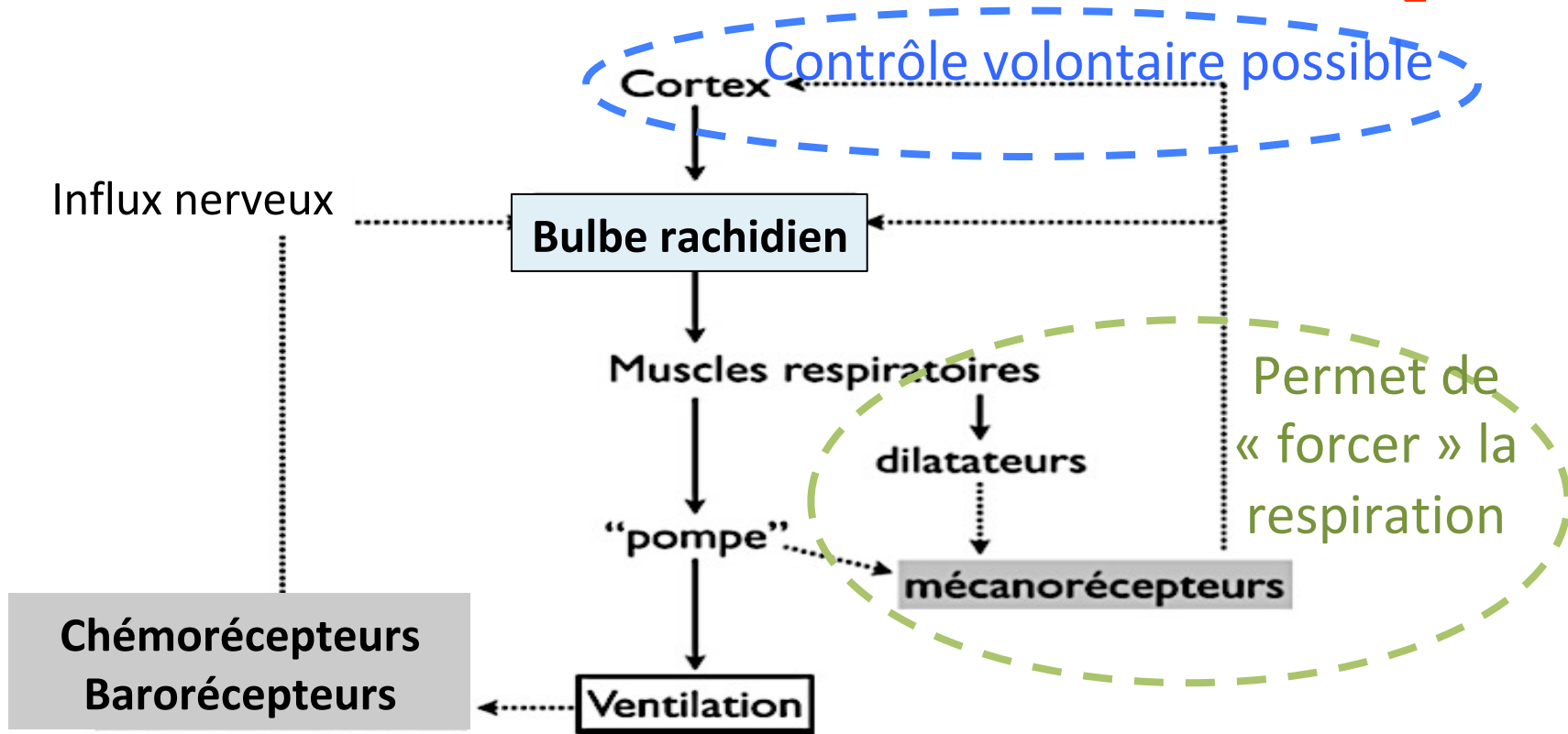
Temps passif de relâchement des muscles intercostaux et du diaphragme

=> compression de la cage thoracique : l'air sort





# Une ventilation régulée en fonction du CO<sub>2</sub>



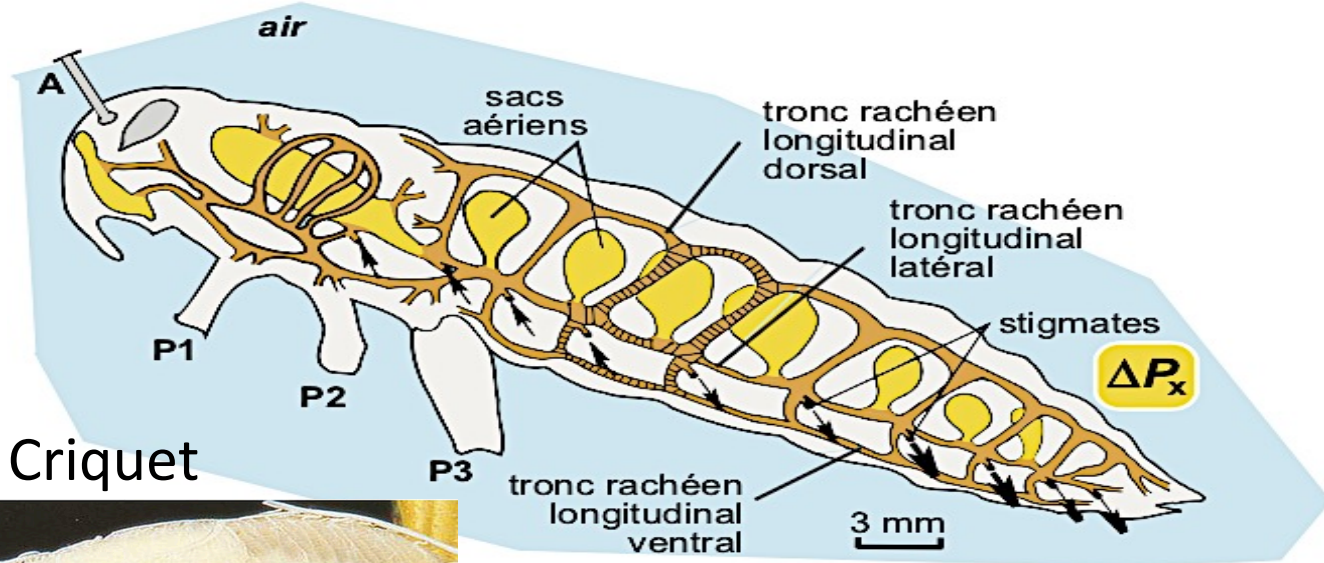
Mesure de P<sub>CO2</sub> et du pH  
LCR, crose aortique et carotides

## **2.2. La respiration en milieu aérien**

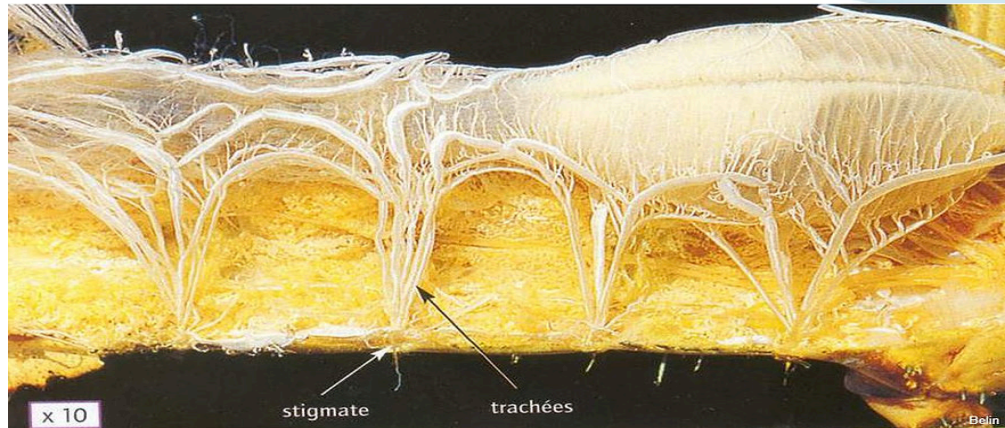
### **b. La respiration trachéenne des Insectes**



# Un système internalisé

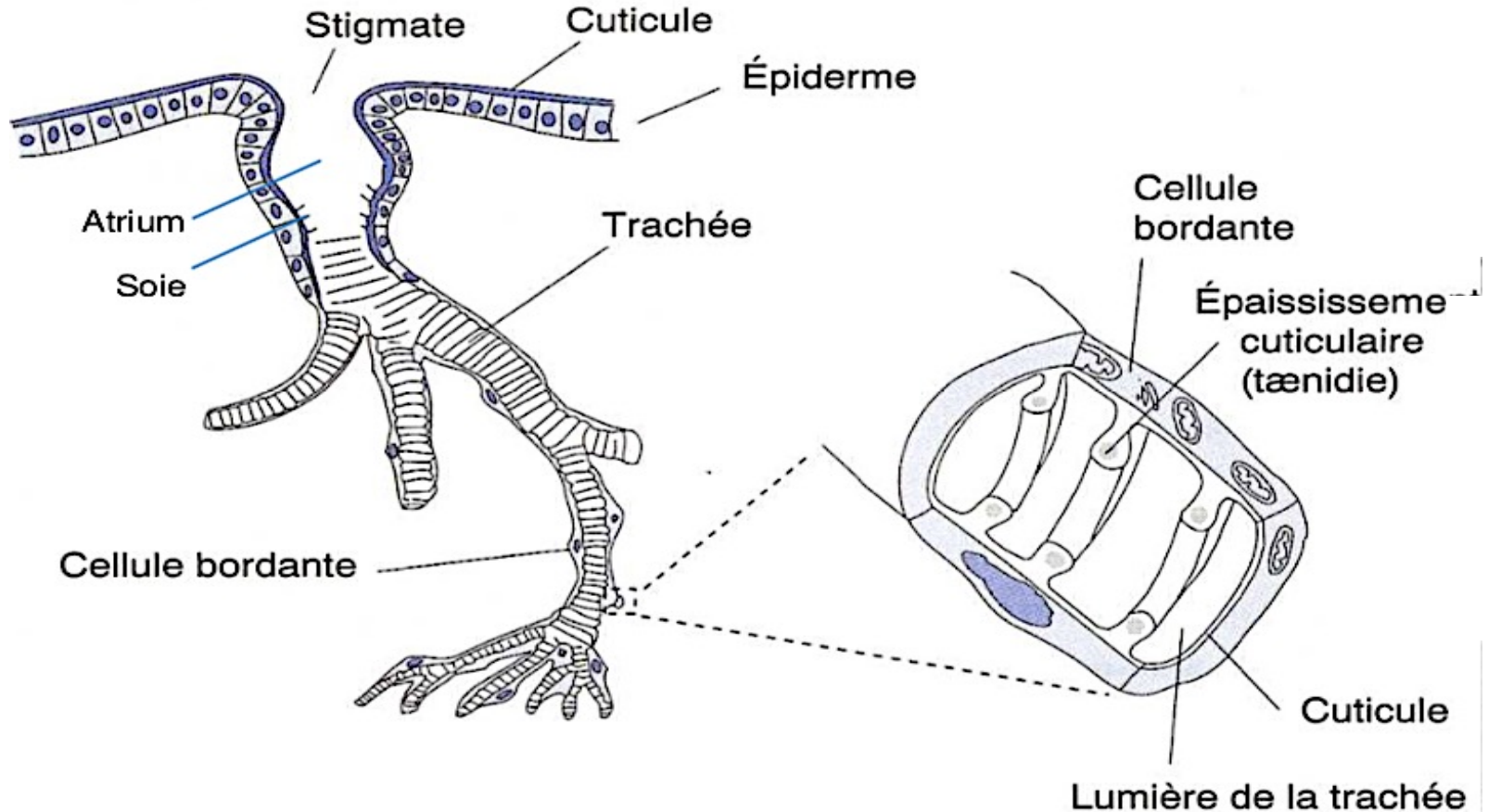


Appareil trachéen du Criquet

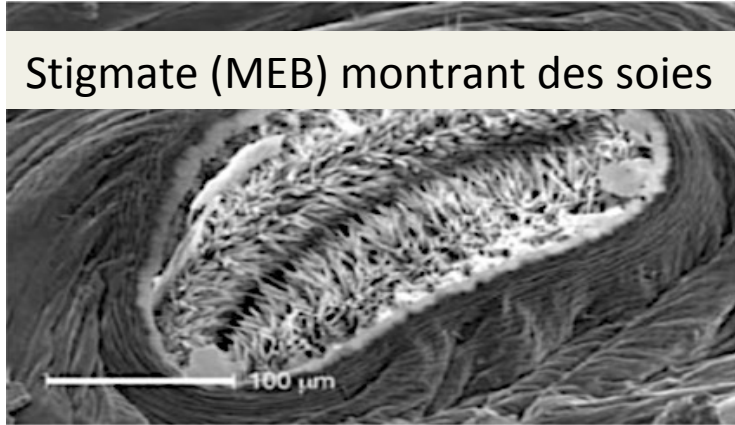


Source : Peycru, Dunod

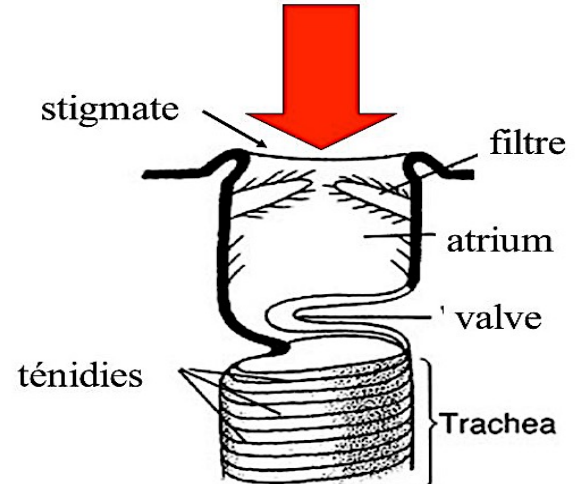
# Des tubes formés par l'exosquelette internalisé



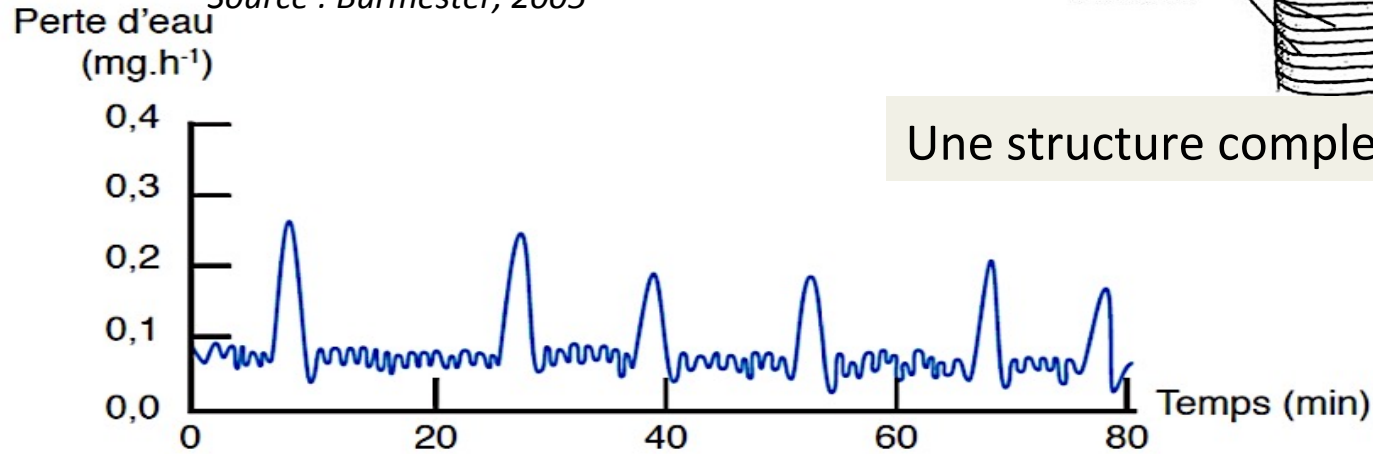
# Des stigmates qui s'ouvrent et se ferment



Source : Burmester, 2005



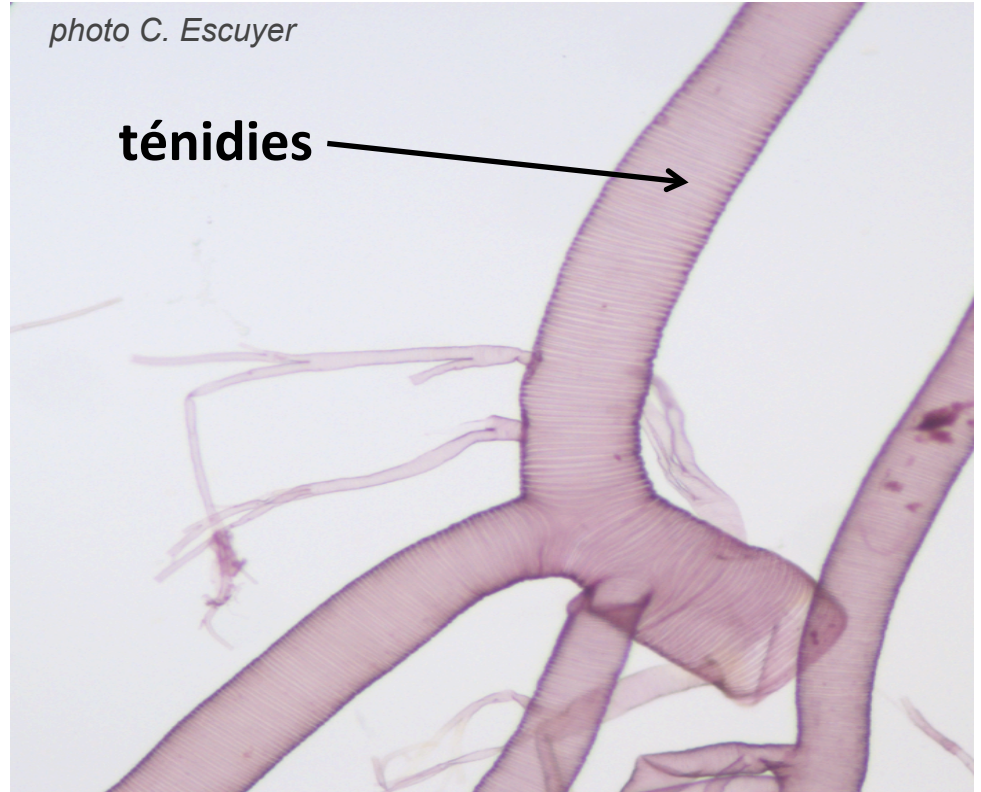
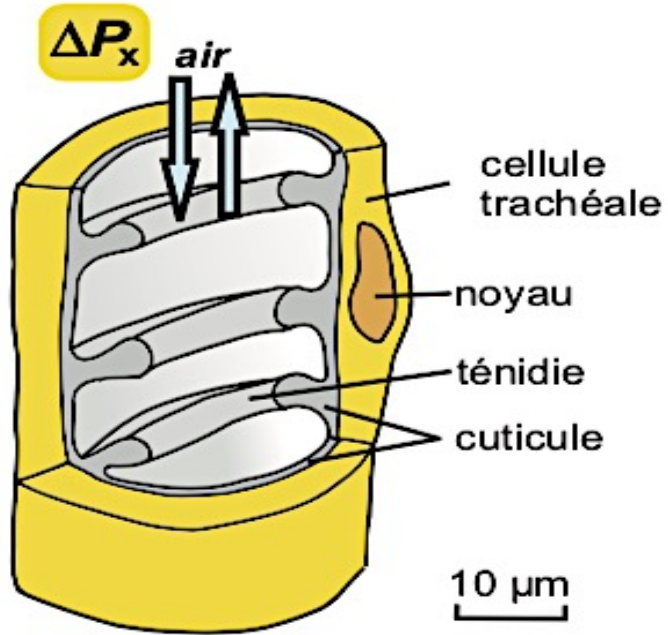
Une structure complexe et contrôlée



Mesure de la perte d'eau chez une Fourmi

Source : Segarra, 2015

# Des voies respiratoires soutenues



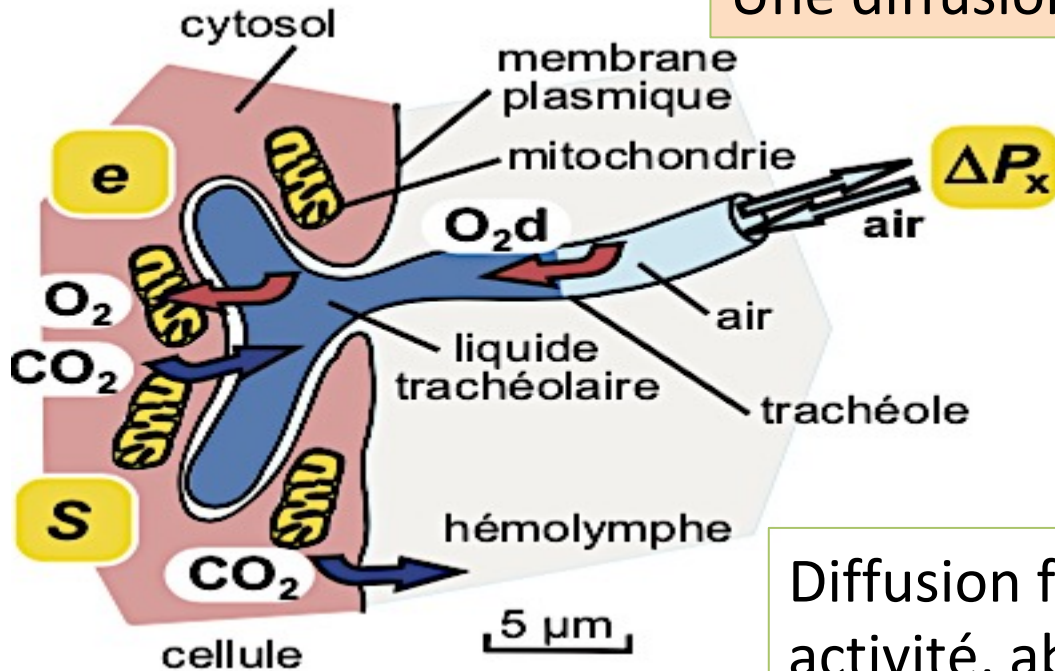
Source : Peycru, Dunod





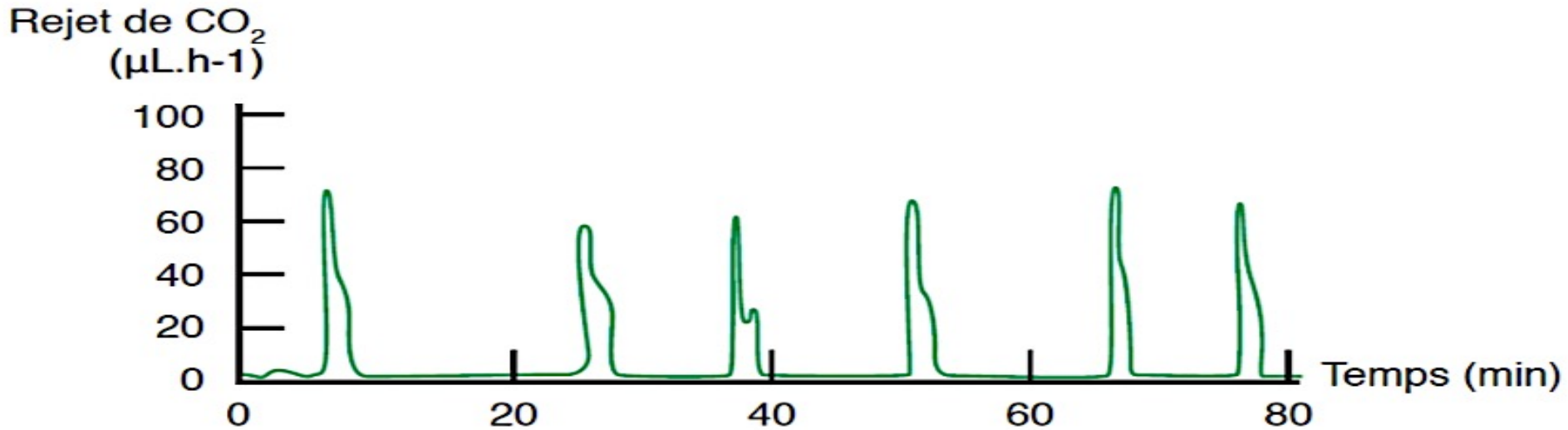
# Modèle de Wigglesworth

Une diffusion directe d'O<sub>2</sub> vers les cellules



Diffusion favorisée lorsque la cellule, en activité, absorbe le liquide trachéolaire (la cellule est alors au contact de l'air très oxygéné)

# Un rejet de CO<sub>2</sub> mal compris

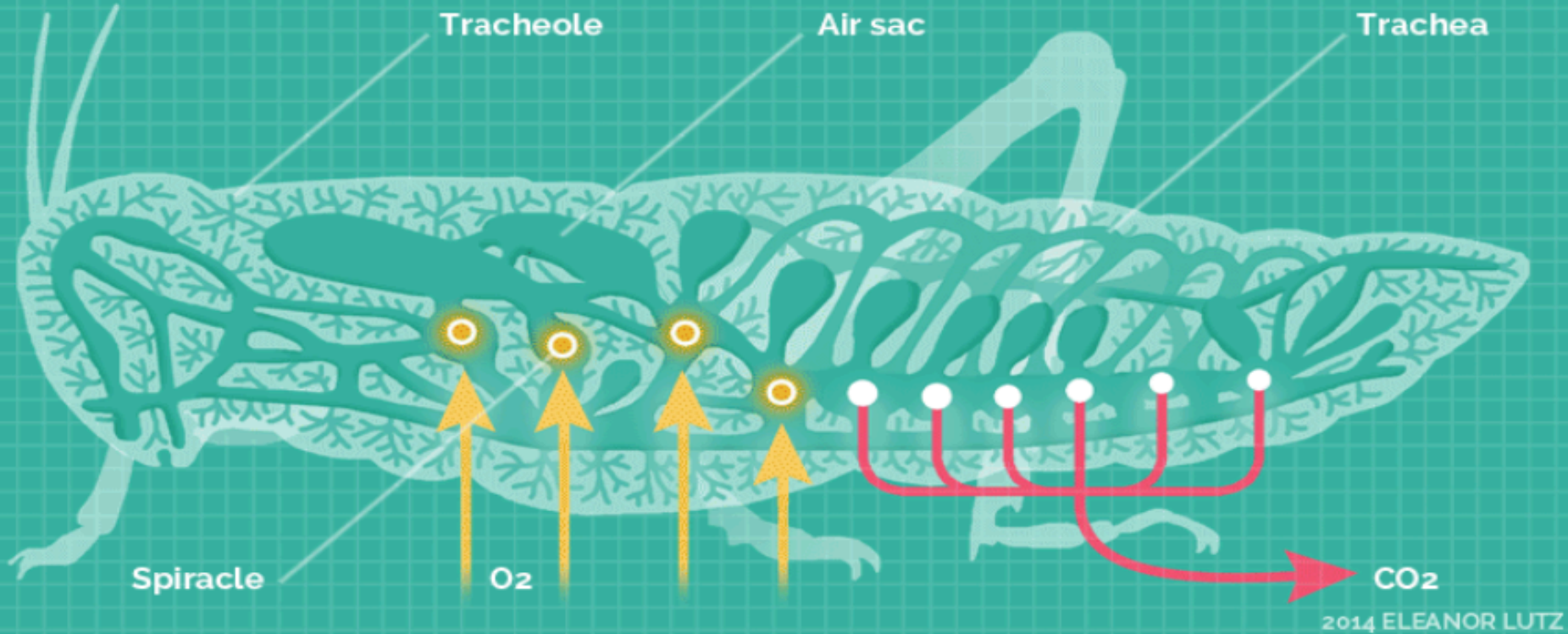


Mesure du rejet de CO<sub>2</sub> chez une Fourmi

Une évacuation par pulsation au niveau des stigmates, mettant en jeu l'hémolymphe

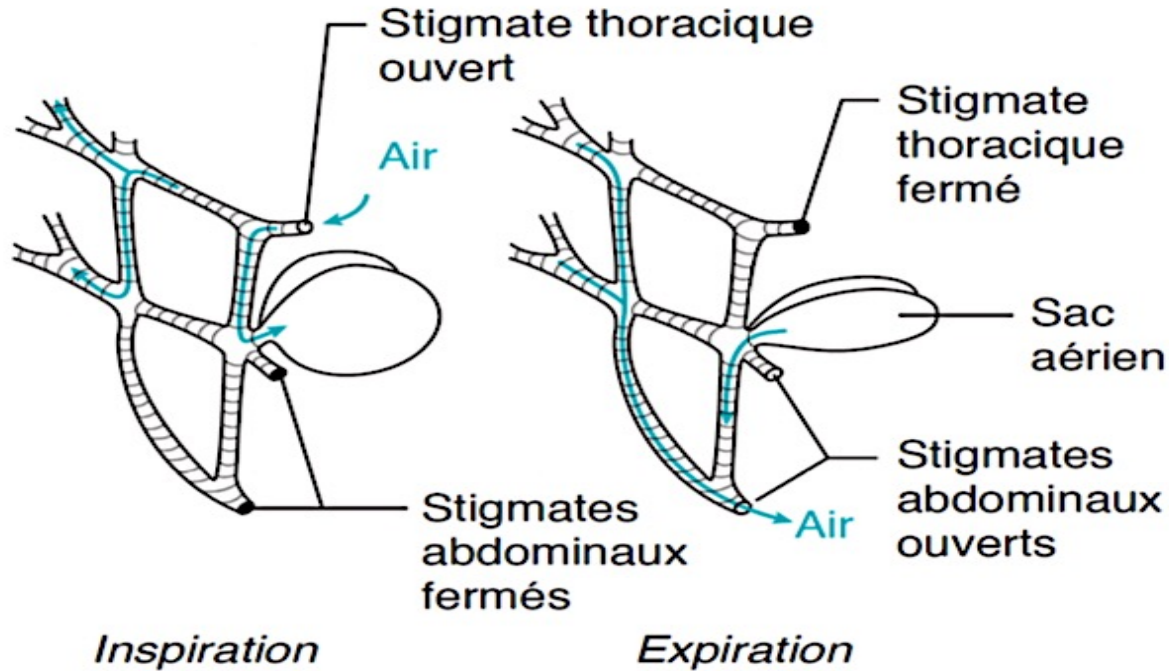


# Une ventilation orientée



Chez les gros Insectes, le trajet de l'air est orienté.

# Une ventilation contrôlée

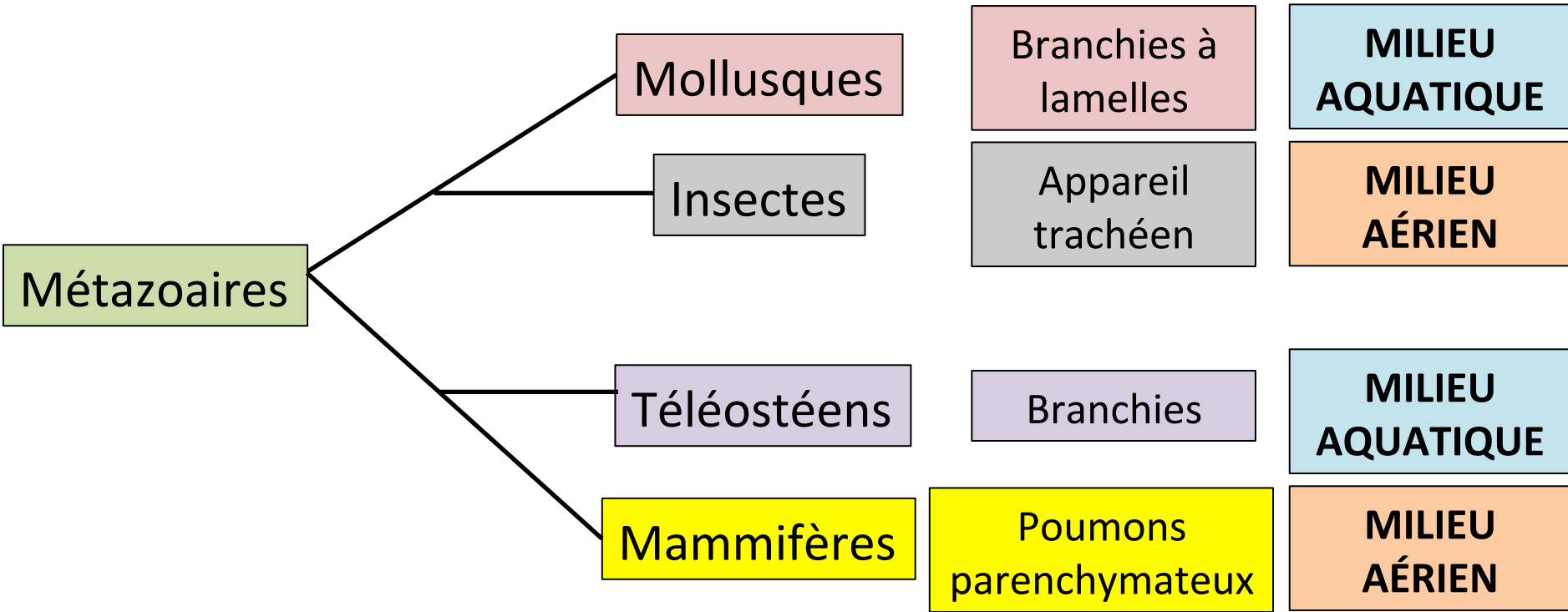


Mise en jeu de sacs aériens agissant comme des « poires ». Les mouvements de compression et dilatation des sacs est passives (mouvements du corps) ou contrôlées (Criquet).

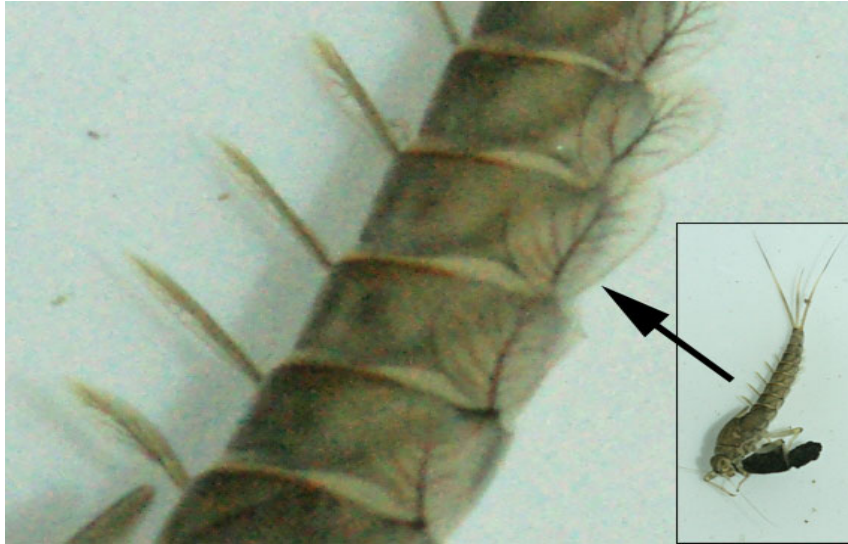


## **2.3. L'histoire évolutive et les convergences**

# Des organes pour respirer selon le plan d'organisation



# Les Insectes ont tous un système trachéen hérité de leur histoire évolutive



Trachéobranchies de larve de Libellule



Dytique plongeant avec sa réserve d'air sous les élytres

Des Insectes aquatiques respirent avec leur système trachéen... adapté au milieu



# Les Mammifères ont tous des poumons parenchymateux



La respiration avec des poumons parenchymateux présente des adaptations (pas de côtes flottantes, réserve d'O<sub>2</sub>...)

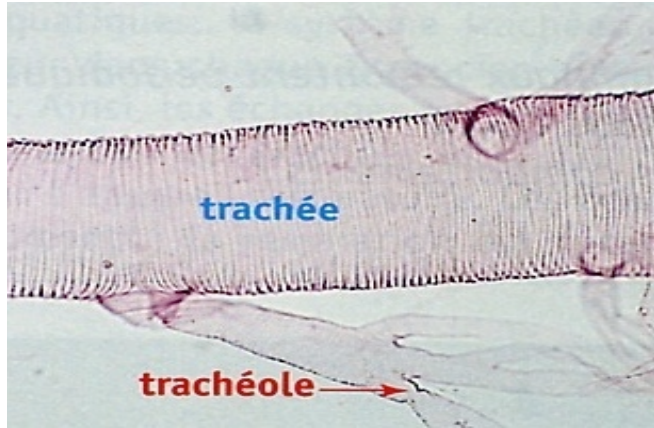
*Baleines expirant l'air par leurs 2 narines groupées au niveau du front (évent)*

	Grand dauphin	Homme
CPT (Capacité pulmonaire totale)	7 à 10 l	6 l
VR (Volume résiduel)	0,5 l	1,5 l
CV (Capacité vitale)	6,5 à 9,5 l	4,5 l
VT (Volume courant)	5 à 9 l	0,4 à 0,7 l
Coefficient de ventilation = % d'air renouvelé lors d'un cycle respiratoire	80 à 90 %	15 à 18 %

# Les convergences évolutives

# Le milieu aérien, milieu peu porteur

Insectes et Mammifères ont des plans d'organisation différents mais...



Trachée de Criquet montrant les anneaux de cuticule (tissu externe)



Trachée de Souris montrant les anneaux de cartilage (tissu interne)

Anneaux qui rigidifient : pas d'écrasement des conduits

**Notion de convergence anatomique**

# Le milieu aérien, milieu desséchant

Insectes et Mammifères ont des plans d'organisation différents mais...

Appareil respiratoire  
internalisé

**convergence  
anatomique**

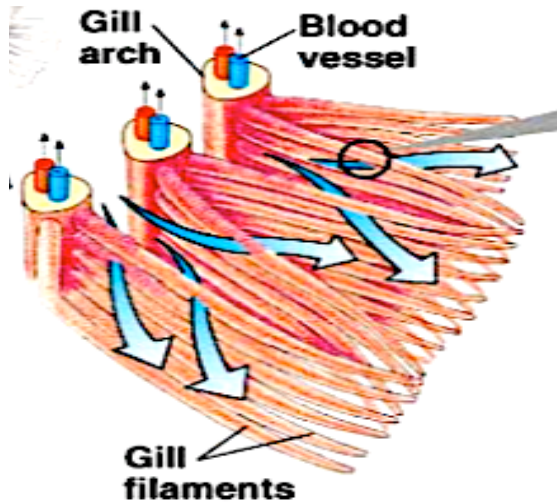
Conduits étanches  
Orifices à ouverture contrôlée  
Dispositif de récupération d'eau

**convergences  
fonctionnelles**

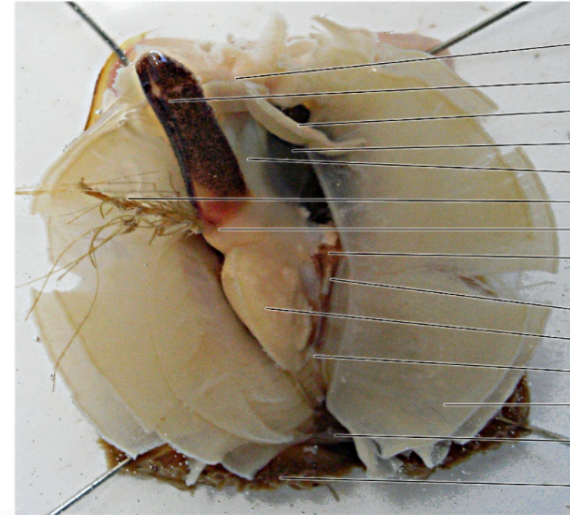
# Le milieu aquatique, milieu aqueux et porteur

Téléostéens et Bivalves ont des plans d'organisation différents mais...

Appareil respiratoire externe  
avec filaments flottants



**convergence  
anatomique**



# Le milieu aquatique, milieu pauvre en O<sub>2</sub>

Téléostéens et Bivalves ont des plans d'organisation différents mais...

Circulation unidirectionnelle  
avec contre-courant

**convergence  
fonctionnelle**

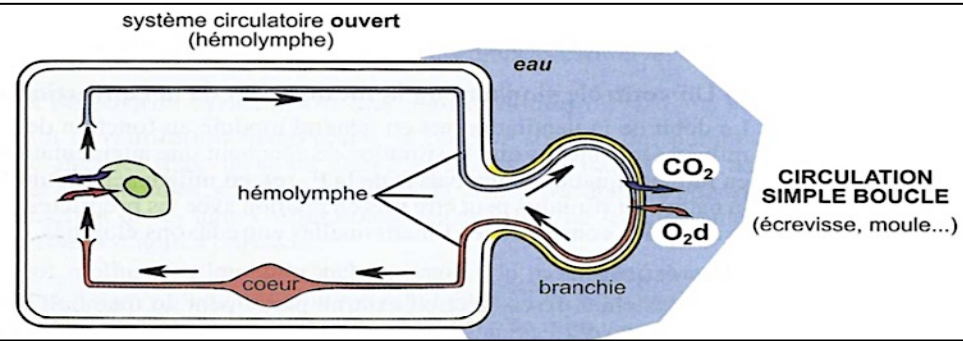


# 3. La convection interne et les pigments respiratoires

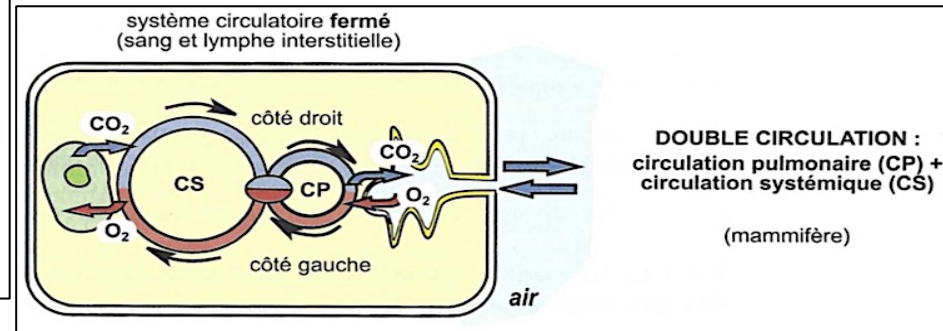
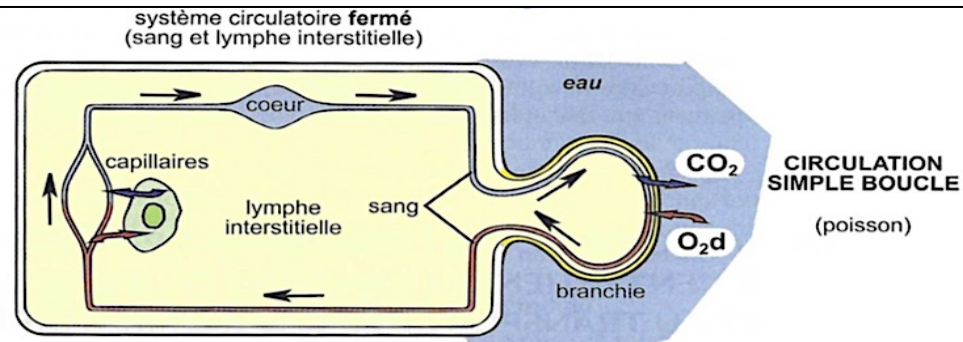
$$\text{Flux} = -k \cdot S \cdot \frac{\Delta P}{e}$$

## 3.1. Importance de $\Delta P$ dans la diffusion des gaz

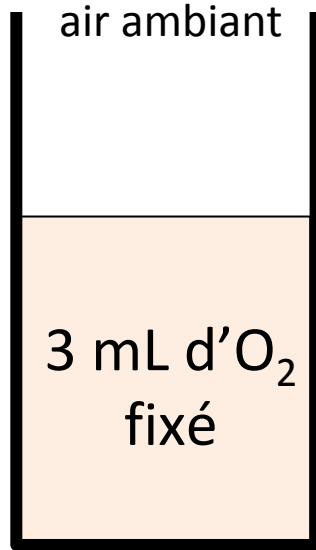
# Une circulation du fluide interne



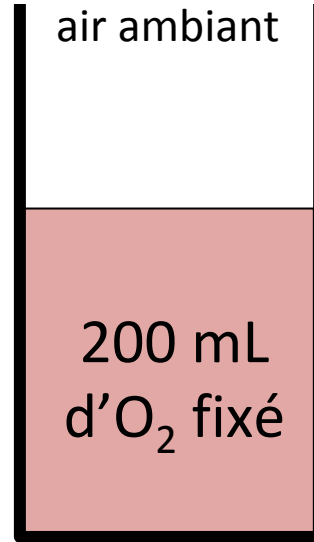
Cela permet de mettre en contact l'échangeur avec un sang ou de l'hémolymphe pauvre en O<sub>2</sub> (sauf les Insectes !).



# Un pigment dans le sang : l'hémoglobine



Plasma seul



Sang  
plasma + hématies

Sang artériel

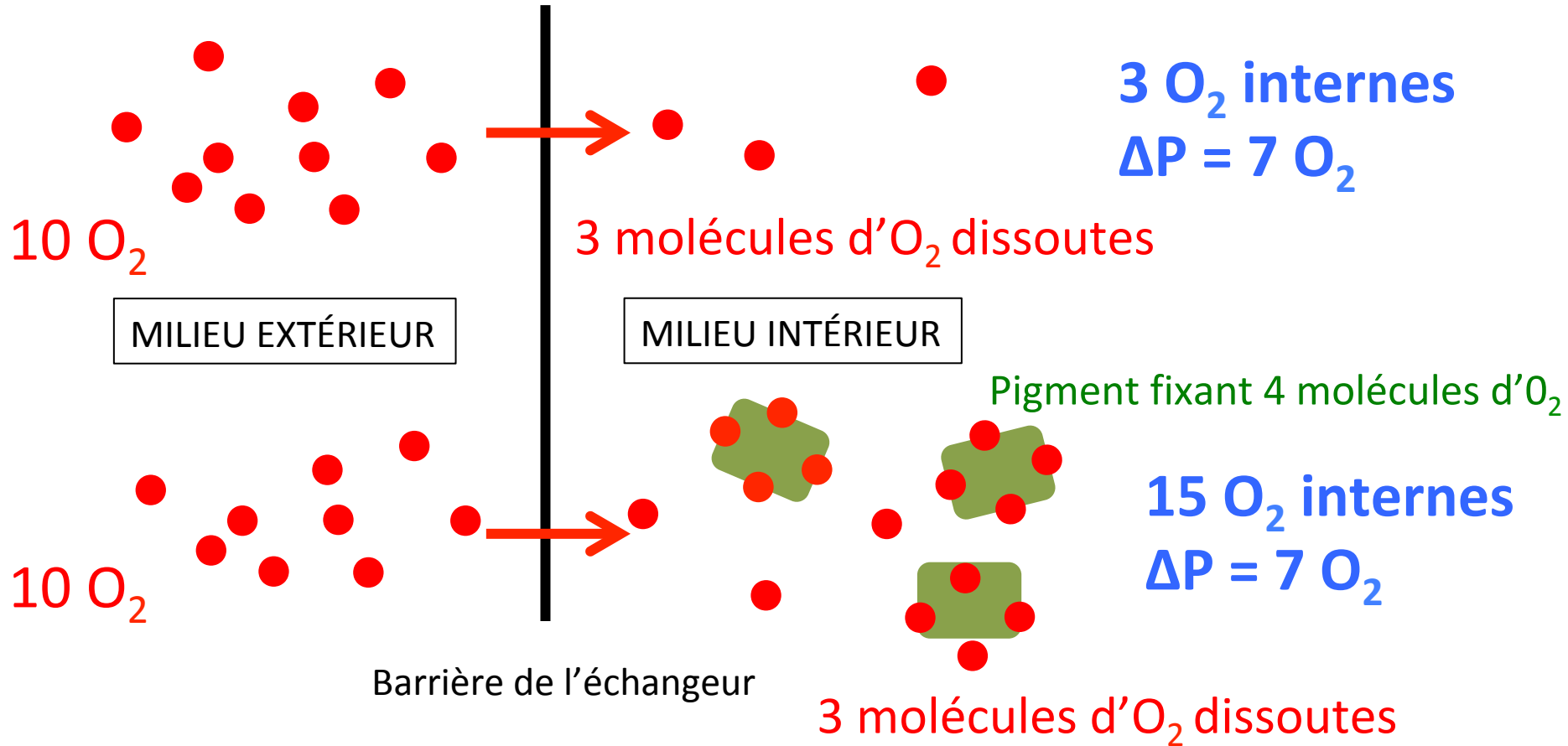


Sang veineux



Source : CHU Mongi Slim

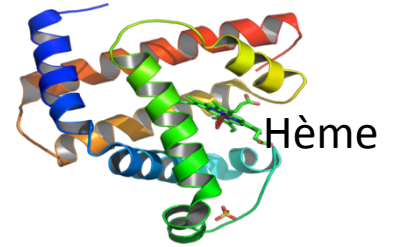
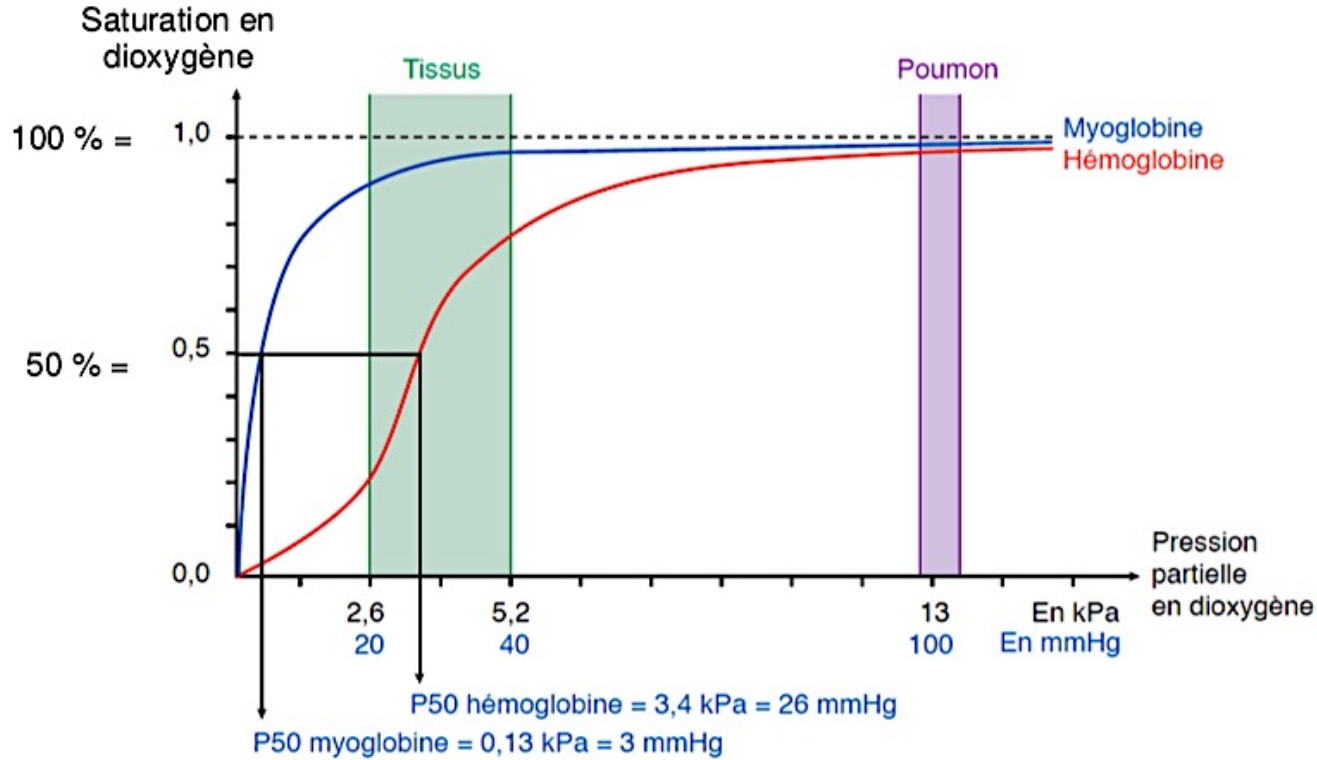
# Le pigment respiratoire permet de fixer davantage d'O<sub>2</sub>



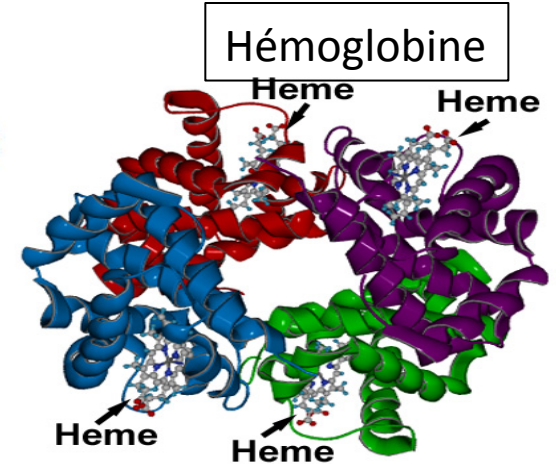
# **3. La convection interne et les pigments respiratoires**

## **3.2. Étude de l'hémoglobine des Mammifères**

# L'hémoglobine, un pigment respiratoire



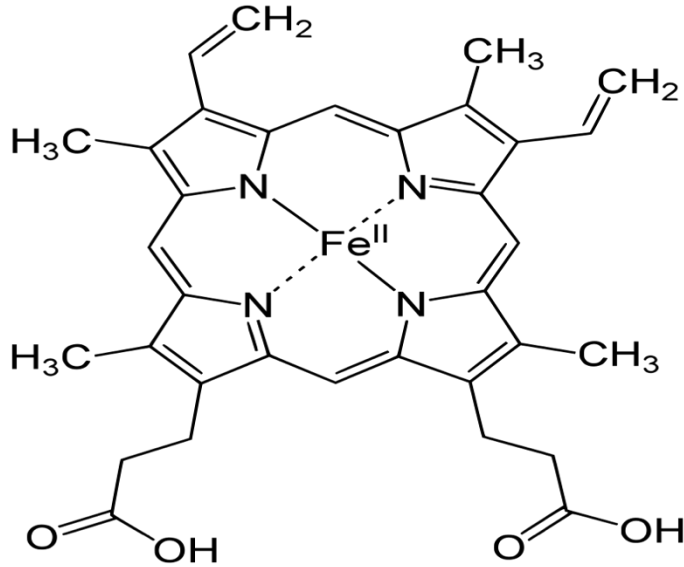
Myoglobine



Hémoglobine

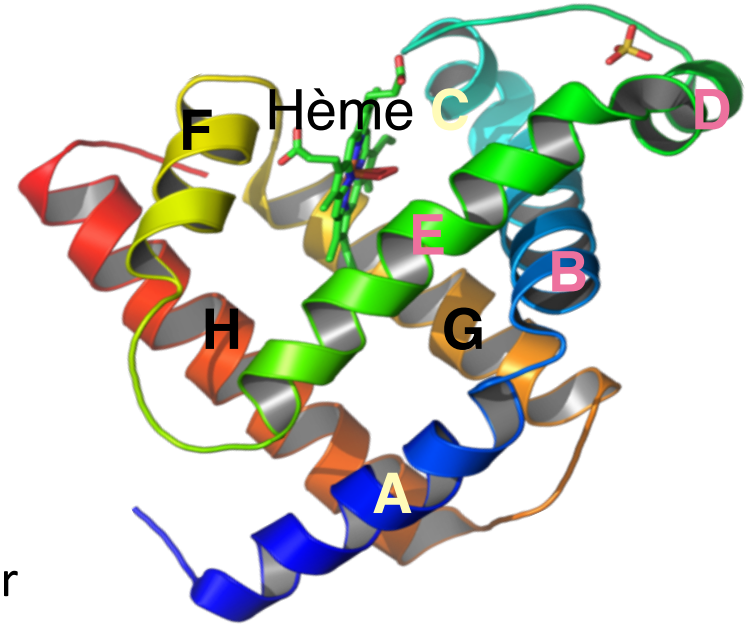


# L'hème fixe une molécule d'O<sub>2</sub>



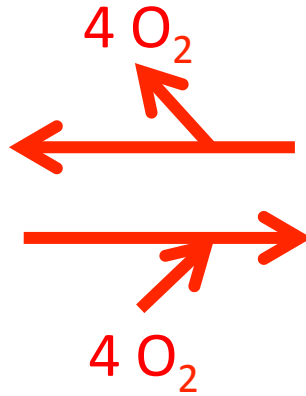
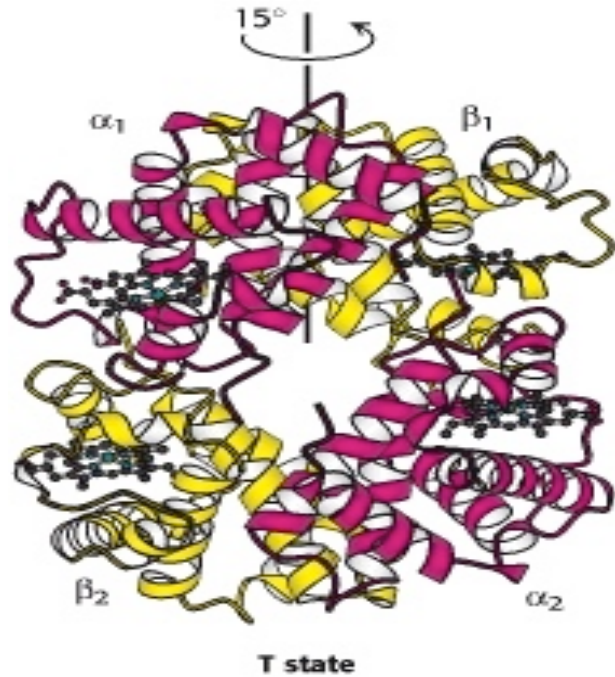
L'hème :

- cœur de Fe<sup>2+</sup> lié au noyau tétra-pyrrolique par 4 liaisons de coordination
- 1 liaison avec une histidine de la chaîne d'acides aminés
- 1 liaison possible avec O<sub>2</sub>



Structure 3D de la myoglobine et de chaque sous-unité de l'hémoglobine

# La transition allostérique de l'hémoglobine

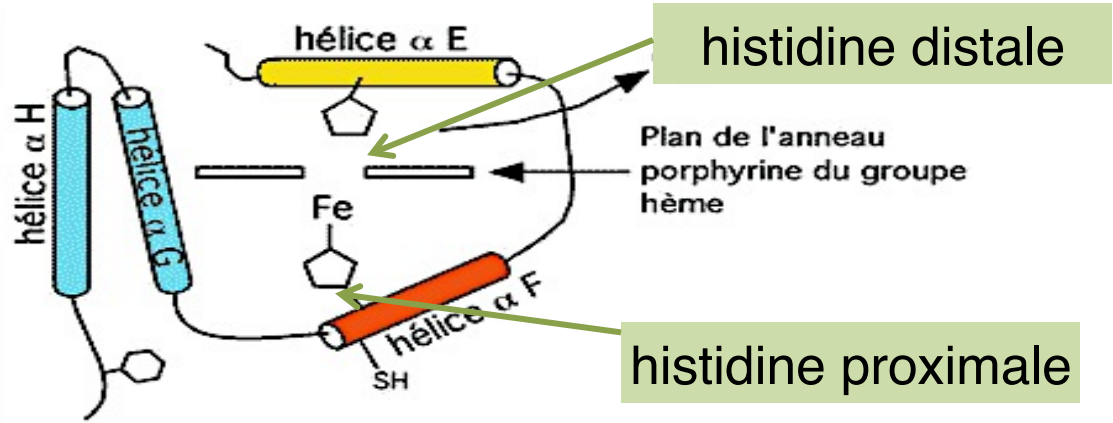


Forme T (tendue) peu accessible pour  $O_2$

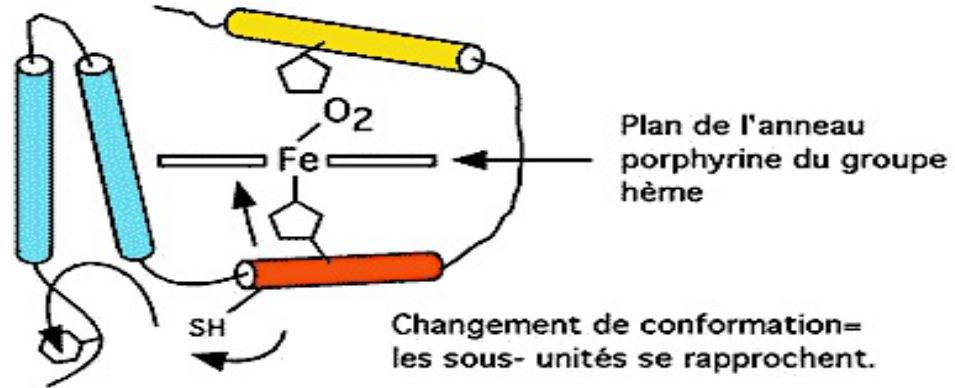
Forme R (relâchée) plus accessible pour  $O_2$

# La transition allostérique de l'hémoglobine (détail)

Forme T :  $\text{Fe}^{2+}$  est tiré par l'histidine proximale



Forme R : la liaison avec  $\text{O}_2$  tire  $\text{Fe}^{2+}$  dans le plan de l'hème donc tire l'hélice F



# **3. La convection interne et les pigments respiratoires**

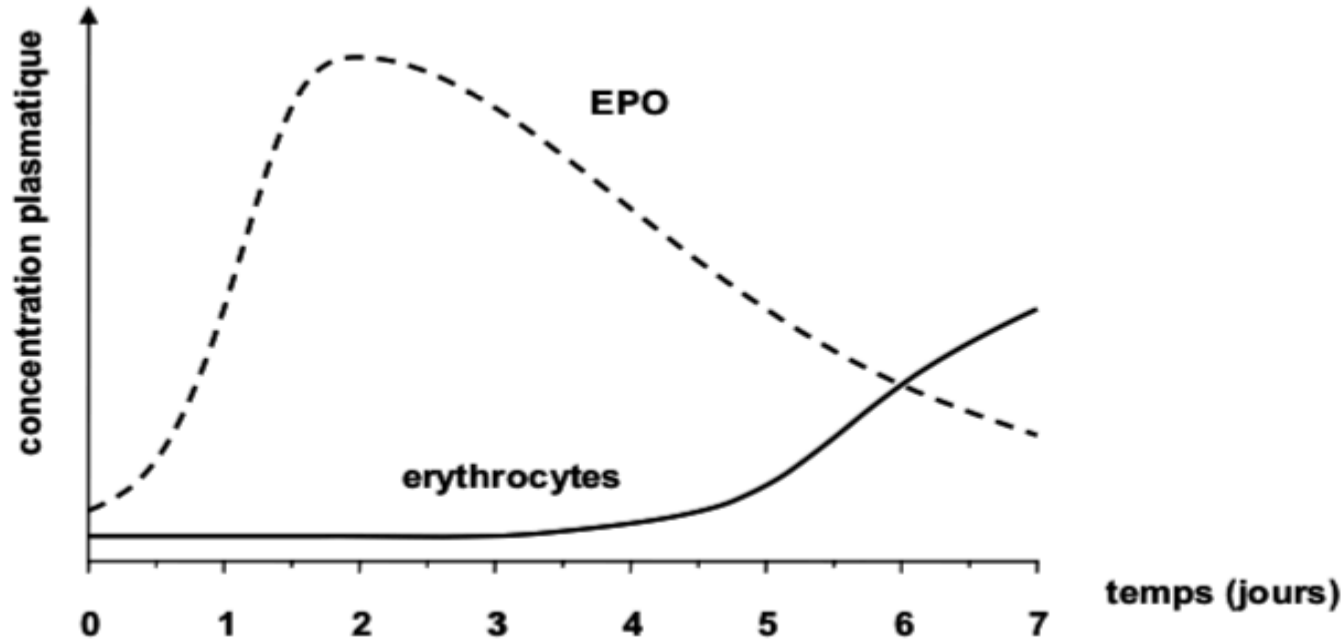
## **3.3. Les facteurs d'adaptation des hémoglobines**

# Effet prolongé de l'altitude

Numération globulaire avant et après un séjour de 3 semaines en Bolivie et Chili à des altitudes variant de 2500 m à 5000 m avec des séjours prolongés vers 3800 m.

Numération globulaire	Avant le séjour en altitude	Après le séjour en altitude	Valeurs normales
Hématies	4 580 000 /mm <sup>3</sup>	5 170 000 /mm <sup>3</sup>	de 4,5 à 5,7
Hémoglobine	13,5 g/100 mL	15,9 g/100 mL	de 13 à 17
Hématocrite	40,0 %	46,6 %	de 42 à 52
Volume globulaire moyen	87 mm <sup>3</sup>	90 mm <sup>3</sup>	de 80 à 100
Charge (hémoglobine corpusculaire moyenne)	29,4 pg	30,7 pg	de 27 à 32
Poids moyen d'hémoglobine par hématie			

# Effet prolongé de l'altitude



concentration plasmatique d'EPO et nombre d'érythrocytes lors d'un séjour en altitude (4300 m)

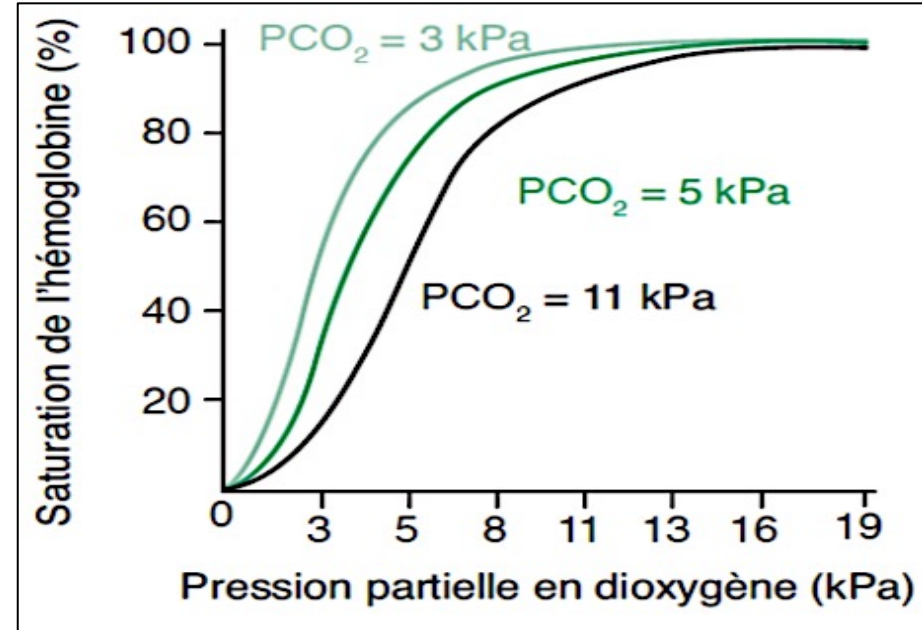
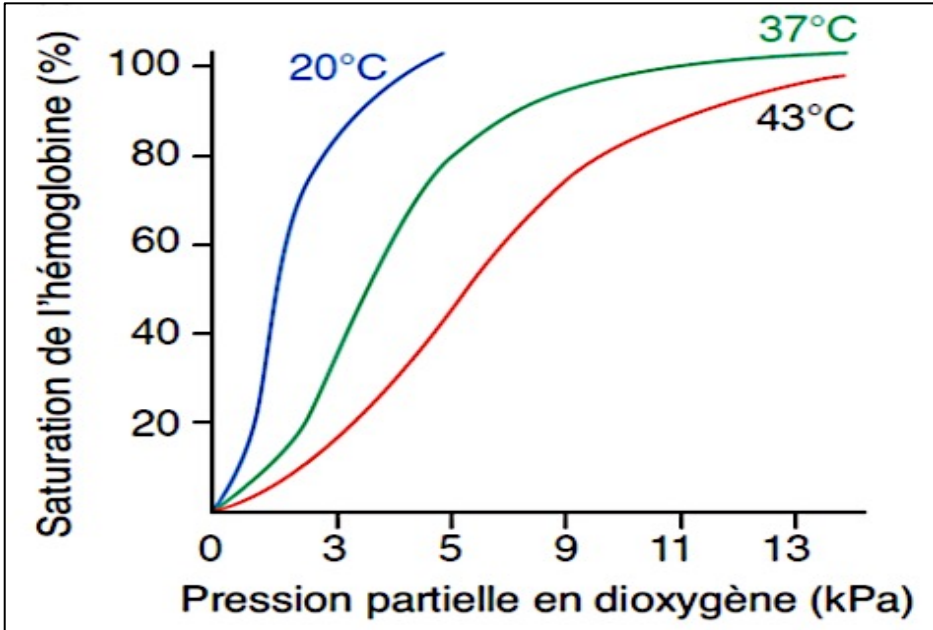


# La quantité d'hémoglobine varie...

- **Selon l'altitude** : la production des hématies est stimulée par l'érythropoïétine, hormone synthétisée en déficit en  $O_2$  (altitude)
- **Selon le taxon** : Oiseaux et Mammifères ont plus d'hémoglobine que les Poissons et Amphibiens (lien avec l'endothermie)
- **Selon le milieu de vie** : chez les Mammifères, le phoque de Weddel stocke 300 mL d' $O_2$  par L de sang (contre 200 chez l'Homme)

# La cinétique de l'hémoglobine en fonction de l'activité des tissus

Un tissu en activité s'échauffe et libère du  $\text{CO}_2$

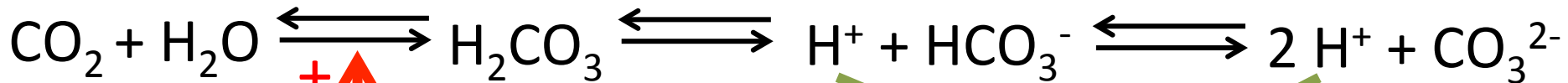


# L'effet du CO<sub>2</sub>

Le transport du CO<sub>2</sub> sous différentes formes :

- 7% sous forme dissoute
- 23% lié à l'hémoglobine (sur certains NH<sub>2</sub> d'aa)
- 70% sous forme combinée à l'eau : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

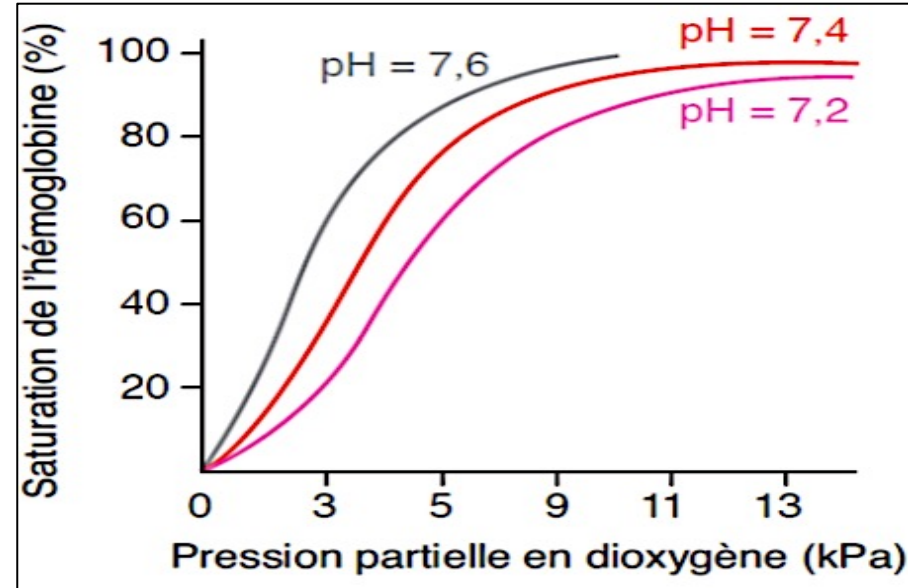
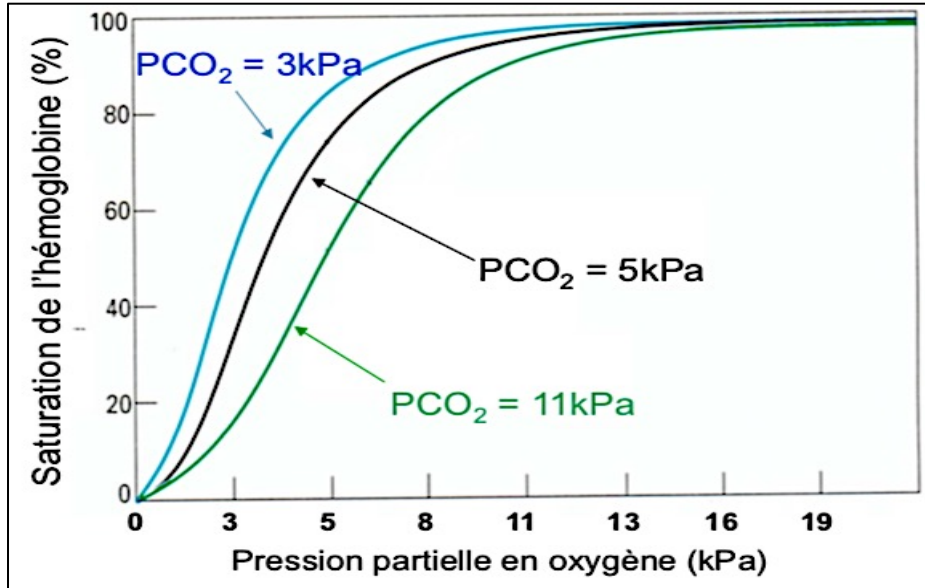
La quantité de CO<sub>2</sub> joue sur le pH.



Anhydrase carbonique  
enzyme contenue dans l'hématie

Baisse de pH

# Le double effet du CO<sub>2</sub> : effet Bohr



Fixation covalente du CO<sub>2</sub> sur l'hémoglobine => forme carbamylée moins affine pour O<sub>2</sub>



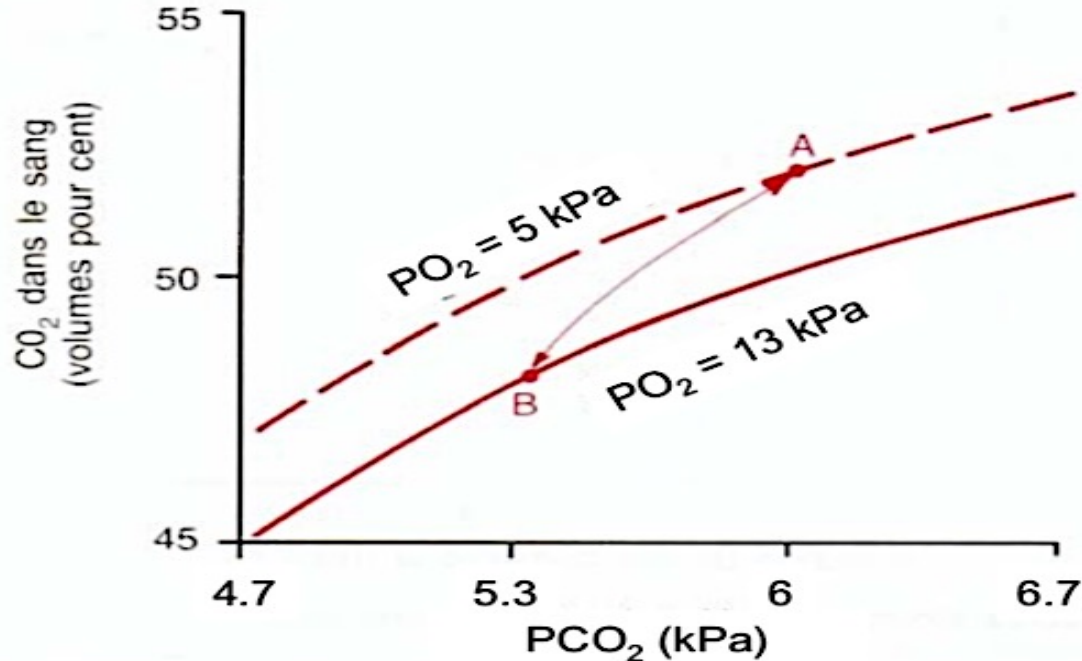
Liaisons d'ions H<sup>+</sup> sur l'hémoglobine => forme moins affine pour O<sub>2</sub>

$$HbO_2 + H^+ \rightleftharpoons HHb + O_2$$

Source : Lewitsky, 2003, Pulmonar Physiology

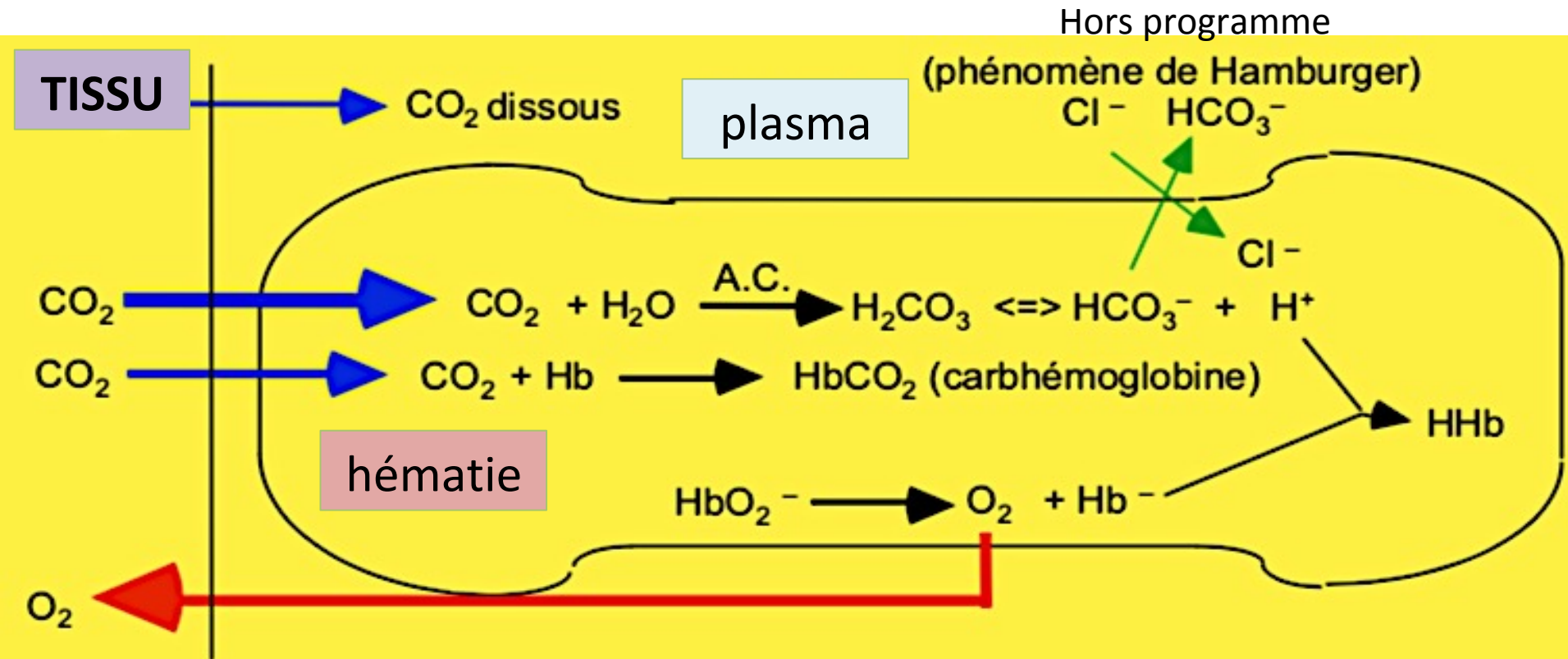
# L'effet Haldane

Pour une même valeur de  $PCO_2$ , le  $CO_2$  se fixe plus facilement à faible  $PO_2$ , quand l'hémoglobine est désoxygénée.



$CO_2$  se fixe davantage sur la forme T : c'est l'effet Haldane

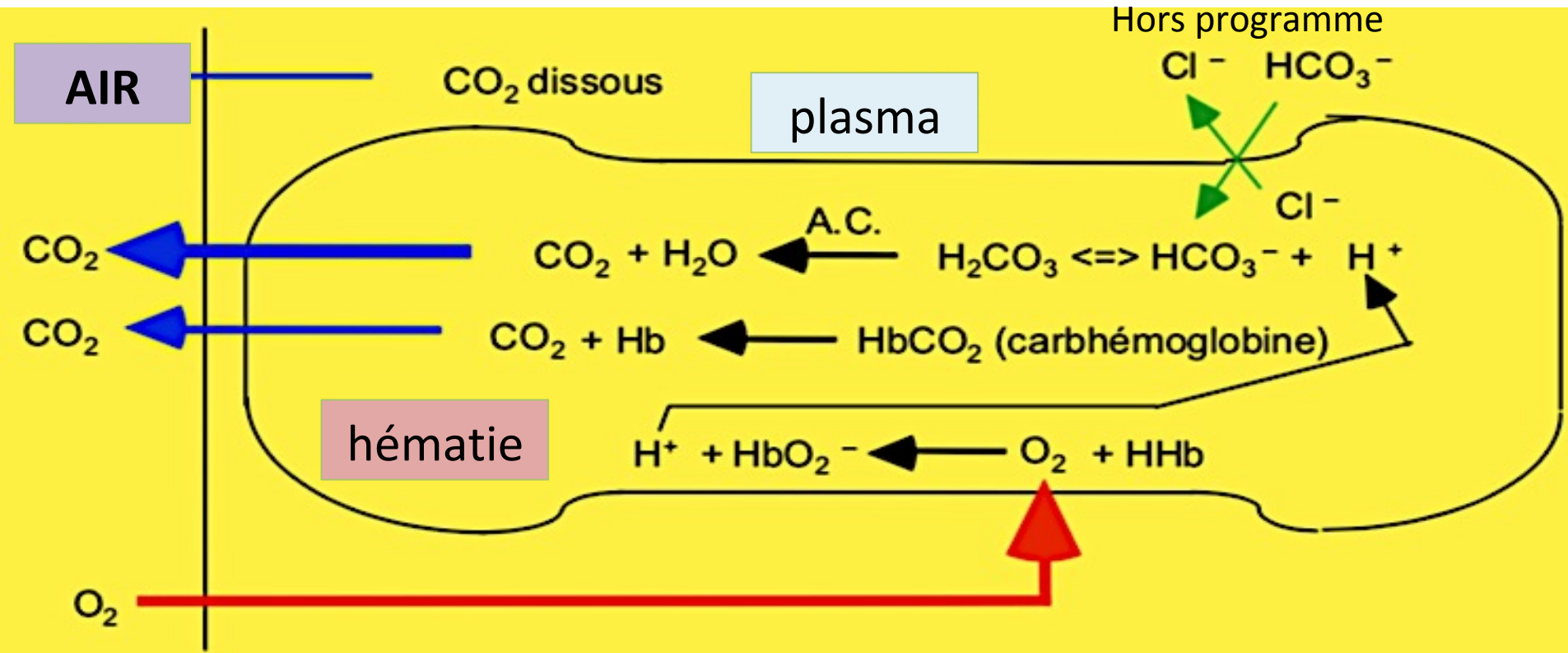
# Bilan des échanges gazeux tissulaires



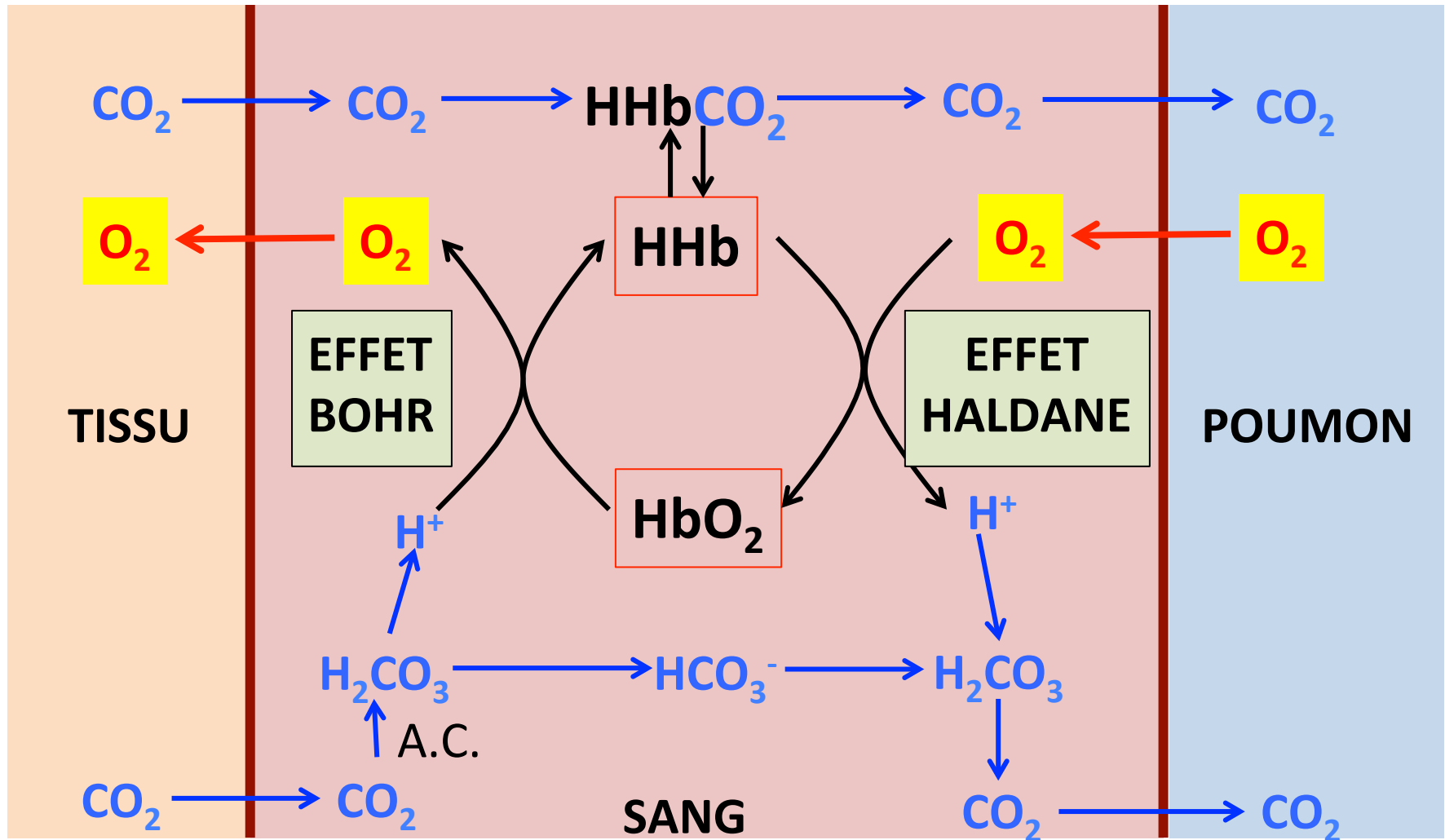
A.C. : anhydrase carbonique



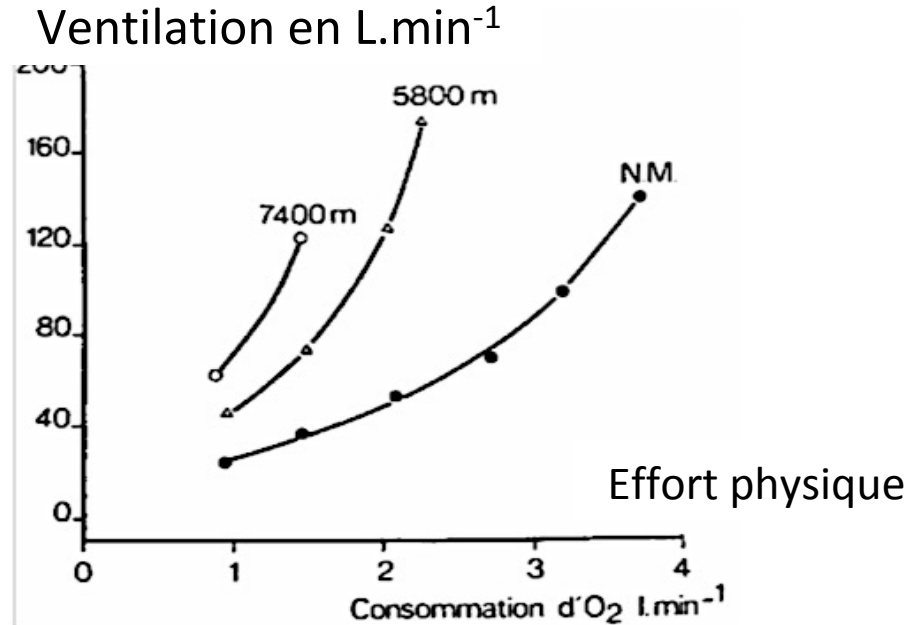
# Bilan des échanges gazeux pulmonaires



A.C. : anhydrase carbonique

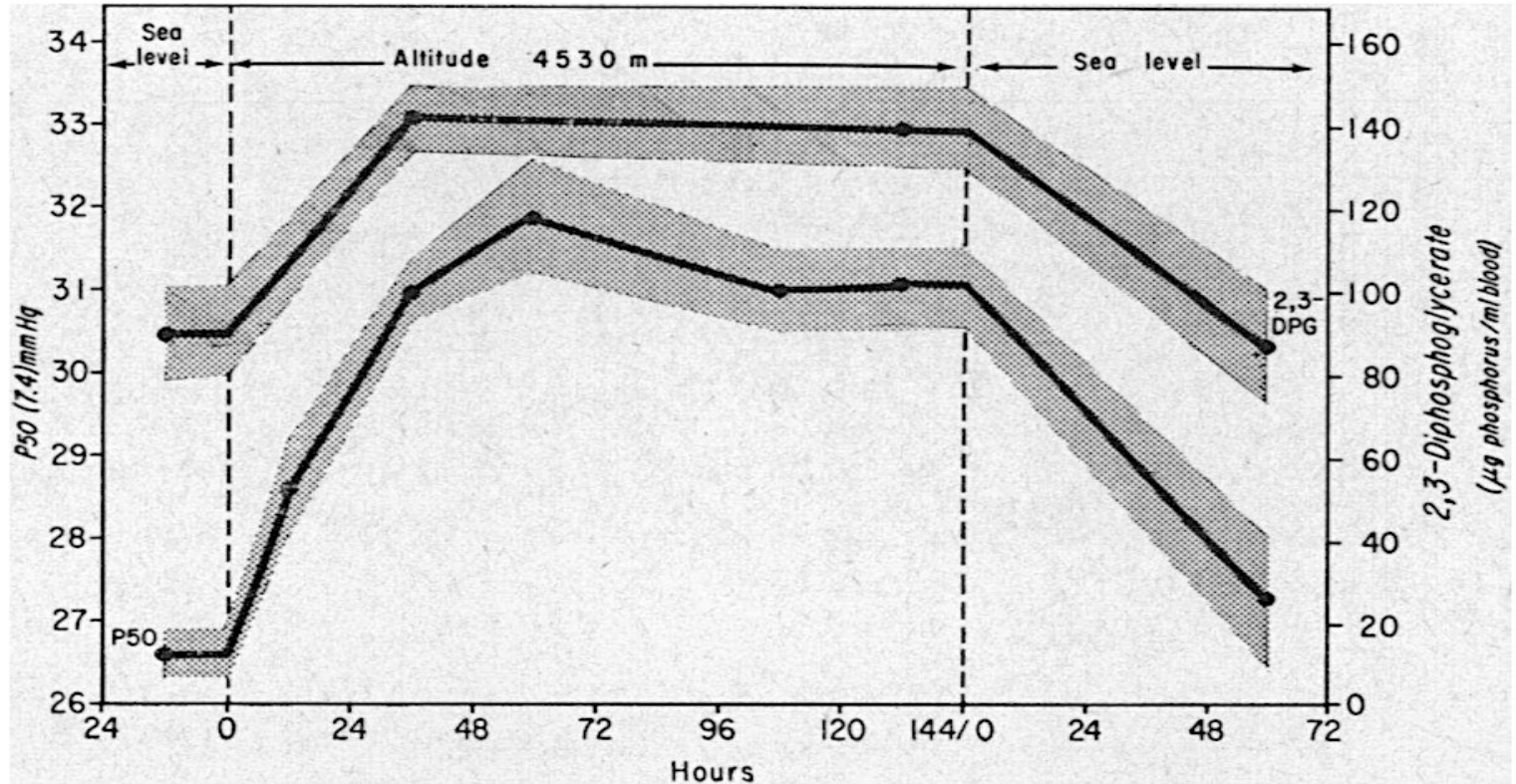


# Les effets immédiats de l'altitude sur l'Homme

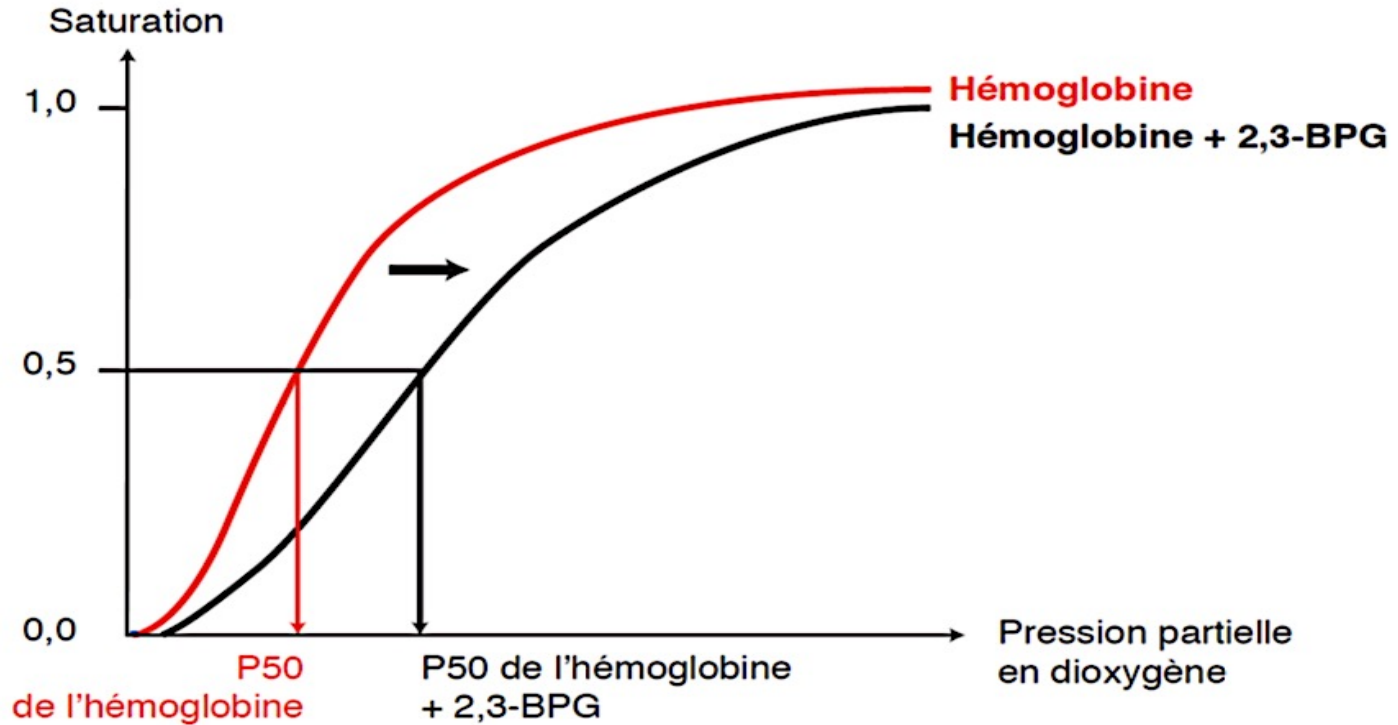


# Les effets immédiats de l'altitude sur l'Homme

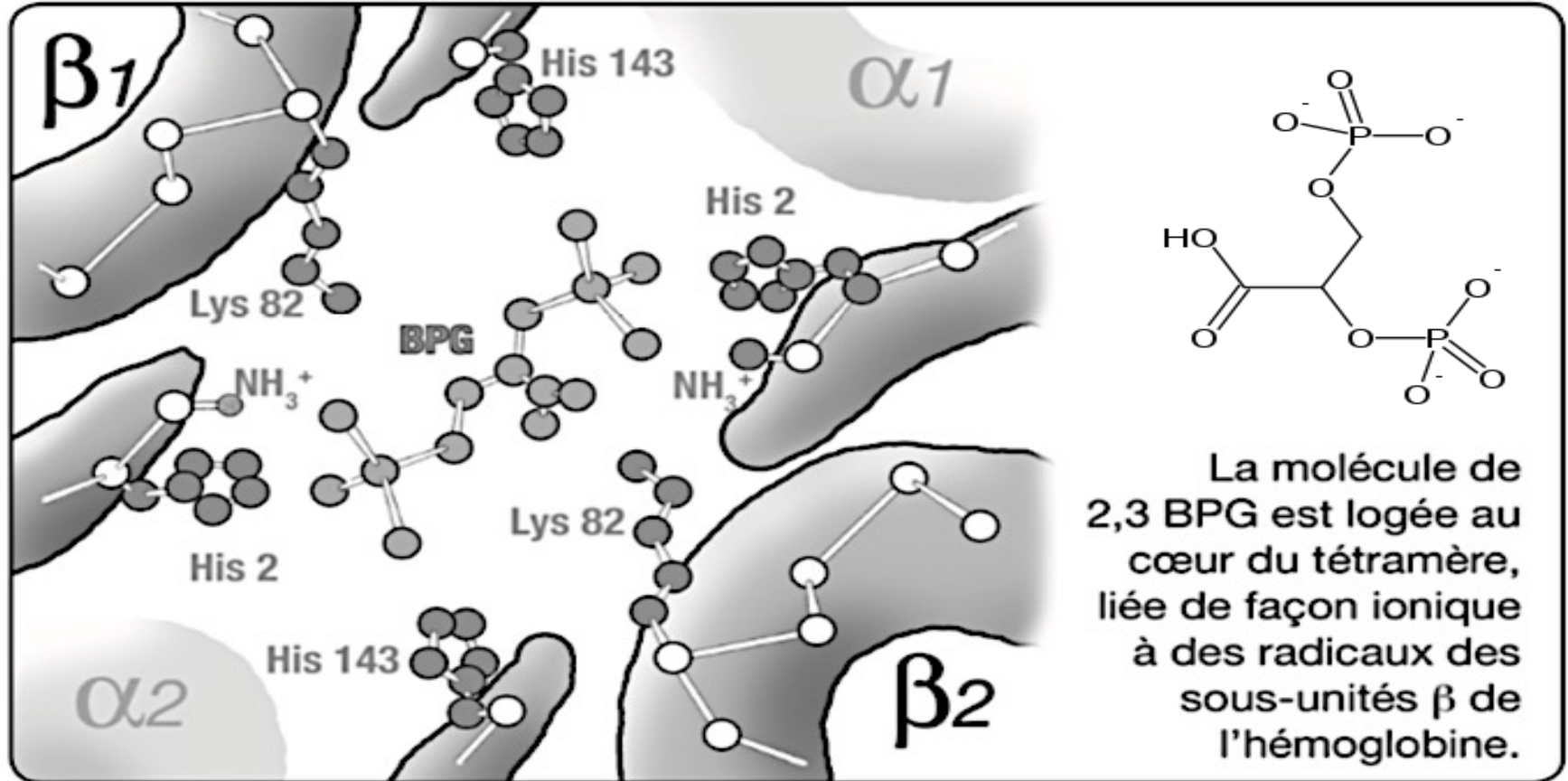
2-3 BPG (2-3 Bisphosphoglycérate) = 2-3 DPG (2-3 Diphosphoglycérate)



# La teneur en 2-3 BPG et l'altitude



# La teneur en 2-3 BPG et l'altitude





# BILAN : effets de l'altitude

## Réponses à un séjour en altitude

- Effet immédiat :
  - Accélération du rythme ventilatoire
  - Hausse du taux sanguin de 2-3 BPG donc baisse de l'affinité pour O<sub>2</sub>
- Effet différé :
  - Production d'hématies (effet de l'érythropoïétine)

# CONCLUSION

- Interactions étroites entre les organismes et leur milieu de vie
- Mode de respiration lié au plan d'organisation et au milieu de vie de l'animal
- Convergences anatomiques et fonctionnelles entre des animaux de taxons éloignés mais vivant dans des milieux proches